

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Constructions civiles et industrielles

MATERIAUX COMPOSITES ISOLANTS A BASE

DES DECHETS DE LIEGE

Par

Salem MERABTI

Devant le jury composé de :

A. BOUAFIA	Pr, U, de Blida	Président
L. AZZOUZ	Pr, U, de Laghouat	Examineur
M. ABED	Pr, U. de Blida	Examineur
M. DAHLI	M.C, U. de Tizi ousou	Examineur
S. KENAI	Pr, U. de Blida	Rapporteur
Mme MOUAFFOK	Chargée de recherche, CNERIB	Co-Rapporteur

Blida, Juin 2005

RESUME

Le développement des matériaux utilisant des déchets de bois est une alternative intéressante pour économiser l'énergie et préserver l'environnement. L'objectif principal de ce travail est de contribuer à la valorisation des déchets de liège pour la fabrication d'un matériau composite isolant à base de ciment.

L'étude expérimentale a porté essentiellement sur trois types de déchets de liège (expansé, cru et poudre de liège expansé) et mélangés en volume avec le ciment (C/L :1/1, C/L :1/2, C/L et 1/3) pour obtenir un matériau composite.

Les essais préliminaires de composition ont été effectués pour définir les compositions optimales. Les caractéristiques physiques, mécaniques et thermo-physiques de ce matériau composite sont ensuite analysées. Afin d'analyser la faisabilité de ce matériau composite, des blocs à base du liège ont été fabriqués et un enduit en ciment est appliqué sur eux. Ensuite, la contrainte de l'enduit est mesurée.

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que le composite à base du liège expansé à une meilleure performance mécanique à celui à base du liège cru. Néanmoins, le composite à base du liège cru possède des bonnes performances d'isolation thermique et acoustique. Les résultats obtenus sur ces matériaux composites ont montré la possibilité de l'utilisation de ces matériaux dans l'isolation des toitures et cloisons.

Mots clés : Ciment, déchets, liège cru liège expansé, flexion, compression, densité, isolation thermique, isolation acoustique, bloc en liège.

ملخص

إن تطوير المواد المركبة باستعمال مخلفات الخشب هو البديل الأحسن من أجل توفير الطاقة و الحفاظ على المحيط و الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو تقييم مخلفات الفلين من اجل صناعة مواد مركبة عازلة.

تعرضت الدراسة التجريبية إلى ثلاثة أنواع من مخلفات الفلين (الفلين المتمدد، الطبيعي و مسحوق الفلين المتمدد) و قد تم خلط هذه المخلفات بالأحجام مع الاسمنت (اسمنت / فلين: 1/1، 2/1، 3/1) من اجل الحصول على المادة المركبة.

التجارب التمهيدية على المواد المركبة تمت من أجل البحث على التركيبات الملائمة ثم تحليل الخصائص الفيزيائية , الميكانيكية و الفيزيو حرارية للمادة المركبة . من أجل تبين مدى إمكانية استعمال هذه المركبة , صممت كتل على أساس الفلين و تم طلاءها بالإسمنت و بعدها تم تقييم قوة شد الطلاء .

أظهرت نتائج الدراسة التجريبية أن المادة المركبة من الفلين المتمدد لديها مقاومة ميكانيكية أفضل من المادة المركبة من الفلين الطبيعي, و بالمقابل هذه الأخيرة تتميز بعزل حراري و صوتي جيد.

أظهرت النتائج المتحصل عليها إمكانية استعمال هذه المادة المركبة في عزل الجدران و الأسقف.

الكلمات الجوهرية: الإسمنت , مخلفات الفلين , الفلين المتمدد , الفلين الطبيعي , مسحوق الفلين المتمدد , الضغط , الإنحناء , الكثافة , العزل الحراري , العزل الصوتي , كتل الفلين .

ABSTRACT

The development of materials of waste wood is an interesting alternative to save energy and to preserve the environment. The principal objective of this work is to contribute to the development of the cork waste for the manufacture of a cement composite insulating material.

The experimental study dealt with three types of cork (expanded, raw and powder of cork expanded) and mixed in volume with cement (C/L:1/1, 1/2 and 1/3) to obtain a composite material.

Preliminary tests of optimal mix-design were carried out. The physical, mechanical and thermo-physical characteristics of this composite material were then studied. The feasibility of the composite material was investigated by fabricating blocks to which cement rendering was applied and the bond between these blocks and the cement rendering is measured.

The results of the experimental study showed that the composite with expanded cork has a better mechanical performance than that with raw cork. Nevertheless, the composite with raw cork has better insulating and acoustic performances. The results obtained on these composite materials showed die possibility of using them in roof insulation and as partition walls.

Key words: Cement, waste cork, raw cork, expanded cork, inflection, compression, density, heat insulation, soundproofing, block out of cork.

REMERCIEMENTS

Je profite cette occasion pour remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail et en particulier mon directeur de thèse Pr. Saïd KENAI pour ses aides et ses orientations précieuses pour l'élaboration de ce travail.

Je remercie également Mme MOUAFFAK chargée de recherche au niveau du CNERIB qui a sans cesse contribué à la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements au technicien de laboratoire de Génie Civil de l'université Saad DAHLAB de BLIDA Mr Abdelkadeur FORTAS.

Je remercie vivement le personnel du laboratoire du CNERIB et en particulier les techniciens Méziane, Amine, Karim qui m'ont aidé durant toute la période expérimentale.

Je remercie aussi les enseignants de département de Génie Civil de l'université de BLIDA et à leur tête le chef de département Mr MENADI.

Je remercie vivement les chercheurs du CNERIB et à leur tête Dr AFRA Hamid pour m'avoir permis l'accès au laboratoire et l'utilisation des équipements disponibles.

Enfin, j'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury dont leur présence peut donner une dimension supplémentaire à cette thèse par leurs remarques.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

- A ma mère et mon père qui m'ont soutenu durant toute ma formation
- A mon frère et sa femme
- A mes deux sœurs
- A tous mes amis, surtout : Bouhou, Farid, Ali, Hamid
- A tous les étudiants de post-graduation
- A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin pour réaliser ce modeste travail.

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	La résistance à la compression des quelques bétons légers en fonction de la masse volumique	17
Figure 1.2.	Résistance à la compression de béton de perlite en fonction de la masse	29
Figure 2.1	Evolution de la densité en fonction du pourcentage de fibres pour les différents blocs	38
Figure 2.2	Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fibres pour les différents blocs	39
Figure 2.3	Evolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de fibres pour les différents blocs	39
Figure 2.4	Effet du pourcentage de fibres de noix de coco sur la conductivité thermique des composites pour les différentes fibres et la taille du sable	41
Figure 2.5	Effet du pourcentage de fibres de durian sur la conductivité thermique des composites pour différentes longueurs de fibre et tailles du sable.	41
Figure 2.6	Evolution du retrait en fonction de temps et de la concentration des fibres	44
Figure 2.7	Evolution de gonflement et en fonction de l'âge et de la concentration des fibres.	44
Figure 2.8	La conductivité thermique en fonction de la concentration	45
Figure 2.9	Influence des constituants sur la densité du matériau composite	49
Figure 2.10	Influence des différents constituants sur la résistance mécaniques, la résistance à la compression (a, b c) et la résistance a la traction (d, e, f).	50
Figure 2.11	Variation de la conductivité thermique en fonction de la proportion de masse de copeaux en bois.	50
Figure 2.12	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et de traitement réalisé sur les cylindres	54
Figure 2.13	Les effets du traitement de bois sur la résistance à la compression du composite	55
Figure 3.1	Schéma du transfert de chaleur à travers une paroi du bâtiment	58
Figure 3.2	Evolution de la conductivité thermique en fonction de l'âge et de rapport E/C	62
Figure 3.3	Evolution de la conductivité thermique en fonction de volume des agrégats et du ciment	63
Figure 4.1	Analyse granulométrique des deux granulats du liège	71
Figure 4.2	Schéma de calcul de la flexion	76
Figure 4. 3	Appareil utilisé pour la mesure de la variation dimensionnelle (Retrait et gonflement)	77
Figure 4.4	Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire	78
Figure 4.5	L'appareil de mesure de la conductivité thermique (CT-METRE)	79
Figure 4.6	L'appareil de mesure de l'absorption acoustique (double microphone 4206)	81
Figure 4.7	Les variables étudiées et essais réalisés dans partie expérimentale	83
Figure 5.1	Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps (environnement CE)	85
Figure 5.2	Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans les différents environnements de cure	86

Figure 5.3	Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la durée de cure humide	87
Figure 5.4	Evolution de la masse volumique en fonction du rapport E/C (Granulats du liège expansé)	89
Figure 5.5	Evolution de la masse volumique en fonction du pourcentage du liège expansé	89
Figure 5.6	Evolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage du liège expansé	91
Figure 5.7	Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C (liège expansé)	91
Figure 5.8	Evolution de la résistance à la flexion en fonction du rapport E/C (liège expansé)	92
Figure 5.9	Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du liège expansé	93
Figure 5.10	Corrélation entre la résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion pour les différents rapports E/C	93
Figure 5.11	Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique pour les différents rapport E/C	94
Figure 5.12	Evolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage du liège cru	96
Figure 5.13	Evolution de la résistance à la compression en fonction de concentration du liège cru	97
Figure 5.14	Evolution de la résistance à la flexion en fonction de concentration du liège cru	98
Figure 5.15	Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion	99
Figure 5.16	Corrélation entre la résistance à la compression et à la masse volumique apparente pour les différents rapports E/C	100
Figure 5.17	Evolution de la perte de masse en fonction du temps (liège expansé)	103
Figure 5.18	Evolution de la perte de masse en fonction du temps (Liège cru)	103
Figure 5.19	Evolution du gain de masse en fonction du temps (liège expansé)	104
Figure 5.20	Evolution du gain de masse en fonction du temps (liège cru)	105
Figure 5.21	Evolution du retrait en fonction du temps (liège expansé)	106
Figure 5.22	Evolution du retrait en fonction du temps (liège cru)	106
Figure 5.23	Evolution du gonflement en fonction du temps (liège expansé)	107
Figure 5.24	Evolution du gonflement en fonction du temps (liège cru)	107
Figure 5.25	Relation entre le retrait et la perte de masse (Liège expansé)	108
Figure 5.26	Relation entre le retrait et la perte de masse (Liège cru)	108
Figure 5.27	Relation entre le gonflement et le gain de masse (liège expansé)	109
Figure 5.28	Relation entre le gonflement et le gain de masse (liège cru)	109
Figure 5.29	Absorption de l'eau en fonction du temps (liège expansé)	110
Figure 5.30	Absorption de l'eau en fonction du temps (liège cru)	111
Figure 5.31	La conductivité thermique en fonction de concentration en liège (expansé, cru)	112
Figure 5.32	La conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche	113
Figure 5.33	La conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression (expansé et cru)	113
Figure 5.34	Schéma d'un plancher sur cave	116
Figure 5.35	Schéma d'un mur extérieur	116
Figure 5.36	L'évolution du coefficient d'absorption acoustique α en fonction de fréquence de quelques matériaux	118

Tableau 1.1	La conductivité thermique en fonction de la classe du béton léger	19
Tableau 1.2	La capacité de production annuelle et journalière de BATICOMPOS	21
Tableau 1.3	La conductivité thermique des panneaux standard	22
Tableau 1.4	La capacité de transformation de l'Entreprise Nationale de Liège (ENL)	25
Tableau 1.5	Les caractéristiques principales des panneaux d'anas de lin	26
Tableau 1.6	Les caractéristiques des bétons caverneux et semi caverneux	28
Tableau 1.7	La résistance à la compression en fonction de la masse volumique	36
Tableau 2.1	Comparaison entre le nouveau matériau et le mortier	41
Tableau 2.2	Principales propriétés physiques des quatre types de fibres	42
Tableau 2.3	Les constituants organiques des fibres de Dokar	42
Tableau 2.4	Analyse minéralogique de la poudre de fibres de Dokar	42
Tableau 2.5	Les propriétés physiques moyennes de la fibre de coco, du sisal et les déchets de pulpe d'eucalyptus	45
Tableau 2.6	Propriétés mécaniques moyennes de quelques échantillons de fibre provenant du Brésil	46
Tableau 2.7	Gamme de variabilité de la composition chimique (par % de la masse) des différentes fibres.	46
Tableau 2.8	Composition de la solution de LAWRENCE .	51
Tableau 2.9	Les formulations des échantillons, ciment seul et fibres-ciment traitée et non traitée	52
Tableau 2.10	Résistance à la compression du matériau composite fibres-ciment traité avec le sodium et potassium	53
Tableau 2.11	Résistance à la compression du matériau composite fibres-ciment traité avec de silane	53
Tableau 2.12	Résistances à la compression des groupes de bloc	55
Tableau 3.1	Les valeurs de coefficient de transmission thermique utile K	61
Tableau 4.1	Composition chimique du ciment utilisé	68
Tableau 4.2	Composition minéralogique du ciment utilisé	68
Tableau 4.3	Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge	69
Tableau 4.4	Essai physiques réalisés sur le ciment	69
Tableau 4.5	Les valeurs de la masse volumique apparente des débris du liège	72
Tableau 4.6	Résultats de taux de l'humidité pour débris du liège	73
Tableau.4.7	Les résultats des essais d'absorption pendant 24 heures pour une masse de 50 g	74
Tableau 5.1	La résistance à la compression en fonction de la méthode cure	85
Tableau 5.2	La masse volumique apparente en fonction du rapport E/C et du rapport C/L	88
Tableau 5.3	Résistance à la compression en fonction du rapport E/C et du rapport C/L	90
Tableau 5.4	La résistance à la flexion en fonction du rapport E/C et du rapport C/L	92
Tableau 5.5	La masse volumique apparente en fonction du rapport E/C et du rapport C/L	95
Tableau 5.6	La résistance à la compression en fonction du rapport E/C et du rapport C/L	96
Tableau 5.7	La résistance à la flexion en fonction du rapport E/C et du rapport C/L	98
Tableau 5.8	Les résultats obtenus sur le matériau composite Ciment /Poudre du liège expansé	101
Tableau 5.9	Les variables retenues pour le matériau composite (Liège expansé et cru)	102

Tableau 5.10	Les valeurs de la conductivité thermique de matériau composite	112
Tableau 5.11	Le coefficient de la conductivité thermique et la résistance à la compression de quelques matériaux en fonction de la masse volumique	114
Tableau 5.12	Les épaisseurs trouvées pour chaque composition	116
Tableau 5.13	Coefficient d'absorption acoustique (α) en fonction de la fréquence de l'onde sonore	117
Tableau 5.14	Comparaison du coefficient d'absorption acoustique des quatre compositions du matériau composite avec les matériaux classiques	118
Tableau 5.15	Les masses volumiques des blocs Ciment- Liège	119

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	02
REMERCIEMENTS.....	05
TABLE DES MATIERES.....	06
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.....	08
INTRODUCTION GENERALE.....	12
1. LES BETONS LEGERS ET LES MATERIAUX ISOLANTS.....	
1.1 Introduction.....	15
1.2 Bétons légers	15
1.3 Matériaux isolants	20
1.4. Conclusion	36
2. MATERIAUX COMPOSITES ISOLANTS A BASE DES DECHETS VEGETAUX.....	37
2.1 Introduction.....	37
2.2 Utilisation des granulats de bois.....	37
2.3. Développement des blocs à base des déchets de noix de coco.....	38
2.4. Béton léger à base peaux de fruits.....	39
2.5. Utilisation des fibres de surface de palmier dattier.....	42
2.6. Matériau composite à base des fibres cellulosique.....	43
2.7. L'expérience du Brésil dans l'utilisation des fibres et des déchets végétaux en composite de ciment.....	45
2.8. Matériau composite à base des copeaux de sapin.....	47
2.9. Durabilité des matériaux composites végétaux.....	50
2.10. Conclusion	56
3. LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MORTIERS ET DES BETONS ET LES TECHNIQUES DE MESURES	57
3.1 Introduction	57
3.2 Phénomène de l'échange de chaleur	57
3.3. La conductivité thermique des mortiers et des bétons	61
3.4 Les techniques de mesure de la conductivité thermique.....	63
3.5. Conclusion.....	67

4. MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS.....	68
4.1 Introduction	68
4.2 Matériaux utilisés.....	68
4.3 Préparation du mélange Ciment / Liège.....	74
4.4 Essais effectués sur les matériaux composites.....	75
4.5.Variables étudiées.....	82
5. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS.....	84
5.1 Introduction	84
5.2 Essais préliminaires sur le matériau composite.....	84
5.3. Comparaison entre les trois matériaux composites à base du liège.....	101
5.4 Optimisation des compositions du matériau composite à base du liège.....	101
5.5. Les essais réalisé sur le matériau composite (expansé, cru).....	102
5.6. Confection des blocs en matériau composite.....	119
5.7. Conclusion.....	120
CONCLUSION.....	121
RECOMMANDATION.....	123
REFERENCES.....	124

INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'économie de l'énergie et des ressources de la planète ont un intérêt particulier et la nécessité d'intégrer l'environnement dans le développement économique et sociale s'avère indispensable. La stratégie mondiale tente de préserver l'environnement dans le cadre d'une politique dite « développement durable », une politique qui vise la poursuite de développement avec un meilleur respect des équilibres écologiques et sociales. Plusieurs sommets mondiaux sont organisés dans des différents états (Rio de Janiro au Brésil en 1992, Kyoto au Japon en 1997, Jahannesbourg en Afrique du sud en 2002) dans le cadre de cette politique. A travers ces différents sommets, le secteur de la construction est considéré comme l'un des secteurs qui consomment beaucoup d'énergie et dont la politique de la maîtrise de cette dernière doit être mise en place. Cette exigence économique a été recommandée au sommet mondial pour le développement durable de Jahannesbourg [1].

Ceci a amené l'Algérie a intégré le concept de développement durable dans le développement économique et social par l'adoption d'un projet de loi [2]. Une politique de protection de l'environnement a été développée ces dernières années et des lois relatives à la protection de l'environnement, la gestion, au contrôle et élimination des déchets ont été élaborées [3,4]. L'Algérie possède des ressources considérables de hydrocarbures, et notre économie nationale est fondée sur ces richesses. Pour permettre à notre pays de préserver ces ressources naturelles. Une loi relative de maîtrise de énergie a été élaborée [5]. Cette dernière envisage la mise en place d'une réglementation thermique dans les bâtiments [6]. Par conséquent, deux règlements thermiques ont été mis en place par le Centre National d'Etude et de Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB) et un autre plus stricte est en cours de l'élaboration [7,8].

En Algérie, la part de consommation de l'énergie dans les habitations représente environ 46 % du bilan énergétique global [1]. En plus, l'Algérie est un pays à climat chaud en été ; d'où la nécessité de concevoir des constructions thermiquement isolantes pour tenir compte des effets considérable de ce phénomène. Les matériaux isolants doivent être réponsus localement, économiques et non polluants. Les travaux concernant les matériaux

composites isolants en l'Algérie sont peu développés et l'exploitation des matériaux locaux isolants reste limitée. Par contre, des études ont été réalisées dans plusieurs pays tel que le Brésil sur le développement des matériaux composites isolants à base de fibres végétales [9]. Dans les pays développés, la valorisation et le recyclage des déchets constituent de plus en plus un sujet d'actualité pour protéger l'environnement et rationaliser les ressources.

La récolte du liège en Algérie est estimée entre 200000 et 250000 q / an [10], et les quantités dégagées de déchets de liège à différents stades de production est estimés à 7500 t/an [11]. Par conséquent, la valorisation de ces derniers est nécessaire afin de concevoir un matériau composite qui peut être utilisé dans le domaine de la construction.

Notre étude vise à contribuer au développement d'un matériau composite isolant à base du ciment et des déchets de liège. Ce travail entre dans le cadre d'un programme national de recherche au sein du Centre National d'Etude et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) qui porte sur les « Matériaux composites isolants a base de déchets de liège ».

Le but principal de ce projet est la contribution à l'étude et l'élaboration d'un matériau local thermiquement isolant qui peut contribuer à réduire les coûts de la construction, par une réduction de l'importation coûteuse de matériaux équivalents. Pour ce faire, un matériau composite à base de ciment et des déchets de liège sera développé en fonction des exigences locales dans le domaine de l'isolation thermique des bâtiments. Ce matériau composite doit être résistant, durable, facile à réaliser et ayant une faible conductivité thermique pour être appliqué dans le domaine du bâtiment. Dans le but d'atteindre cet objectif, plusieurs paramètres ont été variés afin d'obtenir une composition optimale d'un matériau composite à base du ciment et déchets de liège.

Dans le but d'atteindre les objectifs déjà tracés dans cette étude, nous avons structuré notre mémoire en cinq chapitres. Après une introduction générale qui montre l'intérêt de l'économie l'énergie et de recyclage des déchets, le premier chapitre donne une revue bibliographique sur les bétons légers et les matériaux isolants. Le deuxième chapitre est réservé aux matériaux composites isolants à base des déchets végétaux. Le troisième chapitre donne une revue bibliographique sur la conductivité thermique des mortiers et

bétons et les techniques de mesures. Le quatrième chapitre donne les caractérisations des matériaux utilisés et les essais expérimentaux réalisés. Dans le cinquième chapitre, l'élaboration et l'étude d'un matériau composite minéral à base de déchets de liège sont données avec tous les essais expérimentaux effectués et les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

Enfin, des conclusions générales sur l'étude expérimentale et des recommandations pour des futurs travaux sont données.

CHAPITRE 1

LES BETONS LEGERS ET LES MATERIAUX ISOLANTS

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente un résumé succinct sur le béton léger. Ce dernier étant utilisé pour confectionner des éléments porteurs dans les constructions et afin d'alléger ces dernières. Sachant que le béton léger est considéré comme un matériau isolant, celui-ci se caractérise par sa faible masse volumique et son pouvoir d'isolation (thermiques, phoniques...etc.), réduisant ainsi le coût de la construction et économisant de l'énergie. Les principaux matériaux isolants utilisés dans le domaine du bâtiment sont présentés dans cette partie.

1.2. Bétons légers

1.2.1. Définition des bétons légers

Les bétons légers sont définis par leurs faible masse volumique, la masse volumique des bétons classiques composés de granulats minéraux courants est comprise entre 2200 kg/m^3 et 2600 kg/m^3 . Par contre, la masse volumique des bétons légers est inférieure à 1800 kg/m^3 et inférieure à 1000 kg/m^3 pour les bétons légers isolants. Le béton léger nous permet d'avoir une bonne isolation thermique ce qui nous donne une réduction importante de la consommation d'énergie.

1.2.2. Différents bétons légers

On distingue trois types de bétons légers : bétons cellulaires, bétons caverneux et bétons de granulats légers.

i) Bétons cellulaires

Les bétons cellulaires sont constitués d'un mélange de ciment et de granulats fins. On additionne à ce mortier gâché 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 petites bulles, ce qui donne un béton mousse. Leurs densités variées de 0.4 à 1.2 et leurs résistances mécaniques en compression sont de l'ordre de 4 à 5 MPa à 28 jours de durcissement, pour des masses volumiques de 1200 kg/m^3 .

Les résistances en traction sont en générale de l'ordre de 30 % de celles en compression. Quant aux retraits, ils sont voisins de 2 mm/m [12].

ii) Bétons caverneux

Ces bétons sont obtenus par un mélange de gros granulats ne contenant pas ou très peu de sable et sont liés par une faible quantité de ciment. La densité de ces bétons varie entre 1.6 et 1.8 et ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 50 kg/cm² [12].

iii) Bétons de granulats légers

Les granulats légers sont caractérisés par leurs porosités élevées. Certains de ces granulats légers se trouvent dans la nature alors que d'autres sont fabriqués à partir des matériaux naturels ou de produits industriels. Parmi les granulats naturels, on trouve les diatomées, la pierre ponce, les scories les cendres volcaniques et le tuf. Ces granulats sont tous d'origine volcanique sauf pour les diatomées. Et parmi les granulats artificiels, on peut citer l'argile expansée, le schiste et l'ardoise qui sont fabriqués à partir des matériaux naturels. Ils sont obtenus par chauffage adéquat des matières premières dans un four rotatif afin d'initier la fusion (température de 1000 à 1200 °C). Les bétons confectionnés avec ces granulats ont une masse volumique habituellement est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Bien que des valeurs aussi faibles que 800 kg/m³ aient été obtenues. Ces bétons ont en général une résistance plus élevée que celle des bétons confectionnés avec d'autres types de granulats légers. Les cendres volantes et le laitier de haut fourneau sont les principaux sous produit industriels utilisée pour fabriquer des granulats légers [13].

1.2.3. Propriété mécaniques des bétons légers

i) La masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la caractéristique principale du béton léger, en effet, pratiquement tout dépend d'elle, que ce soit les propriétés mécaniques, les propriétés thermiques ou certaines variations dimensionnelles. Le béton léger est caractérisé par sa masse volumique apparente qui dépend [14] :

- ✓ de la structure (Béton plein caverneux, semi caverneux, cellulaire),
- ✓ de la masse volumique des granulats,
- ✓ du dosage en ciment et de la quantité d'eau éventuellement absorbée par les granulats.

ii) Résistance à la compression

La résistance des bétons légers à la compression peut être comparée avec les bétons traditionnels, en choisissant des granulats légers spécifiques. Généralement dans les bétons traditionnels les granulats sont plus résistants que les mortiers et leurs ruptures se produisent par décollement des granulats. 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. 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 de l'eau, pour n'importe quel granulat particulier, la résistance augmente avec l'augmentation de la masse volumique. La figure 2.1 montre comment se répartissent les bétons légers quant à leur résistance en compression en fonction de leur densité [15].

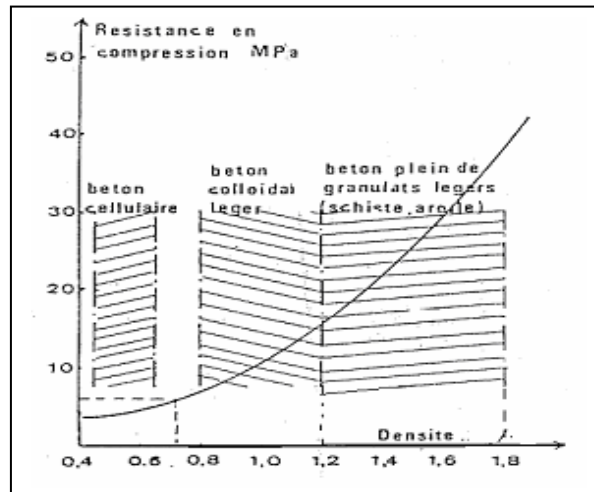


Figure 1.1 : La résistance à la compression des quelques bétons légers en fonction de la densité

iii) Résistance à la traction

Dans le cas des bétons traditionnels, la résistance à la traction selon ne BAEL est donnée par la formule (1.1) [16]:

$$F_t = 0,6 + 0,06 \cdot f_c \quad (1.1)$$

Avec f_c c'est la résistance à la compression (MPa).

Par contre, la résistance à la traction du béton léger est exprimée par la formule (1.2) :

$$F_t = 0.5 + 0.05 \cdot f_c \quad (1.2)$$

M.BONZEL donne une autre formule de calcul de la résistance à la traction de béton léger en fonction de la compression [13].

$$F_t = 0.23 f_c^{0.67} \quad (1.3)$$

iv) Retrait et fluage des bétons légers

Le retrait des bétons légers est plus important que les bétons traditionnels car l'eau absorbée par les granulats se trouve 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 les bétons confectionnés avec les granulats d'argile, de schiste et laitier expansé sont dans la gamme des plus faibles retraits [13]. Les bétons légers ont un module d'élasticité instantané plus faible que les bétons traditionnels et leurs déformations instantanées environ le double que celles des bétons traditionnels. Cependant leur déformation de fluage est du même ordre que leur déformation instantanée [12].

v) Perméabilité et l'absorption des bétons légers

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. De plus, la réserve d'eau contenue dans les granulats permet la poursuite de l'hydratation du ciment et la réduction de la perméabilité [13]. On peut estimer ces pores par l'essai de absorption, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, la méthode de Kelham est la plus utilisée pour déterminer l'absorption du béton léger. Pour déterminer la perméabilité, Kelham propose que l'écoulement de l'eau soit unidimensionnel. 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. [17].

L'absorption d'eau par immersion des bétons légers pendant 24 heures varie d'un granulat à un autre, elle est de 23 % pour les granulats de forte absorption et de 12 % pour les granulats de faible absorption [12].

1.2.4. 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 1m pour une différence de température de 1°C entre les deux faces). A titre exemple, la même isolation thermique est donnée à 20 % près par ; 10 cm de béton cellulaire, 20 cm de béton plein de granulats légers, 30 cm de béton caverneux et 60 cm de béton plein classique [12]. La conductivité thermique est donnée selon la masse volumique du béton léger, ce dernier est classé en cinq catégories, le tableau 1.1 nous donne la conductivité thermique en fonction de la classe du béton léger [18].

Tableau 1.1 : La conductivité thermique en fonction de la classe du béton léger

Classe du béton	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)	Conductivité thermique (W/m°C)
(I) Isolation thermique	800	-	0.3
(II) Isolation thermique	800 à 1200	>5	0.6
(III) Isolation thermique et/ou porteur	1000 à 1400	>10	0.8
(IV) Structure	1300 à 1800	>20	-
(V) Structure	1500 à 1800	>30	-

1.2.5. Les propriétés acoustiques des bétons légers

Les propriétés acoustiques sont intéressantes lorsque le béton est utilisé comme des 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 incident 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 nul ou diffus) [14].

1.2.6. Utilisation des bétons légers

L'utilisation des bétons légers est très répandue. Ils peuvent être utilisés pour la construction de structures résistantes (poutres, dalle, poteaux,...etc.), mais sont plus particulièrement employés pour la fabrication d'agglomérés, pour des bétons banchés non porteur ou faiblement chargés et pour des bétons isolants. Ces bétons peuvent être aussi utilisés comme forme de pente, en isolation de toiture, en réfection des planchers anciens. Plusieurs ouvrages importants ont été réalisés avec des bétons légers tels que des ponts en béton armé et en béton précontraint, des immeubles (2 tours de 60 étages) Chicago, immeubles de 30 à 50 étages à Melbourne et Sydney en Australie, l'aérodrome de Kennedy aux USA) [18].

1.3. Matériaux isolants

Dans les éléments de construction, trois modes d'échanges thermiques se produisent simultanément, la conductivité, la convection et le rayonnement. La propriété d'isolation thermique des matériaux de construction est définie par le coefficient de conductivité thermique λ (λ , W/m °c).

Tout matériau destiné pour isolation doit répondre à certaines conditions [19] :

- Il doit conserver dans le temps les caractéristiques qui ont déterminé son choix,
- Ces propriétés thermiques doivent lui permettre d'atténuer l'intensité d'un flux de chaleur,
- Ces propriétés mécaniques doivent lui permettre de résister à son propre poids ou résister lorsqu'il est soumis à des charges,
- Il doit avoir une faible perméabilité à la vapeur d'eau et une bonne résistance à l'humidité sinon il doit être protégé par des dispositions spécifiques,
- Son comportement aux mouvements différentiels doit lui permettre d'éviter toute altération de sa structure,
- Son comportement aux agents externes doit lui permettre d'éviter toute détérioration de sa structure.

Les matériaux isolants sont généralement regroupés suivant les matériaux dont ils sont issus. On distingue trois groupes suivants :

- Les matériaux isolants végétaux,
- Les matériaux isolants minéraux,
- Les matériaux isolants de synthèse.

1.3.1. La production des matériaux isolants en Algérie

L'Algérie produit une diversité de matériaux isolants destinés à l'isolation dans les bâtiments. A titre exemple, une usine de fabrication des éléments isolants est située à Bejaïa plus exactement à Beni Mançour. Elle fait partie du Groupe BATIMETAL, créée en 1997, contribue à la productions des panneaux sandwichs, des éléments d'habillage en couverture, bardage, faux plafond, tôle nervurée et diverses pièces d'étanchéité. La capacité de production de BATICOMPOS est donnée par le tableau 1.2 [19].

Tableau 1.2 : La capacité de production annuelle et journalière de BATICOMPOS

Type de panneau		Production annuelle	Production journalière
Panneau sandwich	LL35	288288 m ²	2184 m ²
	TL75	183040 m ²	2080 m ²
Tôle nervurée	TR35	437184 m ²	3976 m ²
	TR66	321024 m ²	2920 m ²
Faux plafonds	LSP	100800 m ²	458 m ²
Pièces-façonnées	PF-Galvanisé et prélaqué	400 t	≈ 1.82 t

La principale production de cette usine son les panneaux sandwichs, ces derniers peuvent être utilisés dans tous les types de constructions industrielles (usines entrepôts frigorifiques, salle omnisports, bungalows chambre froides centrales thermiques, ...etc.), d'isolation de façades extérieures et aménagements intérieurs de bâtiments commerciaux...etc. Ces panneaux sont constitués de deux parements en tôle, isolant de manière durable et étanche, un noyau de mousse polyuréthane, de portance élevée et d'une grande rigidité, et une grande résistance au feu [19].

1.3.2. Les matériaux isolants végétaux

Les isolants végétaux se caractérisent par leurs matériaux de base végétale, liège, anas de lin, paille et bois. Ils se présentent souvent sous forme de panneaux, ces derniers sont utilisés comme un support ou parements dans la formation des isolants. Parmi ses matériaux isolants végétaux existants, on cite les matériaux les plus répandus :

i) Panneaux en laine de bois

Les panneaux en laine de bois sont fabriqués à partir de fibres de bois, ces derniers d'abord humidifiés avec de l'eau dans laquelle on a ajouté du chlorure de calcium pour accélérer la prise du ciment [11]. Il y a plusieurs types de panneaux en laine de bois dont les principaux sont :

- Les panneaux standard qui sont principalement utilisés comme panneaux thermiques isolants de murs et de toitures,
- Les panneaux acoustiques qui sont utilisés comme absorbant acoustiques dans les plafonds,
- Les panneaux armés utilisés dans la construction des toitures

La densité des panneaux en laine de bois varie entre 250 et 560 kg/m³ et leurs conductivités thermiques varient entre 0.075 et 0.16 W/m°C pour les mêmes densités. Cependant, il faut noter que la conductivité thermique dépend de la densité, de la structure interne, de la teneur en eau et de la température. A titre d'exemple, la conductivité des panneaux standard pour une teneur en eau de 8 % est résumée dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 : La conductivité thermique des panneaux standard [20].

Epaisseurs des panneaux (mm)	Conductivité thermique (w/m.°c)
30	0.080
50	0.075
70	0.075
>100	0.075

La capacité d'absorption de l'humidité des panneaux en laine de bois est très importante. Ils sont souvent utilisés dans les locaux à haute concentration d'humidité et ils sont connus par leurs résistances au pourrissement. Le milieu basique engendré par le ciment contribue à la protection du bois. Les panneaux en laine de bois sont classés comme résistants à l'humidité [11].

Les qualités acoustiques des panneaux en laine de bois sont excellentes et sont souvent utilisés comme absorbantes acoustiques. Ces panneaux sont très résistants au feu et sont classés comme non inflammables. Ils résistent aussi aux attaques des termites (insectes). Le retrait de ces panneaux est de 3 mm/m pour une densité de 260 kg/m³ [11].

ii) Les panneaux à base de liège

a) Généralité

Le liège est un produit très ancien, déjà utilisé il y a 4500 ans par les Égyptiens sous la forme de flotteurs pour maintenir leurs filets de pêche en eau. Il provient du chêne liège dont on peut, à partir de l'âge de 30/40 ans, enlever l'écorce externe à intervalles réguliers (8 à 10 ans) sans que l'arbre ne meure. Il est composé à plus de 90% d'air hermétiquement enfermé dans des microcellules d'un diamètre de quelques microns. Ce matériau présente une bonne résistance à l'écrasement ; il est imputrescible, léger, naturellement résistant au feu et aux termites. C'est un excellent isolant, tant thermique que phonique [21].

Le liège est une matière spongieuse, élastique produit du développement de l'écorce d'un chêne que l'on rencontre sur presque tous les points de culture. Dans le bassin méditerranéen, le chêne-liège croit dans une région qui s'étend entre 34° et de 44° degré de latitude nord. La température moyenne réclamée pour la production d'un liège de bonne qualité est d'environ 14°.

b) Poudre de liège

D'une part la poudre de liège qui est obtenue à partir des débris de liège, ces derniers passent par plusieurs phases de fabrications. La matière recueillie passe au triage qui comprend le passage dans des tamis servant à écarter les pierres, sable et fibres, puis au trieur magnétique séparant les particules de fer. Les débris sont alors repris et introduits dans les moulins à disque ou à meule pour être réduit en poudre plus au moins fine. Ces poudres de liège peuvent être appliquées dans les agglomérés [22].

c) Liège aggloméré expansé pur

La fabrication de liège aggloméré expansé pur est constitué de granulés de liège calibrés et débarrassés d'impureté, soumis à la fois à la chaleur de la vapeur sèche, portée à 180°C ou 200°C, et une compression atteignant 10 à 12 kg/cm². Ce procédé provoque l'exsudation de la subérine des grains, qui constitue l'agent liant naturel. Il n'y a pas d'addition d'agglomérant chimique particulier, comme dans le cas des autres agglomérés de liège. Le liège aggloméré expansé pur se présente sous forme des panneaux de 1x 0.5 m de 20 à 30 mm d'épaisseur ; en carreaux de 0.5 x 0.5 m à partir de 15 mm d'épaisseur en

briques de 6 x11x 22 cm. Les résistances à la compression et la flexion des agglomérés de liège pur sont respectivement de 0.3 MPa et 0.16 MPa [23].

Le liège aggloméré présente plusieurs points positifs qui sont [22]:

- Le coefficient de conductivité thermique des agglomérés expansés est compris entre 0.035 et 0.037 correspondra à une bonne résistance à l'écrasement.
- Les agglomérés de liège possèdent une faible densité, le poids du mètre cube d'aggloméré expansé pur varie généralement de 160 à 170 kg suivant la quantité et la qualité du granulé de liège employé à sa fabrication.
- Les agglomérés expansés purs amortissent les sons, les bruits, les vibrations, les trépidations et les chocs. Ils constituent un excellent matériau pour l'isolation phonique.
- Le liège torréfié est beaucoup moins inflammable que le liège cru, surtout lorsque celui-ci est aggloméré avec des produits combustibles. En général les risques d'incendie sont écartés si le liège est posé sous enduit.
- L'humidité et vapeur d'eau sont sans effet sur les agglomérés purs.
- Les agglomérés expansés purs, sont pratiquement inodores et ils sont imputrescibles même en milieux humides, parce que sont aseptisés par la combustion pyrogène pendant la fabrication.
- Les agglomérés expansés purs ne sont pas rétractiles, ils n'occasionnent donc point la craquelure des enduits et les fissures si préjudiciables à l'isolation.

Les principales applications des agglomérés de liège sont [22]:

- Les plafonds légers, isolations, insonores et calorifuge sous toiture, voûtains,
- Les revêtements isolants de combles, de murs froides ou humides, calorifugeage contre la chaleur, de paroi quelconques,
- Les murs et cloisons, isothermes, insonores,
- Les semelles sous plancher, contre les bruits et les trépidations.

d) La récolte de liège en Algérie

De nos jours, le chêne-liège se trouve en production dans la zone méditerranéenne occidentale, un peu dans les pays du Maghreb, dans le nord de l'Italie, le sud de la France et de l'Espagne, mais surtout au Portugal, sa terre de prédilection. C'est un arbre qui appartient à la flore méditerranéenne depuis l'ère tertiaire, ce qui lui donne une soixantaine de millions d'années d'existence.

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 nous plaçaient en troisième position dans le monde après le Portugal et l'Espagne, les autres pays du Maghreb venant bien loin. La récolte de liège de l'entreprise publique et des entreprises privées est estimée durant l'année 2004 entre 200 000 et 250 000 q [10].

e) Transformation de liège

Le liège récolté à travers les neuf wilayas du Nord-Est et Nord-Ouest du pays est transformé, commercialisé sur le marché national et 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 Alger, Bejaia, Jijel, Skikda et Annaba. La capacité de transformation de cette entreprise (GLA) est récapitulée dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 : La capacité de transformation de l'entreprise publique GLA [24].

	Nombre d'usines	Effectifs	Capacités / an
Liège	5	935	
Bouchons naturels			200000000 U
Bouchons Agglomérés			60000000 U
Bouchons composés			10000000 U
Bouchons noirs			60000 m ³
Agglomérés blancs			8500 m ³
Liège « caoutchouc »			650 m ³
Etanchéité industrielle	2		
Polystyrène			55000 m ³
Voile de verre			2000000 m ²
Carton feutre			2000000 m ²
Pax aluminium			1000000 m
Colle néoprène			600000 L
Capsules métalliques			80000000 U
Joints en liège caoutchouc			200 m ³
Semelles de propreté			200 m ³

Ces produits sont au service du bâtiment et de l'industrie, en outre le revêtement des murs, sols et plafonds, l'étanchéité et l'isolation thermique et phonique.

f) Les déchets de liège

Les sept unités industrielles de fabrication des éléments isolants et des autres éléments à base du liège (Bouchons naturels, Bouchons agglomérés, Agglomérés noirs, Agglomérés blanc...etc.), implantées à travers sept wilayas ainsi que les entreprises privées dégagent à différents stades de production environ 7500 t/an de déchets du liège [11]. La valorisation de ces déchets de liège dans le domaine de la construction s'avère nécessaire d'un côté pour préserver la nature, et de l'autre côté économiser de l'énergie, si ces déchets sont utilisés comme des granulats pour confectionner un matériau composite isolant.

iii) panneaux d'anas de lin

Les panneaux d'anas de lin sont constitués des parties ligneuses du lin (anas) agglomérés au moyen de résines synthétiques thermodurcissables, le plus souvent du type urée-formol. Les panneaux d'anas de lin sont conformés sur chaîne et pressés à chaud. Ces derniers nécessitent un traitement anticryptogamique en milieu humide pour résister aux agents biologiques et possèdent une bonne résistance aux solvants. Ces panneaux sont appliqués principalement pour l'isolation thermique, contre cloison, support de couverture...etc. Les principales caractéristiques des panneaux d'anas de lin sont représentés dans le tableau 1.5 [23].

Tableau 1.5: Les caractéristiques principales des panneaux d'anas de lin

Isolant végétant	qualités	Panneau d'anas de lin	
		A	B
Masse volumique	kg/m ³	400	500
-Conductivité thermique λ (DTU)	W/m.°C	0.085	0.10
-Résistance à la traction	bar	1.10	2.00
-Résistance à la flexion	bar	56	95
-La variation dimensionnelle entre 40% HR et 85HR	mm/m	1.5±0.3	1.8±0.2
-Gonflement après 24h ; eau 20°C	%	10	12
-Module d'élasticité		10000	17000
-Taux d'humidité	%	6 à10	6 à10

iv) Panneaux de paille comprimée

Les panneaux de paille comprimée sont fabriqués à partir de blé. 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 tapé sortant de la machine est découpé aux longueurs standards ou est traité à la fabrication contre les moisissures et les insectes. Ces panneaux sont utilisés comme cloison de doublage et support d'étanchéité. Les dimensions de ces panneaux sont de 1.2 m de largeur, de 50 mm d'épaisseur et 2 à 3 m de longueur. La conductivité thermique de ces panneaux est entre 0.10 et 0.12 W/m°C [23].

1.3.3. Les matériaux isolants minéraux

On entend par isolant minéraux les matériaux dont l'origine est totalement ou partiellement minérale. Parmi les matériaux isolants minéraux, les fibres de verre, fibres de roche, perlite expansée, vermiculite expansée et la terre cuite.

i) Granulats de verre expansé

Les granulats de verre expansé sont des particules de verre multicellulaires à pores fermés de forme sphérique. Ils sont fabriqués à partir d'une matière première à base de verre [25]. Les masses volumiques apparentes des granulats en verre expansé dépendent de la classe granulaire. Elle est de 160, 140 et 130 kg/m³ pour les classes granulats 3/8, 8/16 et 16/25 respectivement. L'absorption d'eau des granulats après 24 h d'immersion est de l'ordre de 6% en volume et la conductivité thermique est égale à 0.052 (W/m°C), pour le matériau utilisé en vrac [15].

Le béton de billes de verre expansé existe sous différentes formes de structures suivant le dosage en ciment préconisé.

a) Les bétons cavernaux et semi cavernaux

Les bétons cavernaux atteignent des densités de l'ordre de 380 kg/m³ avec des dosages en ciment qui varient de 100 à 150 kg/m³. Les caractéristiques principales de ces bétons sont regroupées dans le tableau 1.6.

Tableau 1.6 : Les caractéristiques des bétons cavernaux et semi cavernaux [15].

	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	λ sec moyen (W/m°C)
Béton cavernaux	280/310	0.5 à 1.0	0.072
Béton cavernaux	350/380	1.0 à 1.5	0.090
Béton semi cavernaux	450/480	2.0 à 3.0	0.095

b) Les bétons pleins

La masse volumique apparente de ces bétons varie entre 650 à 1200 kg/m³ selon les classe granulométriques utilisées. Les résistances à la compression peuvent atteindre 8 MPa et leurs coefficients de conductivité thermique varient de 0.17 à 0.35 W/m. °C.

c) Les éléments manufacturés

Des entrevous adaptés aux systèmes à base des poutrelles sont fabriquées actuellement par des entreprises spécialisées. Ce béton a une masse volumique apparente variant entre 720 et 780 kg/m³. Le coefficient de conductivité thermique des maçonneries de blocs creux varie entre 1.1 et 0.6 pour des épaisseurs comprise entre 15 et 35 cm.

Les bétons cavernaux et semi cavernaux sont employés pour les formes de pente des toitures terrasses, et la fabrication de chapes isolantes, des cloisons internes et des blocs. Les bétons pleins peuvent servir pour des panneaux de façades pour des éléments préfabriqués, des murs banchés. Les granulats peuvent s'utiliser en vrac pour l'isolation thermique des murs vieux, des combles et pour certains calorifugeages industriels. Ces granulats sont incorporables dans d'autres matériaux, en particulier dans certains éléments préfabriqués en plâtre [15].

ii) La perlite expansée

La perlite est une roche volcanique de la famille des rhyolites perlitiques, broyée, elle ressemble à du sable [13]. Les granulats de perlite se composent essentiellement de la silice (SiO₂) et l'alumine (Al₂O₃). Sa composition n'est pas fixe, la silice varie de 70 à 75% [15].

L'expansion des grains de perlite se réalise sous l'effet d'un traitement thermique et sans apport de corps étrangers. Des cellules fermées se constituent à l'intérieur de ces grains, ces cellules sont dures et de très faible épaisseur. L'expansion industrielle de la perlite est réalisée dans des fours spéciaux, fixes ou rotatifs, dont la puissance de chauffe permet d'obtenir des températures de l'ordre de 1000°C.

La perlite est insoluble dans l'eau et inerte vis-à-vis de tous les solvants organiques. Elle est également insensible aux agents atmosphériques. La perlite n'offre aucun aliment aux insectes ni aux rongeurs. La perlite est utilisée comme granulats dans la composition de béton et d'enduit, destinés à l'isolation des parois verticales ou horizontales, et sous forme de panneau aggloméré à l'aide de liant bitumineux, principalement pour l'isolation des terrasses. Le béton de perlite est fabriqué avec des granulats de perlite expansée, du ciment et, éventuellement, du sable de rivière en fonction de la résistance à la compression désirée. Ce béton présente une excellente résistance aux agents chimiques, incombustible et sert à réaliser des enduits de protection contre l'incendie [23]. La résistance à la compression en fonction de la masse volumique apparente de béton de perlite conservé dans une ambiance de 20°C et 65% d'humidité relative est donnée par la figure 1.2 [14].

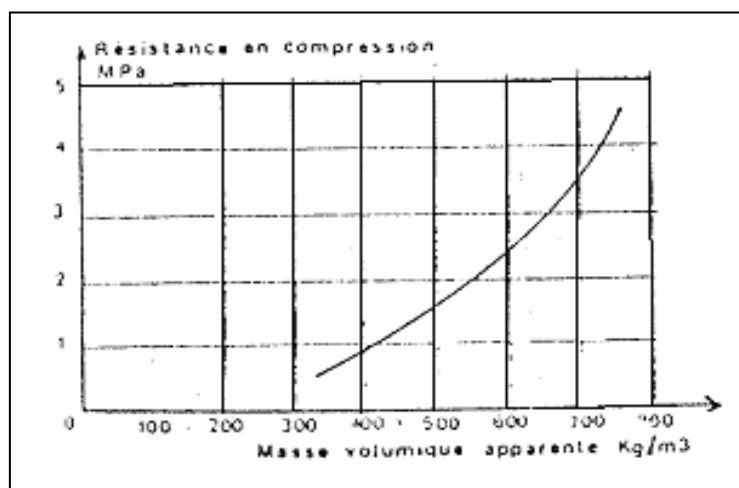


Figure 1.2. Résistance à la compression de béton de perlite en fonction de la masse

iii) La vermiculite expansée

La vermiculite est le nom minéralogique donné à un groupe de minéraux lamellaires hydratés que l'on trouve dans les régions granitique. Chimiquement, les

granulats de vermiculite sont regroupés dans la famille des aluminosilicates de fer et de magnésium comme les micas [15].

La fabrication de la vermiculite expansée se fait comme suit : Sous l'action de la chaleur et sans apport de corps étrangers, les molécules d'eau contenues dans les paillettes de vermiculite se transforment en vapeur, dans l'espace inter lamellaires, entraînant une poussée sur les feuillettes et écartant les uns des autres ; c'est le phénomène de l'exfoliation. L'expansion industrielle est obtenue à l'intérieur des fours spéciaux, par le passage relativement rapide des pailles dans un flux d'air chauffé à 850°C environ. L'opération doit être soigneusement contrôlée pour assurer l'exfoliation maximale des grains, sans les briser [23].

La vermiculite est insoluble dans l'eau et inerte vis-à-vis de tous les solvants organiques, et elle est insensible aux agents atmosphériques. Elle n'offre aucun aliment aux insectes ni aux rongeurs. La vermiculite est utilisée comme granulats de bétons légers isolants ou liée au bitume pour l'isolation thermique et acoustique de parois horizontales. La qualité sur expansée est destinée pour l'isolation des planchers de comble. La qualité hydrofugée est destinée à l'isolation des murs, par pulsion entre deux murs.

Le béton de vermiculite est fabriqué à partir de ciment et de granulats de vermiculite. Il présente une excellente résistance aux agents chimiques, incombustible et souvent utilisé comme enduit de protection contre le feu [23]. La résistance de ce béton à 28 jours est entre 0.3 et 3 MPa pour une masse volumique sèche varié entre 300 et 700 kg/m³. Le retrait de séchage du béton vermiculite est très important, il est de 3000 µm/m [18].

iv) Matériaux de terre cuite

Les matériaux de terre cuite sont utilisés depuis plusieurs siècles dans le bâtiment. Ils de sont adapté à l'évolution de la construction, et à ses impératifs tant dans le domaine traditionnel que dans celui dit industrialisé. Ils sont fabriqués à partir d'argiles communes devenant souvent rouges à la cuisson (sauf les calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose au jaune et au blanc). Les températures de cuisson les plus usuelles varient de 900 à 1050°C. La terre cuite peut être utilisée dans toute la partie de la construction, elle est utilisée essentiellement comme des briques, tuiles, des éléments pour planchers et des éléments de décorations [26].

a) Briques creuses ou perforées isolantes (Brique « G »)

Les produits de terre cuite utilisés dans la confection des murs comportent généralement un nombre plus au moins important des rangées alvéolés ou perforations. Ce sont ces alvéolés ou ces perforations qui confèrent à la brique ces propriétés d'isolation thermiques. La résistance thermique de ce type de briques est liée au nombre de files d'air rencontrées par le flux thermique. La conductivité thermique des briques « G » est inférieure à $0.3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ pour les masse volumique entre 550 et 800 kg/m^3 [26].

b) Mousse d'argile

Il s'agit d'un matériau céramique de terre cuite allégée, obtenu par cuisson d'une pâte argileuse préparée par dispersion, en présence d'un agent moussant, et une ou plusieurs argiles. La mousse d'argile se présente sous forme de plaques pouvant être émaillées, sa masse volumique varie de 500 à 1000 kg/m^3 , la conductivité thermique λ est de $0.18 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{K}$ pour une masse volumique de 900 kg/m^3 . Grâce à ses excellentes qualités d'absorption acoustique, la mousse d'argile trouve des applications dans les murs antibruit (autoroutes ou ferroviaires) et comme revêtements de salles de spectacles, piscines et gymnases [26].

1.3.3. Les matériaux isolants de synthèse

Les isolants de synthèse, le plus souvent des produits alvéolaires rigides (ou mousse), appelés couramment matière plastique isolants, ils sont les fruits de la chimie moderne.

i) Béton de mousse

Les bétons mousses sont obtenus en introduisant des bulles d'air par l'intermédiaire d'une mousse qui est elle-même produite par agitation d'un agent moussant. On distingue deux types de béton mousse ; les bétons mousse classique, et les bétons mousses associés à des granulats légers.

Le béton mousse se caractérise par son isolation thermique et acoustique ainsi que sa bonne résistance au feu et au gel. La densité de ce béton varie entre 200 à 1800 kg/m^3 en fonction des domaines d'utilisation. Il peut être produit sur le site et dans des usines et cela selon la nature de l'élément à concevoir (séparatif, résistant). Les bulles sont introduites soit par addition d'un entraîneur d'air au cours du malaxage soit par brassage d'une

mousse aqueuse fabriquée séparément. Les agents moussants sont classés en deux grandes catégories [27]:

- Les agents moussants protéiques qui sont le plus souvent des produits albumineux provenant de déchets de boucherie (cornes de bœuf ou sang par exemple).
- Les agents moussants synthétiques qui sont dans la majorité des cas des détergents (Alkylaryl sulfonate).

La résistance à la compression dépend beaucoup de la nature de l'agent moussant. Il faut également noter que les résistances des mortiers de mousse protéique, à égalité de masse volumique apparente à l'état sec, sont beaucoup plus élevées que celles des mortiers de mousse synthétique. Ces derniers peuvent être améliorés en jouant sur la composition du sable et la finesse du ciment. Comme pour tous les bétons légers, la résistance à la compression dépend du mortier mais aussi de la résistance des grains. Les bétons mousses avec granulats légers sont plus résistants que les bétons mousse seuls à masse volumique égale [27].

La résistance à la traction est généralement de l'ordre de 10 à 15 % environ de la résistance à la compression. La formule de M.BONZEL [R_t (MPa) = $0.23 (R_c^2)^{1/3}$] semble être parfaitement applicable pour les bétons de granulats légers [27].

L'un des inconvénients importants des bétons mousse est l'importance de leur retrait qui peut atteindre plusieurs millimètres par mètre. Il faut noter que comme pour tous les bétons légers, le retrait s'effectue très rapidement dans le temps, il est souvent presque terminé à 7 jours. Le fait d'ajouter des granulats légers dans du béton mousse réduit de façon notable le retrait. Les mousses fabriqués avec des agents moussants protéiques semblent présenter des retraits nettement inférieurs à ceux produits avec des agents entraîneurs d'air [27].

Les mortiers mousse possèdent une porosité élevée ce qui favorise l'absorption l'eau d'une manière rapide. Cependant, ils présentent la faculté de reperdre cette eau aussi très rapide. Pour ce qui est de l'absorption capillaire, celle-ci est très variable, selon les différents types du béton cellulaire. Cette différence est due au fait que la structure poreuse varie en fonction des agents moussants et du mode de fabrication. L'application des bétons mousses est en fonction de leur masse volumique apparente [11].

a) Densité entre 200 et 800 kg/m³

La conductivité thermique varie entre 0.08 et 0.3 W/ m°C selon la masse volumique apparente. Ils sont utilisés pour :

- Isolation thermique de remplissage des murs et des planchers
- Remplissage et isolation de murs préfabriqués
- Formes de pentes et formes sur terre pleine
- Blocs pleins manufacturés (résistance du béton soit > à 2.5 MPa).
- Isolation des toitures inclinées par des éléments préfabriqués

b) Densité comprise entre 800 et 1800 kg/m³

La conductivité thermique utile de ces bétons varie entre 0.3 et 0.8 W/m°C. Les bétons mousses ont une résistance à la compression supérieure à 5 MPa et sont utilisés pour :

- Eléments de construction préfabriqués
- Blocs manufacturés pleins ou creux
- Béton non armé (les armatures nécessitent une protection spéciale)
- Murs banchés faiblement sollicités.

ii) Les polyuréthanes

Les polyuréthanes sont obtenus par la réaction de polyaddition de polyisocyanates avec les polyols, cette réaction est exothermique. L'origine des matières de bases de la chimie des polyuréthanes est le pétrole. Les isocyanates les plus utilisés industriellement ont une structure aromatique, alors que polyols ont un squelette aliphatique [28].

Les types de polyuréthanes sont, soit du type élastomère ou cellulaire, les types d'élastomères de polyuréthane sont :

a) Polyuréthanes malaxables

Ce sont des polymères linéaires (polyéthers ou polyesters- polyuréthanes) réticulés par des peroxydes ou du soufre. La mise en œuvre de ces polyuréthanes est analogue à celle des caoutchoucs traditionnels par mélangeurs classiques et transformation par : Compression, Injection et transport.

b) Polyuréthanes thermoplastiques

Composés linéaires ou partiellement ramifiés, ils sont obtenus à partir de polyéthers-dioles. Il est possible de les charger (graphite, sulfure de molybdène) pour améliorer certaines de leurs propriétés. La mise en œuvre se fait sur les machines à vis classiques de transformation des thermoplastiques.

c) Polyuréthanes coulables

On distingue deux techniques :

1. Système « One shot » :

On fait agir directement le polyester-polyol ou le polyéther polyol avec un diisocyanate. La mise en œuvre se fait par coulé à pression atmosphérique dans des préchauffés (environ 100°C)

2. Système « pré polymère »

Les fonctions isocyanates sont présentes dans le polyéther ou le polyester de part. Ce pré polymère peut être stocké à une température ambiante. Le pré polymère est mélangé avec un polyol ou une prolamine est injectée dans un moule généralement préchauffé. La mise en œuvre la plus industrielle est celle du moulage par injection-réaction :

- Soit sans renfort : technique RIM,
- Soit avec renfort (fibres de verre) : technique RRIM.

Les types de polyuréthanes cellulaires sont [28] : les mousses souples, mousse rigide et les mousses semi rigide.

Les mousses souples sont obtenues à partir de polyester ou de polyéthers, d'agents d'expansion. Leur masse volumique varie de 10 à 60 kg/m³. Leurs mise en œuvre se fait soit en bloc soit moulées.

Les mousses rigides sont obtenues à partir de polyéthers et leurs cellules sont en majorité fermée. Leur masse volumique varie de 10 à 800 kg/m³. Comme elles présentent d'excellentes caractéristiques d'isolation thermique dans une large plage de température (-30, +70°C). La mise en oeuvre des mousses rigides se fait comme suit : soit par coulé, par injection réaction, par projection au pistolet soit par coulée en blocs.

Les mousses semi rigides sont obtenues à partir d'un mélange de polyols à chaînes plus moins longues. La mise en œuvre se fait par injection réaction (RIM), ou par coulée directe autour de l'objet à isoler.

L'utilisation du polyuréthane est très large, il peut être utilisé pour isolation des toitures-terrasses (béton ayant une pente inférieure à 5%). Leur bonne résistance à la compression permet de les utilisés en isolation de plancher sous une chape béton de finition ou sous plancher bois. Ils ne sont jamais posés apparent, mais derrière des constituants de la construction [23].

Le béton à base des mousses de polyuréthane a une résistance faible au feu. Pour améliorer sa résistance au feu, on incorpore des granulats tels que des nodules d'argiles expansées, de verre expansée ou de perlite expansée. Cette incorporation améliore l'isolation acoustique de ces mousses ainsi que leurs caractéristiques mécaniques.

iii) Polystyrène expansé

Le polystyrène est connu depuis 1930, c'est l'une des plus anciennes résines thermoplastiques de synthèse, il est dérivé du benzène, provenant de la distillation de la houille ou du pétrole. Le polystyrène est une mousse plastique alvéolaire, naturellement blanche, le polystyrène expansé peut être fabriqué suivant quatre procédés [23] ; par moulage en bloc, par moulage en continu et stabilisation par pression, par thermo compression en continu par voie sèche et par extrusion. Toutes ces formes présentent des caractéristiques communes, le polystyrène expansé ne présente aucune réaction chimique au contact des matériaux de construction traditionnels tels que le ciment, la chaux, le plâtre, ou en contact des mélanges issus de ces liants.

Le polystyrène expansé est combustible, il commence à se ramollir et se déformer au delà de 95 °C. La principale application du polystyrène expansé est à l'isolation thermique, il répond à tous les besoins d'isolation des bâtiments [24]. Le coefficient de conductivité thermique du polystyrène expansé est entre 0.038 et 0.046 W/m°C selon la masse volumique [5].

La résistance à la compression du béton polystyrène expansé est donnée par le tableau 1.7.

Tableau 1.7 : La résistance à la compression en fonction de la masse volumique [15].

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)
300	0.5
600	2.0
800	3.5
1000	5.5

1.4. Conclusion

D'après cette étude on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le béton léger a une masse inférieure à celle du béton ordinaire
- La résistance à la traction et la compression dépend des granulats utilisés
- Le retrait et le gonflement de ces bétons sont plus importants
- Le béton léger se caractérise par son excellente isolation thermique
- Les matériaux isolants sont classés selon leur origine
- Les matériaux isolants ne sont pas toujours utilisés seul, ils sont souvent alliés avec d'autres matériaux qui leurs apportent la résistance mécanique et la résistance au feu.

CHAPITRE 2

MATERIAUX COMPOSITES ISOLANTS A BASE DES DECHETS VEGETAUX

2.1. Introduction

Le béton de bois a été au centre d'intérêt croissant au cours de ces dernières années. En effet, plusieurs chercheurs ont axé leurs travaux sur ces matériaux dans le but d'améliorer le confort thermique en utilisant des produits végétaux disponible localement.

Une grande partie de l'Algérie et des pays Arabes se situés dans les régions sahariennes. Ces régions se caractérisent par une température élevée durant plusieurs mois. Par conséquent, la consommation de l'énergie pour la climatisation des habitations est énorme. A titre exemple, la consommation de l'énergie dans les habitations en Arabie Saoudite est d'environ 47 % de la consommation totale et d'environ 78 % si toutes les constructions sont incluses [29]. De ce fait, il devient impératif de développer des matériaux isolants à base de matériaux locaux ou de déchets disponibles localement. Des expériences ont été menées pour développer des matériaux composites isolants à base de déchets d'agriculture tels que les tiges de maïs et de coton [30], et les tiges de roseau ont été utilisées dans la confection des plaques isolantes [31].

Dans ce chapitre, un résumé de quelques travaux de recherche sur les matériaux composite isolants à base des déchets végétaux comme les granulats de bois, la noix de coco, les copeaux de sapin, le durian, les fibres de cellulose et les fibres de palmier dattier est donné.

2.2. Utilisation des granulats de bois

Les granulats sont utilisés depuis plus de 40 ans pour réaliser des bétons particulièrement intéressants du fait de leur faible poids et leur résistance.

Les végétaux sont utilisés comme un renfort dans le matériau, ils sont incorporés sous différentes formes ; sous forme des fibres pour réaliser des matériaux composites, sous forme des granulats pour les bétons de bois et sous forme d'armature comme le bambou et le roseau.

Après la sélection du bois, une déchiqueteuse à couteaux est utilisée pour obtenir des particules grossières. Ces particules subissent ensuite un choc thermique important de 400 à 800 °C de façon à en extirper le maximum d'éléments volatils. Ainsi, la manière vidée de son eau est réduite à son élément fibreux. Après le traitement thermique intervient le traitement chimique qui correspond à une minéralisation à cœur des particules qui pétrifie le bois ; le chlorure de calcium et le silicate de soude sont introduits successivement. Après ce traitement le bois devient imputrescible en milieu alcalin [32].

2.3. Développement des blocs à base des déchets de noix de coco

Une étude réalisée en Thaïlande a montré la possibilité de développer des blocs qui ont une bonne conductivité thermique en utilisant des fibres de noix de coco. Les blocs de 0.125 x 0.25 x 0.1 m à base de ciment portland ordinaire type I mélangé un sol local, sable et l'eau avec du sol-ciment-sable-fibres ont été fabriqués. Les figures 2.1, 2.2 et 2.3 représentent respectivement l'évolution de la masse volumique, de la résistance à la compression et de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de fibres [33]. L'augmentation de la quantité de fibre de noix de coco diminue le poids et la densité des spécimens. La conductivité thermique diminue quand la quantité de fibres augmente. L'utilisation de la fibre de noix de coco dans le mélange contribue à la réduction de la conductivité thermique et la diminution du poids des blocs. Le rapport optimum de volume de sol-ciment-sable et de poids de fibre est de 5.75-1.25-2 et 0.8 kg de fibre de noix de coco. Les valeurs moyennes des propriétés obtenues des blocs sont comme suit : la conductivité thermique est de 0.6510 W/m. °K, la résistance à la compression est de 39.55 kg/cm², le poids est de 4.85 kg et la densité est de 1587 kg/m³ [33].

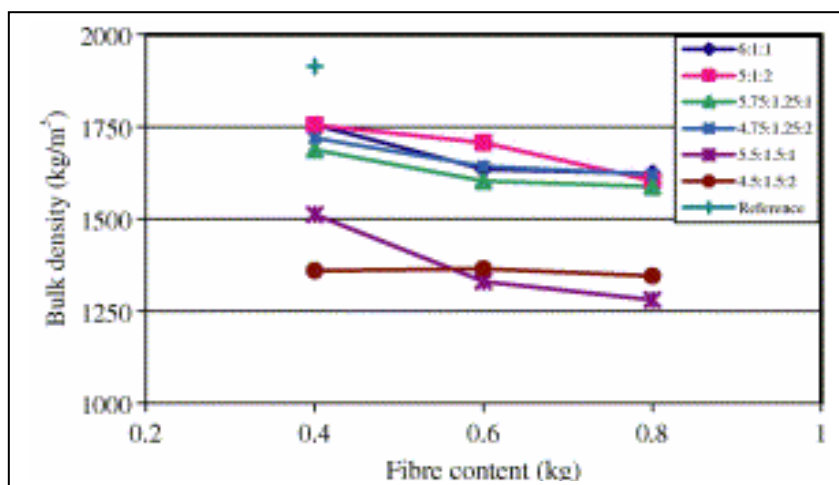


Figure 2.1: Evolution de la densité en fonction du pourcentage de fibres pour les différents blocs

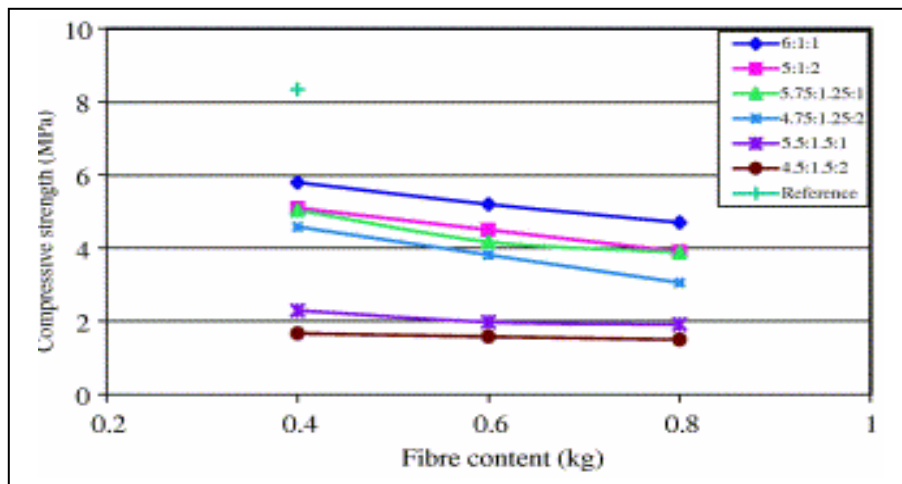


Figure 2.2 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fibres pour les différents blocs

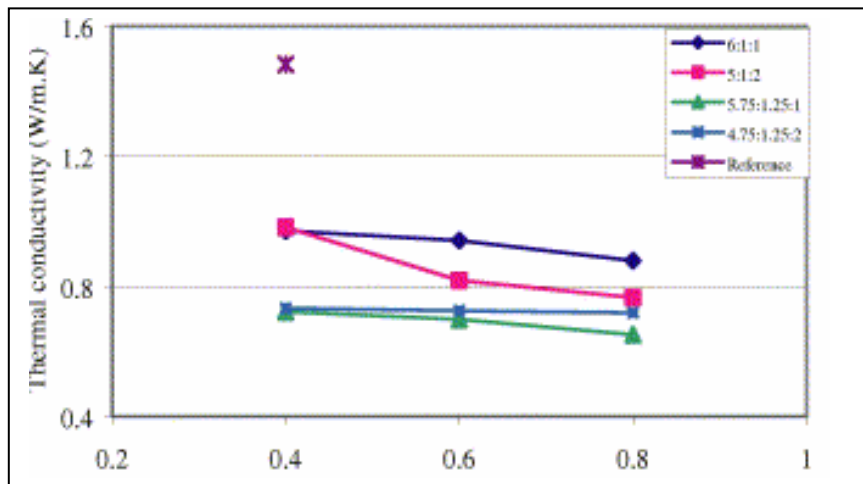


Figure 2.3 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de fibres pour les différents blocs

2.4. Béton léger à base peaux de fruits

Des essais préliminaires ont été effectués sur des peaux de fruits pour améliorer la conductivité thermique et la densité des blocs de ciment. Il a été constaté que le durian et la noix de coco sont les plus intéressants, car ils ont la plus basse conductivité thermique et de densité [34].

Dix-huit spécimens de fibres de déchets de noix de coco et douze spécimens de durian ont été préparés avec différentes longueurs de fibres. Deux dimensions de spécimens sont fabriqués $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ pour la compression et $10 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ pour les

autres tests. Les trois matériaux ciment, sable et les fibres sont malaxés et l'eau additionnée par suite. Notons que l'ajout des fibres est en fonction de la masse du ciment. Les éprouvettes destinées pour la mesure des propriétés thermiques sont conservées dans une température ambiante sans les immerger dans l'eau. Par contre, les éprouvettes destinées pour les mesures des propriétés mécaniques sont immergées dans l'eau pendant 10 jours.

La variation de la conductivité thermique pour les spécimens composés de déchets de noix de coco et de durian et avec les différents pourcentages de fibres et pour les différentes longueurs de fibres est représentée sur les figures 2.4 et 2.5. La conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la quantité des fibres et elle est dans la gamme des bétons légers (0.3 et 0.6 W/m^{°K}). En outre, plus le rapport des vides augmente, plus les échantillons deviennent légers (densité 900 à 1400 kg/m³) et la conductivité thermique diminue. Les échantillons à base de déchets de noix de coco donnent une conductivité thermique de 0.2543 W/m.°K, une résistance à la compression de 2.4 MPa et une densité de 958 kg/m³. La conductivité thermique de spécimens à base de durian est de 0.3506 W/m. °K, la résistance à la compression est d'environ 3.3 MPa et la densité des blocs est de 1456 kg/m³. La résistance des éprouvettes à la compression est proportionnelle à la longueur des fibres. En effet, lorsque la longueur des fibres augmente, la résistance à la compression augmente.

La taille de sable a une influence sur la conductivité thermique, ce dernier peut s'insérer dans la matrice entre les fibres, ces fibres sont alignées pour être éloignée de l'un à l'autre ce qui crée des vides dans la matrice. Par conséquent, la densité et la conductivité thermique des spécimens sont diminuées. L'augmentation de la taille du sable diminue la résistance à la compression.

Le rapport optimum des fibres de déchets de noix de coco est de 20 % de poids du ciment, tandis que ceux des fibres de durian sont 10 % de poids du ciment.

En comparaison au mortier témoin (sans fibres), tableau 2.1, la conductivité thermique du matériau à base de déchets de noix de coco et durian est inférieure d'environ 85 % et 79 %, respectivement. La résistance à la compression est aussi inférieure à celle du mortier témoin, mais elle reste supérieure à 2 MPa et par conséquent peut être bonne pour la fabrication des blocs en maçonnerie non porteurs [34].

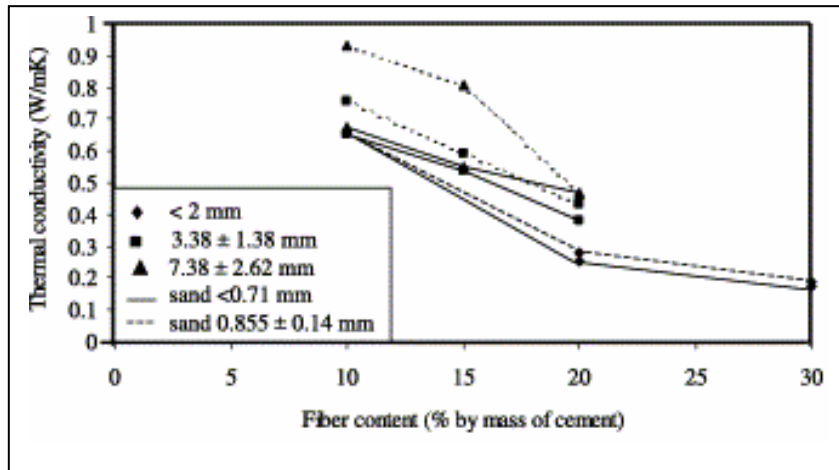


Figure 2.4 : Effet du pourcentage de fibres de noix de coco sur la conductivité thermique des composites pour les différentes fibres et la taille du sable

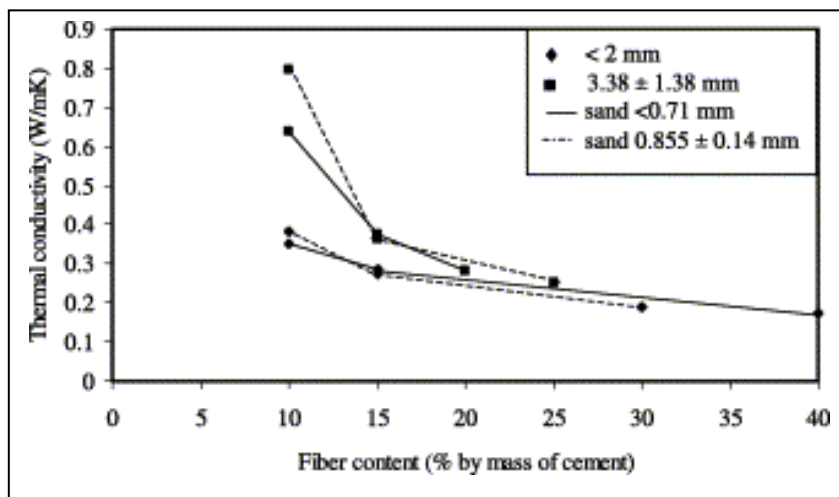


Figure 2.5 : Effet du pourcentage de fibres de durian sur la conductivité thermique des composites pour différentes longueurs de fibre et tailles du sable.

Tableau 2.1 : Comparaison entre le nouveau matériau et le mortier

Propriétés	Mortier Ciment:2.75sable: eau (E/C= 0.6)	Fibres de noix de coco (CO2)	Fibres de durian (DO1)
Conductivité thermique (W/m °K)	1.6452	0.2543	0.3506
Résistance à la compression (MPa)	22.0 ^a	2.46 ^a	3.29 ^b
Masse volumique (kg/m ³)	2000	959	1456

(a) immergé dans l'eau pendant 10 jours

(b) immergé dans l'eau pendant 10 jours et 13 à l'air

2.5. Utilisation des fibres de surface de palmier dattier

Quatre types de fibres de palmier ont été utilisés dans cette étude. Le tableau 2.2 résume les caractéristiques de ces fibres.

Tableau 2.2 : Principales propriétés physiques des quatre types de fibres (Dokar, Elgars, Deglette Nour et Degla –Bida) [35].

propriété	Maximum- minimum	Moyenne –CV (%)
Diamètre (mm)	0.10-1.00	0.45 (54.43)
Densité absolue (kg/m ³)	1300-1450	1383.33 (5.52)
Densité apparente (kg/m ³)	512.21-1088.81	900 (17.64)
Teneur en eau naturelle (%)	9.50-10.00	10 (5.00)

() : Coefficient de variation

Le taux absorption des fibres est élevé et il est estimé à environ 132.5 % en poids.

Les quatre types de fibres sont calcinés dans un four à 400°C. Après calcination ces fibres contiennent 77 % de matière organique et 23 % de matière minérale. Les tableaux 2.3 et 2.4 résume les principaux constituants organiques des fibres de Dokar et les résultats de analyse minéralogique de la poudre de fibres de Dokar.

Tableau 2.3 : Les constituants organiques des fibres de Dokar [35].

Matière	endre	cellulose	hémicellulose	lignite
Proportion (%)	1.2 ± 0.3	43 ± 2	8 ± 2	35 ± 2

On remarque que l'élément essentiel est la cellulose dont la présence augmente d'une manière significative la résistance des éléments composites.

Tableau 2.4 : Analyse minéralogique de la poudre de fibres de Dokar [35].

Elément	S _i O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	M _n O	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ti ₂ O ₂	P ₂ O ₅	PF	total
%	48.04	6.12	2.51	0.05	1.88	14.21	1.81	2.8	0.42	0.45	18.08	99.37

Pour fabriquer des mortiers et des bétons, des fibres de palmier ont été incorporés en volume. La cure des éprouvettes a été réalisée dans différents environnements. Il a été constaté que la cure mixtes 7 jours et 14 jours dans d'eau et ensuite à une température 32±2 °C et à une humidité relative HR=28 ±2 % améliore les propriétés mécaniques des

mortiers et des bétons de fibre par rapport à celles des mortiers conservés directement dans l'eau. Cette méthode de cure contribue à la réduction du retrait et les meilleurs taux de réductions ont été obtenus pour la cure dans l'eau pendant 7 jours [35].

2.6. Matériau composite à base des fibres cellulosique

Des déchets de papier d'emballage pour œufs ont été utilisés pour la confection d'un matériau composite. Les fibres cellulosiques sont additionnées avec quatre concentrations en fibres sont utilisées 3, 6, 10, 15 % en poids de ciment [36].

La masse volumique absolue des fibres est estimée par deux modes, sèche et humide, sur des petits échantillons. Les fibres sont pesées sur une balance électronique d'une précision égale à 10^{-4} g, puis elles sont mouillées et comprimées par la force des doigts à l'aide d'une seringue pharmaceutique de précision égale à 10^{-1} ml, et d'autres d'échantillons sont comprimés à sec.

Pour contrôler la quantité d'eau absorbée par les fibres, cinq échantillons sont séchés pendant 24 heures à une température de 104 °C, ensuite ces échantillons sont immergés dans l'eau pendant 24 heures. Après cette période, ces derniers sont laissés s'égoutter à l'intérieur d'une passoire sous une charge de 2 kg pendant 24 heures. Pendant cette période les échantillons d'essais sont couverts après un sachet en Nylon pour éviter l'évaporation de l'eau. Le taux d'absorption d'eau par le matelas des fibres est de cinq fois la masse de l'échantillon.

Les évolutions du retrait et du gonflement en fonction de l'âge et de la concentration de fibres sont données dans les figures 2.6 et 2.7. Le retrait et le gonflement augmentent en fonction de l'ajout des fibres. Cependant, le gonflement est très faible comparativement avec le retrait trouvé.

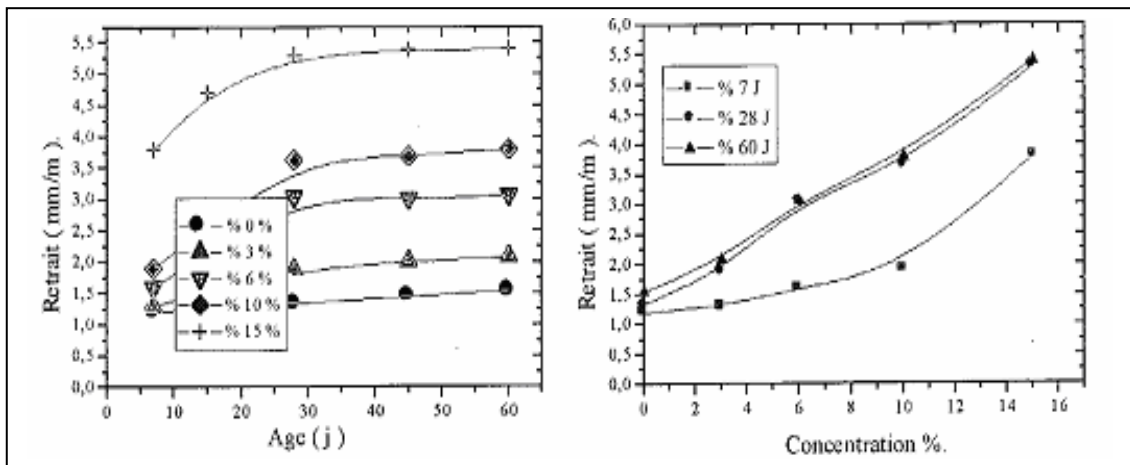


Figure 2.6 : Evolution du retrait en fonction de temps et de la concentration des fibres

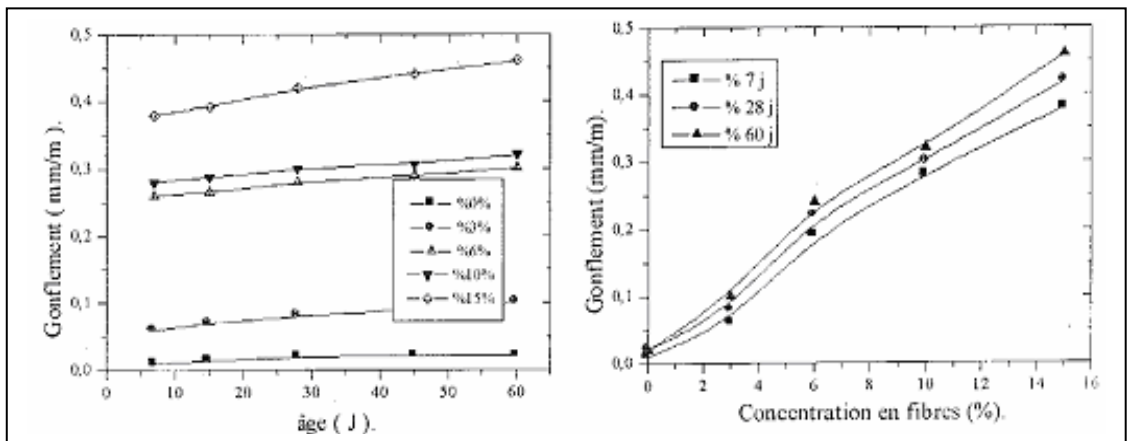


Figure 2.7 : Evolution de gonflement et en fonction de l'âge et de la concentration des fibres.

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres pour les deux cas sèche et sec. L'incorporation de 15 % de fibres donne une densité moyenne de 1.15 et une résistance moyenne à la compression et à la traction de 3 et 1 MPa respectivement [34].

La conductivité thermique a été mesurée par la méthode de boîte sur des éprouvettes 27x27x4 cm. Ces éprouvettes sont conservées à l'air libre pendant 60 jours à une température de 25 °C et à une d'hygrométrie relative de 60 %. Le coefficient de la conductivité thermique en fonction de la concentration des fibres est donnée dans la figure 2.8.

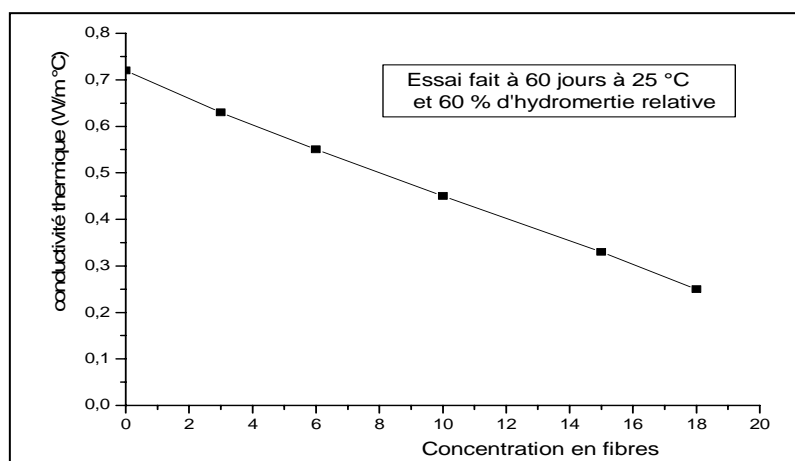


Figure 2.8 : La conductivité thermique en fonction de la concentration

D'après les résultats trouvés sur le matériau composite, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres pour les deux cas sèche et sec. Pour la résistance à la traction, du matériau composite conservé dans à l'air libre donne une résistance inférieurs à celui conservé dans l'eau. On remarque que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres dans le matériau composite, 15 % de fibres donne un coefficient de conductivité thermique de 0.3 W/m°C.

2.7. L'expérience du Brésil dans l'utilisation des fibres et des déchets végétaux en composite de ciment

Des fibres végétales ont été utilisées dans la confection des matériaux composites disponibles en Brésil tels que les fibres de coco qui sont extrait de noix de coco, les sous produits de champs et les déchets de pulpe l'eucalyptus. La cendre de cosse de riz (RHA) et les laitiers de haut fourneau (GBFS) sont utilisés pour la fabrication des panneaux et la production des tuiles [9]. Les tableaux 2.5, 2.6 et 2.7 représentent les caractéristiques des fibres utilisées.

Tableau 2.5 : Les propriétés physiques moyennes de la fibre de coco, du sisal et les déchets de pulpe d'eucalyptus [9].

Fibres	Epaisseurs ((μm))	Densité (kg/m^3)	Perméabilité (% par volume)	Absorption de l'eau (% par masse)
Sous produit- sisal	227	1104-1370	60.9-77.3	110-240
Fibre de coco	210	1117-1165	56.6-73.1	93.8-161
Pulpe d'eucalyptus	10.9	1609	89.2	643

Tableau 2.6: Propriétés mécaniques moyennes de quelques échantillons de fibre provenant du Brésil [9].

Fibres	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	module élastique (GPa)
Sous produit- sisal	170	37.7	2.8
Fibre de coco	458	4.3	15.2
Malva	160	5.2	17.2

Tableau 2.7 : Gamme de variabilité de la composition chimique (par % de la masse) des différentes fibres [9].

Fibres	Cellulose	Lignine	Hémicellulose
-Fibre de coco	35-60	20-48	15-28
-Sous produit- sisal	43-88	3.8-9.9	10-21
-Malva	76	10	-
-Papier d'emballage blanc l'eucalyptus	89	0.5	-

On remarque que les fibres de coco ont une teneur plus élevée de lignine et d'hémicellulose que le sisal. Par conséquent, la porosité et de contenu de lignine réduit les performances mécaniques des fibres [9].

Les fibres sont immergées dans une solution saturée de l'hydroxyde de calcium (pH \approx 12) à la température de laboratoire. Après immersion, les fibres de coco sont plus résistantes à l'attaque alcaline de l'hydroxyde de calcium. L'augmentation de la résistance à la traction des fibres de coco est remarquable à 28 jours. Par contre, avec l'immersion de fibres dans la solution de l'hydroxyde de calcium qui contient de la chaux libre pendant six mois avec un PH égal à 12,6 peut engendrer une perte de 3,5 % de la force initiale.

Afin d'améliorer la durabilité des composites, une réduction de l'alcalinité de la matrice est adoptée. Par conséquent, l'étude de ciments avec l'ajout est réalisée avec la cendre de cosse de riz et le laitier. Des panneaux et des tuiles de toiture ont été renforcés respectivement avec 2 % et 3,7 % de fibres de coco. Une réduction de la résistance à la compression à 28 jours a été observée en présence de la chaux, mais à 24 heures, on observe une augmentation de cette résistance.

Des panneaux de mur porteurs ont été fabriqués avec un ciment au laitier. Ces panneaux ont une densité de 2025 kg/m³ et présentent une résistance thermique de 0.14 m² K/W pour 8 % d'humidité relative. Le mur réalisé avec ces panneaux a une performance mécanique acceptable : la résistance à la compression est de 6.48 MPa ; le module de

Young de 9.55 GPa ; et le coefficient de Poisson est de 0.167. L'exposition à un environnement extérieur pendant une période de 16 et 60 mois a montré que les tuiles se dégradent et deviennent sombre après la période de 60 mois. La performance mécanique chute de 65 % à de 80 %. La réduction des propriétés mécaniques est attribuée à une combinaison de différents processus tels que la carbonatation de la matrice et la dégénération de la zone de transition [9].

2.8. Matériau composite à base des copeaux de sapin

Les copeaux de sapin ont été utilisés comme des granulats pour la confection des matériaux composites. Ces derniers se caractérisent par leurs faibles densités apparentes qui sont d'environ 0.44 [37].

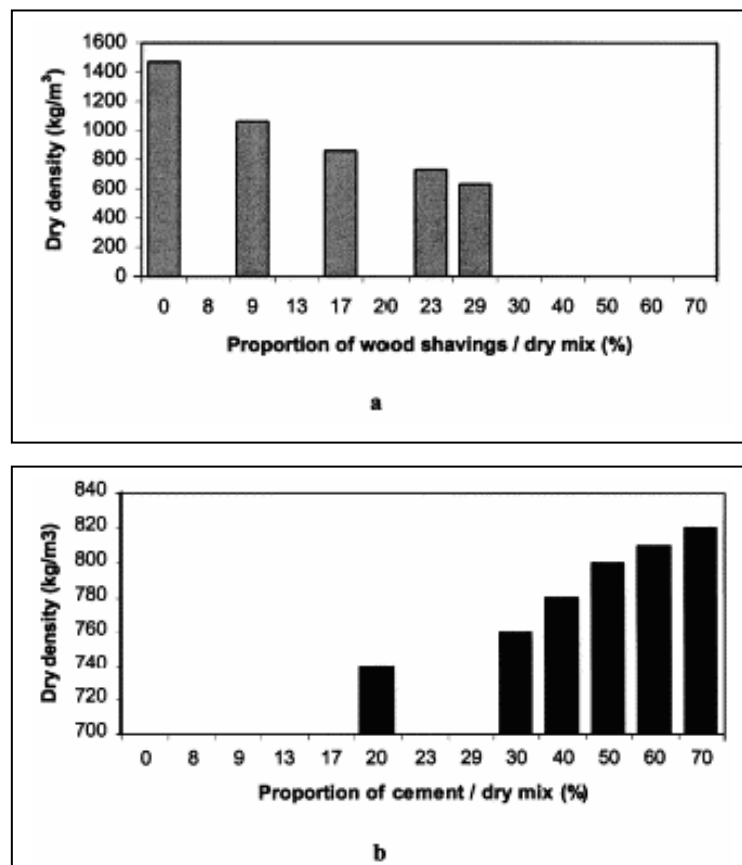
Les copeaux sont traités par la chaux hydraulique. L'extraction des substances hydrosolubles est exécutée au moyen de l'eau bouillante, en effet, ces dernières peuvent causer le gonflement du bois où retarde l'hydratation de ciment. Après traitement, les copeaux ont été maintenus dans une salle humide (H R. 95% droit, T = 20 °C) pendant 48 heures et alors entreposés dans un climat de humidité relative de 50 % et à une température de 20°C pendant un mois. Le liant employé est le ciment CPA CEMI 52.5 mélangé à l'argile qui est extrait de la décantation de boue sous forme de bassins. Il a été séché, rectifié et tamisés à 70 µm afin d'éliminer tous les corps étrangers. Par contre, les schisteuses fins sont obtenues de résidu d'écrasement du schiste.

L'argile, les fines schisteuses et le ciment sont mélangés à sec, ces matériaux sont mélangés à la vitesse réduite dans un malaxeur de mortier normalisé. Les copeaux sont ajoutés graduellement tout en gardant le malaxeur à la même vitesse pendant 2 minutes. L'eau est alors ajoutée graduellement en continuant le malaxage à une vitesse réduite pendant encore 2 minutes. Les spécimens d'essai sont placés dans une salle de H.R 50 % à une température de 20 °C. Les éprouvettes sont séchées sous une température de 100 °C jusqu'à une masse constante avant l'essai. Les essais mécaniques sont réalisés à l'âge de 28 jours sur trois échantillons prismatiques de 4x4x16 cm. La conductivité thermique est déterminée sur des échantillons de 10x10x5 cm et les variations dimensionnelles sont déterminées avec un retractomètre sur des éprouvettes de 4x4x16 cm. La figure 2.6 illustre la diminution de la densité sèche du matériau composite avec l'augmentation de la quantité des copeaux de sapin. L'influence des différents constituants sur les propriétés mécaniques

est représentée sur la figure 2.9. On constate que la résistance à la compression diminue avec l'ajout des copeaux en bois et que la résistance à la traction augmente entre 0 et 10 % (figure 10). L'addition des morceaux en bois améliore considérablement la conductivité thermique (figure 2.11). L'évolution de cette dernière au delà d'une concentration de 20% de bois est relativement faible.

Les variations dimensionnelles de ce matériau composite augmentent de manière significative avec l'addition des copeaux. La variation dimensionnelle augmente très rapidement quand le pourcentage de masse des copeaux excède 10%.

Le traitement global par l'eau bouillante, suivie d'un enduit hydraulique a permis de diminuer les variations dimensionnelles du matériau composite, la variation maximale enregistrée après 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 processus a servi de préserver quelques propriétés très intéressantes tout en se conformant avec le RILEM qui recommande que le béton léger qui possède une résistance R_c supérieure à 3.5 MPa doit avoir un coefficient de conductivité thermique λ inférieur à 0.7 W/m^{°K} [37].



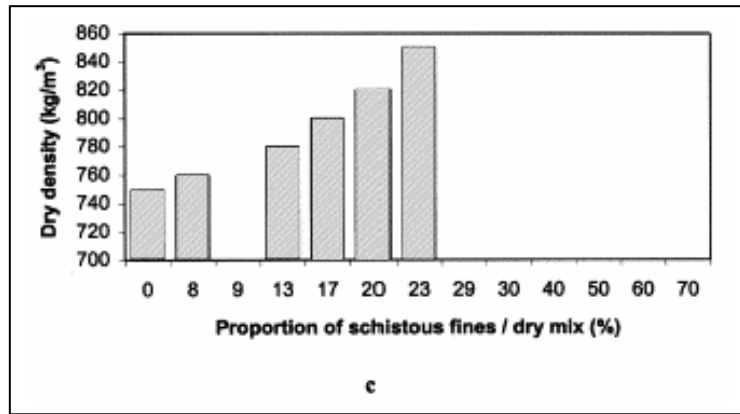
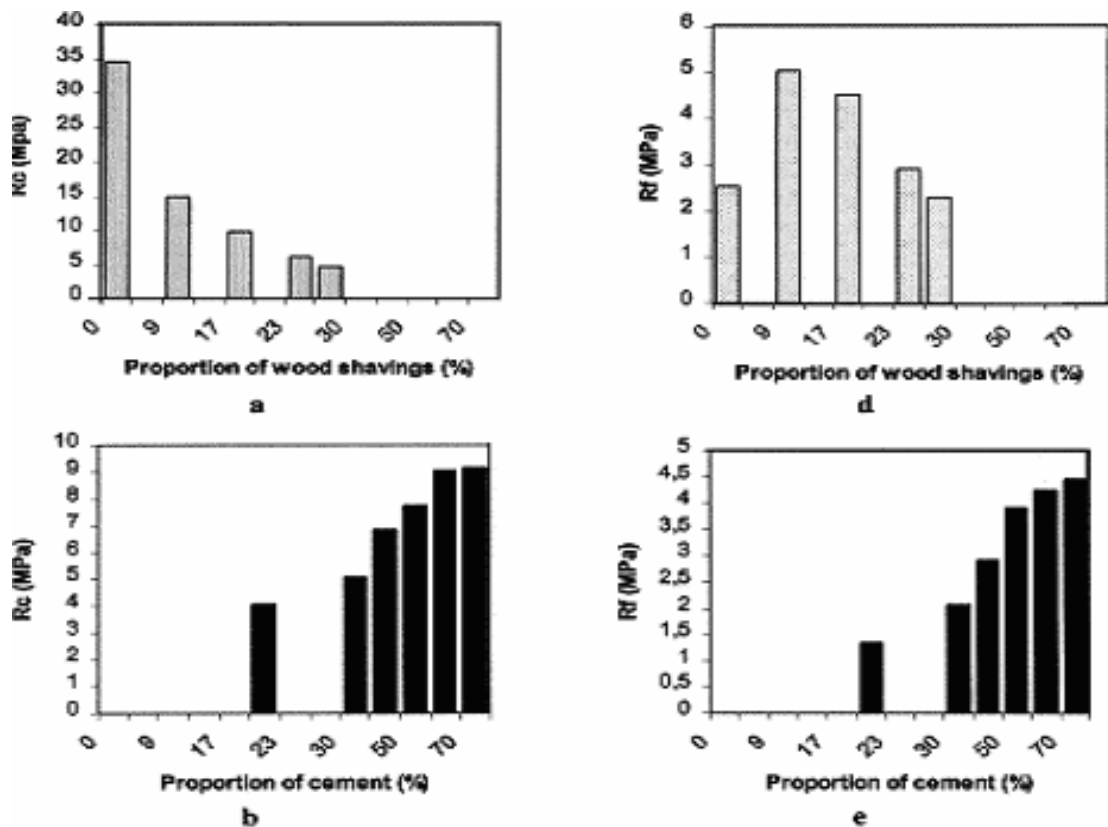


Figure 2.9 : Influence des constituants sur la densité du matériau composite

(a) argile + ciment=100% ; argile /ciment = 0.6, bois exprimé en pourcentage de masse de tout le mélange sec ; (b) l'argile + ciment = 100%, bois = 20% de la fraction minéral, ciment exprimé comme pourcentage de masse de tout le mélange sec ; et (c) argile +ciment + fines schisteuses = 100% (d'argile + fines schisteuses) /ciment = 0.6, fines schisteuses exprimées en pourcentage de masse de tout le mélange sec.



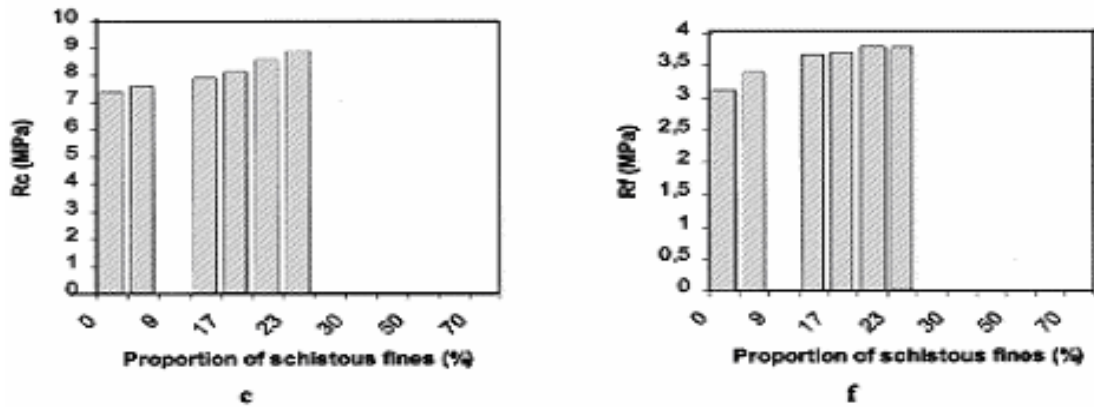


Figure 2.10 : Influence des différents constituants sur la résistance mécanique, la résistance à la compression (a, b c) et la résistance a la traction (d, e, f).

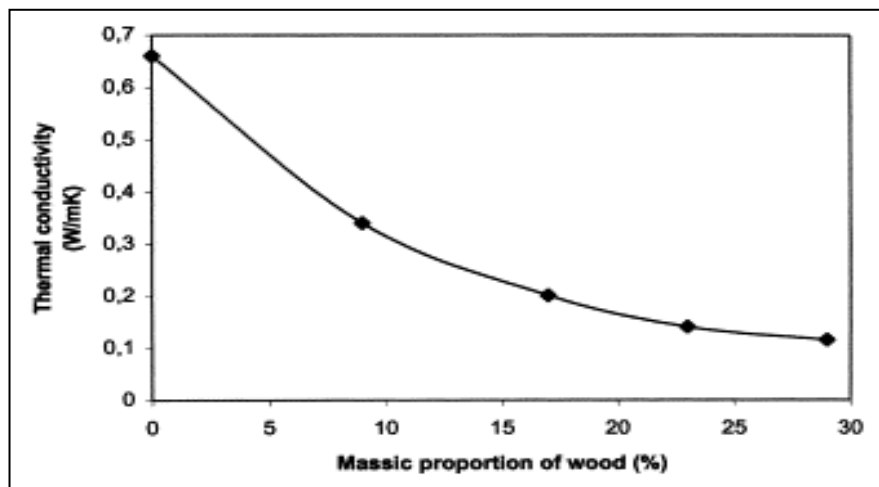


Figure 2.11 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la proportion de masse de copeaux en bois.

2.9. Durabilité des matériaux composites végétaux

Le problème majeur de l'utilisation des végétaux dans la fabrication du matériau composite est leur capacité d'absorption d'eau. La quantité d'eau absorbée retarde l'hydratation du ciment et affecte la résistance du composite. Ce phénomène peut être aussi attribué au sucre véhiculé par l'eau en présence des végétaux [32]. Les variations dimensionnelles du bois sont essentiellement observées lorsque l'humidité du bois varie entre 0 à 30 %. Au-delà, elles sont négligeables. La variation dimensionnelle est un problème pour les matériaux composite à base de bois.

Pour lutter contre le vieillissement et l'amélioration la durabilité des fibres végétales, les chercheurs ont proposés trois approches principales. Une approche est basée sur la protection des fibres en utilisant des enduits et couvrir les fibres végétales pour éviter

l'effet de l'eau alcaline [38]. La deuxième approche est le traitement à la vapeur de silice à haute pression pour permettre la carbonatation de la matrice [39].

La troisième approche est liée à l'utilisation des sous-produits industriels de faibles alcalinités [40].

2.9.1. Durabilité des fibres de palmier dattier dans un milieu alcalin

La durabilité des fibres de palmier dattier dans le milieu alcalin cimentaire a été analysée par leur immersion dans deux solutions alcalines à base de chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de soude NaOH ($\text{pH}=12.5$) ainsi dans la solution de Lawrence avec un pH de 12.95 (tableau 2.8).

Tableau 2.8: Composition de la solution de LAWRENCE [32].

Elément	Na	K	Ca	pH
composition	0.22 mol/l	0.061 mol/l	0.0065 mol/l	12.95 à 20°C

Après immersion des fibres dans des solution $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaOH , les fibres de palmier résistent mal aux alcalis, leurs résistances à la traction et leurs élongation à la rupture chutent en fonction du temps d'immersion. Cette diminution est d'autant plus grande que la section initiale des fibres est petite. Cependant, la chute de résistance des fibres immergées dans la solution de chaux est plus grande que celle des fibres immergées dans la solution de soude. Les fibres immergées dans ces solutions deviennent de plus en plus dures et fragiles, à cause de phénomène de cristallisation par la pénétration des alcalis dans les pores. Pour la solution LAWRENCE, le mécanisme d'attaque des fibres est similaire au mécanisme d'attaque des fibres par le produit d'hydratation. Les fibres de palmier présentent une faible durabilité dans les milieux alcalins et par conséquent dans les milieux cimentaire [32].

2.9.2. Durabilité des fibres à base des déchets de papiers

Des fibres provenant de recyclage de papier d'emballage ont été traitées avant d'être employées dans une matrice cimentaire. Les fibres ont été traitées par un acrylique aqueux ou par un alkylalkoxysilane. Par conséquent, l'hémicellulose et lignite sont enlevés avant la confection de composites fibres de bois-ciment [41].

L'effet de l'humidité cyclique et de la température cyclique sur la stabilité dimensionnelle, la longueur, la largeur, l'épaisseur et le poids de trois échantillons a été réalisé.

Les résultats ont montré que le papier d'emballage et les fibres de bois dur traité avec l'acrylique aqueux ou l'alkylalkoxysilane aqueux sont plus résistants à la détérioration au cycle de l'humidité que le ciment seul et les fibres de bois non traités [41].

L'effet du silicate de sodium (N), silicate de potassium (K) et le niveau de traitement du silane (Si) sur les fibres de bois de papier d'emballage ont été étudiés sur les fibres de journaux recyclés et les fibres de bois tendre de papier d'emballage obtenues par le recyclage des sacs de papiers [42].

Les fibres de bois sont immergées dans l'eau désionisée à une température ambiante puis elles sont conservées à l'air sec et tamisées à 2 mm. Notons que les fines de fibres de bois sont enlevées par une pression de l'air et le reste des fibres sont utilisées en tant que des fibres traitées et non traitées. Le traitement chimique des fibres est effectué dans une solution chimique aqueuse et placée dans une solution diluée pendant 30 minutes [42]. Le tableau 2.9 résume les formulations des échantillons du ciment seul et fibre-ciment traitée et non traitée. Les tableaux 2.10 et 2.11 présentent les résistances à la compression des composites traitées avec des produits chimiques.

Tableau 2.9 : Les formulations des échantillons, ciment seul et fibres-ciment traitée et non traitée [42].

Spécimens	ciment seul		Composite fibre-ciment	
	Poids (%)	Poids en groupe (lb)	Poids (%)	Poids en groupe (lb)
Ciment Portland type III	75.8	3.307	68.9	3.307
Eau désionisée	22.7	0.992	20.7	0.992
Plastifiant	1.5	0.066	1.4	0.066
fibre	-	-	4.3	0.205
Eau extra	-	-	4.7	0.227
total	100.0	4.365	100.0	4.797

Tableau 2.10 : Résistance à la compression du matériau composite fibres-ciment traité avec le sodium et potassium [42].

Silicate de sodium (%)	Sodium (N)		Potassium (K)	
	Fibres de journal	Fibres d'emballage	Fibres de journal	Fibres d'emballage
	Compression (psi)	Compression (psi)	Compression (psi)	Compression (psi)
seul	8850	7600	8850	7600
Non traité	5130	4750	5130	4750
0.25-0.75	4920	6690	4860	6620
1-5	5840	5940	5210	6920
6-10	6150	6790	5000	6930

Tableau 2.11 : Résistance à la compression du matériau composite fibres-ciment traité avec de silane [42].

Silane (%)	Fibres de journal	Fibres d'emballage
	Compression (psi)	Compression (psi)
seul	8850	7600
Non traité	5130	4750
0.25-0.75	4210	6770
1-10	4590	6340
15-60	4980	5790
100	3810	5700

Pour les composites à base des fibres du journal-ciment, le traitement avec le silicate de sodium (N), a donné des valeurs de compression plus élevée par rapport aux autres traitements chimiques. Cependant, les fibres d'emballage ont donné des résultats différents que celles des fibres du papier journal. Néanmoins, les valeurs trouvées de la résistance à la compression des fibres d'emballage traitées sont comparables pour tous les traitements étudiés.

2.9.3. Effet de traitement des blocs en béton léger

Plusieurs traitements ont été effectués pour minimiser les problèmes de la compatibilité du ciment-bois pour un composite à base des palettes et des déchets d'un manufacturé de matelas utilisés dans la confection des blocs de maçonnerie. En effet, le carbonate d'hydrogène de potassium ou le bicarbonate de potassium (KHCO_3) et le silicate de sodium (SiO_2 avec NaOH) sont utilisés. Un accélérateur à base de naphthalène condensé par sel de sodium sulfonique, et un plastifiant non-ionique est également utilisé [43].

Les blocs ont une forme cylindrique de dimensions de 76 x 153 mm. Ces derniers sont conservés dans l'eau pendant 24 heures dans une température 48 °C, après cette période, les cylindres sont conservés dans une chambre de température de 32 °C avec une humidité relative de 90 %.

Le meilleur résultat est obtenue avec les proportions suivantes ; quatre parts du sable, deux parts de bois et une part du ciment. La densité sec de cette composition est environ 1600-1750 kg/m³. La figure 2.12 illustre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de temps de trois mélanges. D'après cette figure, l'accélérateur n'a aucun effet sur la résistance entre 18 et 24 heures. Par contre, à l'âge de 7 jours l'effet de l'accélérateur commence à se manifester.

Le traitement de bois seul et la combinaison de traitement sont illustrés sur la figure 2.13. On constate que la résistance à la compression augmente de 15 % avec le lavage et 23 % avec le silicate (silicate de sodium avec une concentration de 6 %).

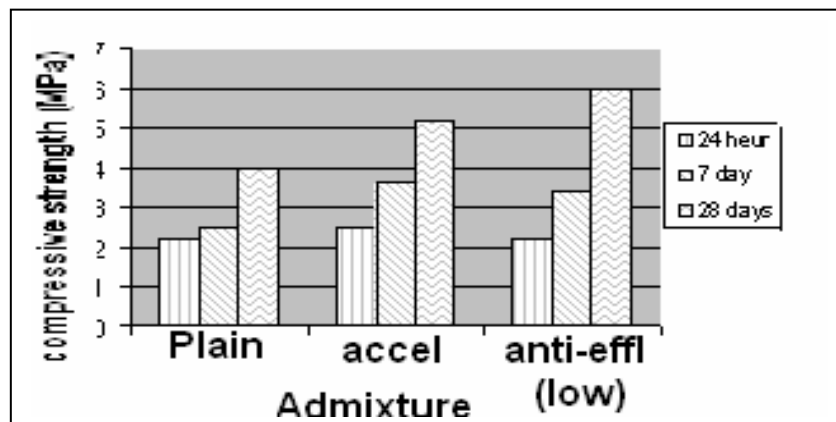


Figure 2.12 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et de traitement réalisé sur les cylindres

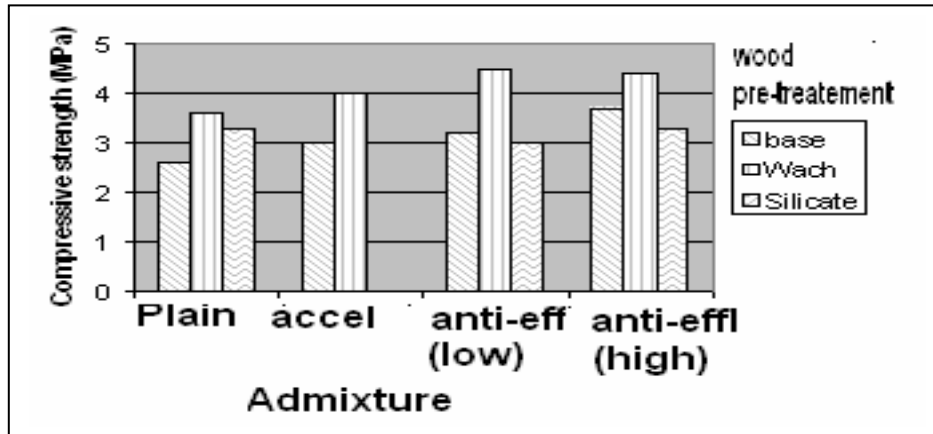


Figure 2.13 : Les effets du traitement de bois sur la résistance à la compression du composite

Les résistances à la compression et la densité sèche des blocs manufacturés en fonction du traitement sont données par le tableau 2.12.

Tableau 2.12: Résistances à la compression des groupes de bloc [43].

Mélange	Agrégats brut : sable : bois : ciment	Eau (kg)	Mélange / traitement	Densité sèche (kg/m ³)	Résistance 7 jours (MPa)	Résistance 28 jours (MPa)
P1	0 :1230 :80 :200	110	.....	1.680	6.1 (0.09)	6.7 (0.14)
P2	0 :1410 :80 :200	95	.....	1.720	3.6 (0.07)	5.6 (0.14)
P3	180 :1230 :80 :200	102	.....	1.700	3.2 (0.14)	3.5 (0.14)
P4	320:1090 :80 :200	130	antieflorescent	1.690	4.3 (0.09)	4.8 (0.14)
P5	320:1090 :80 :200	110	accélérateur	1.690	3.4 (0.10)	3.6 (0.14)
P6	320:1090 :80 :200	110	silicate	1.690	5.1 (0.07)	5.9 (0.14)

() : Parenthèses donnent de coefficient de variation

On remarque que le meilleur résultat est obtenue avec un remplacement de volume des agrégats par un volume du bois. Concernant le traitement effectué sur les blocs, on constate que le traitement avec le silicate de sodium des blocs confectionné avec des agrégats nous donne une résistance à la compression acceptable. Par contre, l'utilisation de l'accélérateur et du carbonate soluble pour la fabrication des blocs en maçonnerie n'est pas efficace.

2.10. Conclusion

Dans ce chapitre les matériaux composites à base des déchets végétaux sont étudiés. Ces composites peuvent être réalisés avec les déchets de noix de coco, le durian, les copeaux de sapin, les fibres cellulosiques et les fibres de palmiers dattier. Le problème majeur de ces composites est leur compatibilité chimique avec les liants et leurs variations dimensionnelles. Cependant, ces matériaux composites peuvent apporter simultanément une bonne isolation thermique et un faible poids à la structure.

CHAPITRE 3

LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MORTIERS ET DES BETONS ET LES TECHNIQUES DE MESURES

3.1. Introduction

Pendant des siècles, on a construit empiriquement des maisons dont le confort thermique était très médiocre. L'évolution des méthodes de construction, le besoin d'un confort thermique plus approprié et le souci d'économie ont suscité un intérêt pour l'amélioration de l'isolation. L'analyse de conduction du transfert thermique dans les structures est de grande importance en génie civil. La planification et la conception de la construction pour le confort thermique, des centrales nucléaires, l'analyse de la plateforme de ponts et d'autres structures exposées au chargement thermique solaire est capitale. Le béton étant l'un des matériaux de construction le plus généralement utilisé, la connaissance de la conductivité thermique de ce dernier a une grande importance sur le confort thermique. Le problème du transfert thermique en béton est compliqué. Les agrégats, la porosité et le degré d'humidité dans le béton ont une grande influence sur la conductivité thermique du béton [44].

3.2. Phénomène de l'échange de chaleur

La température traduit la vitesse d'agitation des particules élémentaires de la matière. Entre deux corps dont la température est différente se produit inévitablement un flux calorifique, la chaleur se déplaçant du corps chaud vers le corps froid jusqu'à ce qu'il y ait équilibre de température. Aucun moyen ne permet d'empêcher l'échange de chaleur, seul son intensité peut être modifiée [24].

a) Par rayonnement

Tous les corps solides et liquides émettent, par leur surface, des énergies sous forme d'onde électromagnétiques. Si une énergie rayonnée rencontre un corps absorbant ces longueurs d'ondes, elle se transforme en chaleur. Ce transfert ne nécessite aucun support matériel et se produit dans le vide.

b) Par convection

Ce mode d'échange thermique est propre aux fluides (gaz ou liquides). Les molécules directement au contact d'une surface solide absorbent ou cèdent la chaleur suivant les températures respectives de la surface et des fluides.

Les différences de températures provoquent des différences de masse volumique qui engendrent les mouvements de convection, les molécules les plus chaudes étant les plus légères et ayant tendance à monter.

c) Par conduction

La conductivité traduit l'échange de chaleur s'effectuant par propagation à l'intérieur d'un solide.

Ces trois modes d'échange se produisent simultanément dans une paroi. La conduction pure n'existe pas dans les matériaux de constructions, du fait de la présence d'alvéoles plus ou moins gros et réguliers. Il s'agit d'une conduction apparente, tenant compte des phénomènes de rayonnement et de convection à l'intérieur des alvéoles.

3.2.1. Echange de chaleur entre deux ambiances séparées par une paroi

Le phénomène de l'échange de chaleur entre deux ambiances (intérieur et extérieur) de température différente ($T_i > T_e$), séparées par une paroi, s'effectue de la façon suivante : la chaleur issue du milieu intérieur est transmise à la paroi par rayonnement et convection, elle traverse la paroi par la conduction, puis elle est restituée au milieu extérieur par rayonnement et convection. A l'intérieur de la paroi, la température n'est pas uniforme. Dans un mur homogène, elle décroît régulièrement de la face interne vers la face externe.

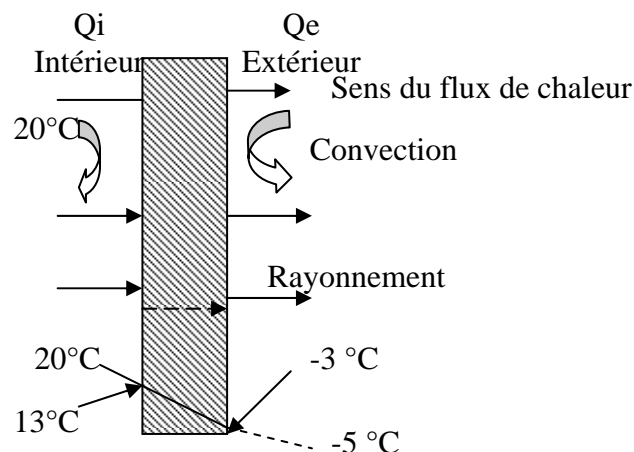


Figure 3.1 : Schéma du transfert de chaleur à travers une paroi du bâtiment

3.2.2. La conductivité thermique

La conductivité thermique d'un corps est, par définition, la densité du flux le traversant pour une différence de 1°C entre les températures des deux faces séparées par un mètre d'épaisseur. Plus la conductivité thermique d'un corps est faible, plus le corps s'oppose au transfert de chaleur, et plus il est isolant. Les matériaux de construction contiennent toujours une certaine quantité d'humidité qui accroît leur conductivité [23].

La conductivité thermique est l'une des caractéristiques les plus importantes à prendre en compte pour le choix d'un matériau isolant. La conductivité thermique dépend de plusieurs facteurs, la direction (dans le cas des corps anisotropes ou existent des directions privilégiées de la chaleur), la température, la pression (mécanique pour les solides, et la pression des gaz et des vapeurs dans un milieu poreux) [45]. Dans un milieu isotrope et homogène, la conductivité thermique (λ) ne dépend que de la température. Ce coefficient s'exprime dans un système international en W/ m°C et dans les systèmes thermiciens en Kcal/ h.m. °C (1kcal = 1.16 W).

3.2.3. Flux de chaleur à travers une surface

Le flux de chaleur (θ) est la quantité de chaleurs (Q) échangée par unité de temps (t).

$$\theta \text{ (W/s)} = \frac{Q}{t} \quad (3.1)$$

3.2.4. Densité de flux de chaleur

Pour le calcul des pertitions de chaleurs, dans le bâtiment, le flux de chaleur est rapporté à l'unité de surface A. Ce rapport s'appelle la densité de flux (ρ) :

$$\rho \text{ (W/ s. m}^2\text{)} = \frac{\theta}{A} \quad (3.2)$$

3.2.5. Résistance thermique

Dans les calculs à effectuer en isolation thermique, on a besoin de connaître la résistance de chaleur offerte par un corps d'épaisseur donnée. Cette résistance thermique, notée R, est inversement proportionnelle à sa conductivité thermique [46]. La résistance thermique est donnée par la formule 3.3.

$$R (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}) = \frac{e}{\lambda} \quad (3.3)$$

Avec

e : épaisseur du matériau exprimée en mètre.

3.2.6. Coefficient de transmission thermique utile K

Le coefficient de transmission thermique utile K est l'inverse de la résistance thermique global R. Dans le cas des parois opaque homogène, ce coefficient est exprimé par la formule 3.4 :

$$K = \frac{1}{R} \quad \text{ou} \quad K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad (3.4)$$

Dans le cas les parois hétérogène, le coefficient K à utiliser dans les calculs et le coefficient moyenne de la paroi. Celui-ci est donné par la formule 3.5 [5] :

$$K (\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) = \frac{\sum K_i A_i}{\sum A_i} \quad (3.5)$$

A_i : est la surface de paroi dont le coefficient de transmission est égal à K_i

$\sum A_i$: est la surface intérieure totale de la paroi.

La méthode de calcul consiste en fait à décomposer la paroi en éléments homogènes dont on sait calculer le coefficient K.

Ce coefficient (K) exprime la quantité de chaleur à travers une paroi séparant deux ambiances dont l'écart de température est de 1 degré, par mètre de paroi, pendant l'unité de temps. Plus le coefficient K est grand, plus la qualité thermique de la paroi est mauvaise. Les valeurs de K sont données dans le tableau 3.1, elles dépendent de la nature de logement et de la zone climatique [7].

Tableau 3.1 : Les valeurs de coefficient de transmission thermique utile K

Zone	Logement individuel					Logement collectif				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
A	1.10	2.4	1.4	3.5	4.5	1.10	2.4	1.2	3.5	4.5
B	1.10	2.4	1.2	3.5	4.5	0.90	2.4	1.2	3.5	4.5
B'	1.10	2.4	1.2	3.5	4.5	0.90	2.4	1.2	3.5	4.5
C	1.10	2.4	1.2	3.5	4.5	0.85	2.4	1.2	3.5	4.5
D	2.40	3.4	1.4	3.5	4.5	2.40	3.4	1.4	3.5	4.5
D'	2.40	3.4	1.4	3.5	4.5	2.40	3.4	1.4	3.5	4.5

Les coefficients a, b, c,d et e correspondent respectivement à la toiture, le plancher bas y compris les planchers bas sur locaux non chauffés, les murs, les portes, les fenêtres et les portes-fenêtres.

Le Document Technique Réglementaire (DTR .C 3-2), partage le territoire national en quatre zones principales A, B, C et D et au sein de la zone B' et D, on distingue deux sous zone B' et D'.

- ✓ la zone A comprend le rivage de la mer et parfois le versant Nord de chaînes côtières
- ✓ la zone B comprend la plaine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières et l'Atlas tellien ; au sein de cette zone, on distingue une sous-zone B' qui comprend la vallée du Chlef.
- ✓ La zone C comprend les Hauts- Plateaux compris entre l'Atlas tellien et l'Atlas Saharien
- ✓ La zone D correspond le Sahara, au sein de laquelle on distingue une sous - zone D'.

3.3. La conductivité thermique des mortiers et des bétons

La conductivité thermique des bétons et des mortiers est affectée par plusieurs facteurs. Afin de quantifier l'influence de ces paramètres sur la conductivité thermique, le type du ciment, le pourcentage de granulats fins, le rapport E/C, la température et l'états de échantillon (sec ou humide) ont été variés. Des échantillons rectangulaires de 10x10x15 cm ont été fabriqués pour mesurer la conductivité thermique.

Un ciment Portland type I et V, un sable de fleuve en tant que granulats fins et des agrégats brut ont été employés pour la confection des éprouvettes. Les cendres volantes et le laitier de haut fourneau ont été employés comme remplacement du ciment pour analyser leurs effets sur la conductivité thermique. Les échantillons ont été entièrement saturé à 20°C et mesurer à âge de 3,7, 14 et 28 jours.

Les facteurs qui affectent beaucoup plus la conductivité thermique sont le pourcentage des granulats et l'humidité. L'addition des granulats fins nous donne une faible conductivité thermique à celui des gros agrégats du fait que les agrégats fins sont uniformément distribués dans la matrice. On remarque que l'âge de l'essai n'affecte pas la conductivité thermique excepter pour le jeune âge (figure 3.2). L'influence de la température et le rapport E/C sur la conductivité thermique est significative, l'augmentation de ces paramètres contribue à la diminution de la conductivité thermique (figure 3.2). Il a été constaté également que la conductivité thermique est fonction de la qualité du ciment employé (figure 3.3). La substitution des ciments par les cendres volantes ou le laitier de haut fourneau diminue le coefficient de la conductivité thermique (figure 3.3).

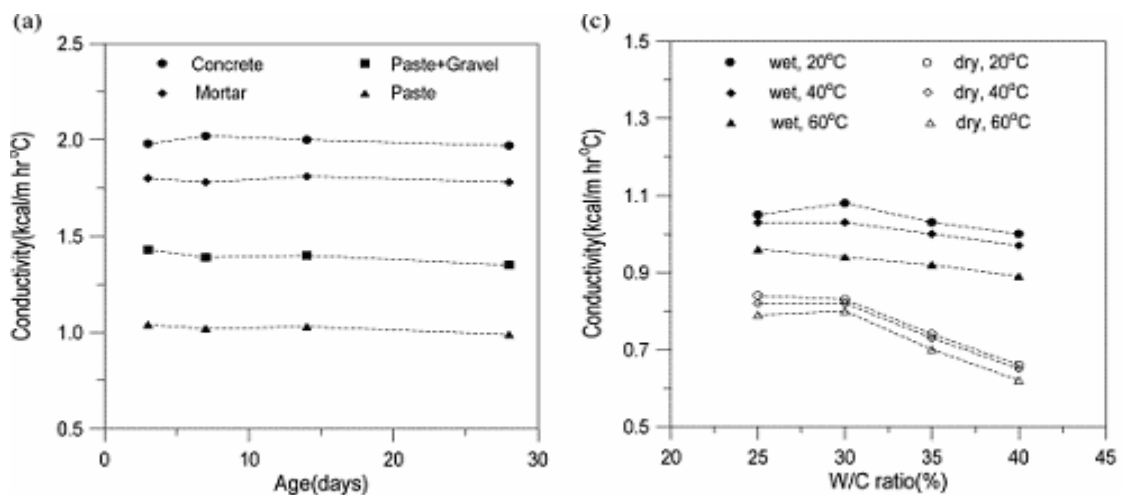


Figure 3.2 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de l'âge et de rapport E/C [47].

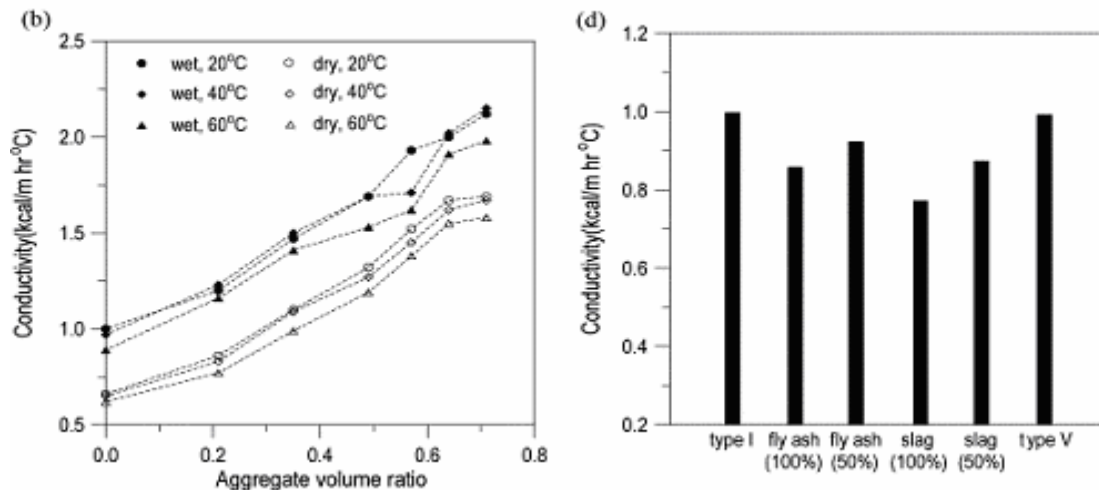


Figure 3.3 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de volume des agrégats et du ciment

3.4. Les techniques de mesure de la conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique des matériaux destinés à isolation dans le domaine du bâtiment peut se faire par plusieurs méthodes, expérimentales et théoriques.

3.4.1. Méthodes expérimentales

a) La méthode de la plaque chaude gardée

L'énergie est apportée par une source thermique dite « plaque chaude gardée ». Le flux de chaleur thermique est constant avec les plans isothermes parallèles à travers deux éprouvettes du matériau situées de part et d'autre de la plaque chaude gardée. La dissipation de l'énergie ayant traversé les éprouvettes par deux plaques froides situées de part et d'autre des éprouvettes. La mesure de la conductivité thermique se fait en régime stationnaire [48]. Cette méthode est appliquée pour les matériaux homogènes et les mélanges granuleux compacts avec une granulométrie sensiblement continue. L'inconvénient majeur de cette méthode est que le temps d'expérimentation est très long (18 heures) et le montage est très délicats à réaliser [49].

b) La méthode dite du flux radial

Le principe de cette méthode est identique à celle de la plaque chaude, mais elle est appliquée pour les matériaux granuleux ou pulvérulents [49].

c) La méthode dite des boîtes

L'appareil est constitué d'une enceinte isolée (thermostat) qui maintient une basse température, d'une ou plusieurs boîtes (jusqu' à trois) revêtues sur leurs parties internes d'un matériau dont on connaît parfaitement le coefficient d'échange thermique et comportant sur leurs faces supérieures un film chauffant et son alimentation est reliée à une console de mesure.

d) Méthode de CT-METRE

Pour notre étude, nous avons utilisé un appareil de mesure disponible au niveau du Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) dit CT METRE. Cet appareil conçu pour évaluer les caractéristiques thermiques de matériaux solides tels que la brique, les roches, la terre, le béton cellulaire ou le bitume. Il peut aussi être utilisé avec des poudres ou des liquides immobilisés [50].

Le CT METRE se compose de deux éléments :

- ✓ l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester,
- ✓ la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffage et de recueillir la température induite.

Il existe deux types de sondes :

i) La sonde anneau

Circuit imprimé souple (épaisseur 0.2 mm- dimension 60x90 mm), destiné à s'insérer entre deux morceaux plan de l'échantillon à mesurer (dont les surfaces ont été préalablement rectifiées). Ce type de sonde, permet de mesurer la conductivité thermique (W/m. °K) et la chaleur spécifique (kJ/m³. °K)

ii) La sonde fil (ou monotige)

Circuit imprimé souple (épaisseur 0.2 mm), destiné à s'insérer entre deux morceaux plan de l'échantillon à mesurer (dont les surfaces ont été préalablement rectifiées). Ce type de sonde, permet de réaliser la conductivité thermique (W/m. °K),

3.4.2. Méthodes théoriques de mesure de la conductivité thermique

Campbell-Allen et Thorne [44] ont postulé un modèle théorique pour la prédiction de la conductivité thermique du béton. Ce modèle théorique de la prédiction de la conductivité thermique du béton considère que le mortier est composé d'une phase

continue. Harmathy [44], d'autre part, considère que la porosité de béton et le degré d'humidité du béton sont les facteurs dont dépend la conductivité thermique, et se sont les paramètres d'entrée pour ce modèle. L'expression de la conductivité thermique du béton du modèle de Campbell-Campbell-Allen et Thorne est donnée par la formule 3.6.

$$k = k_m \left(2M - M^2 \right) \frac{k_m k_a (1 - M)^2}{k_a M + k_m (1 - M)} \quad (3.6)$$

$$M = 1 - (1 - p)^{1/3} \quad (3.7)$$

Avec p est le volume de mortier par unité de volume, k la conductivité thermique et (m) et (a) se rapportent au mortier et à l'agrégat, respectivement.

Pour la prévision de la conductivité thermique des matériaux poreux, Il y a deux types de modèles efficaces pour les matériaux poreux, le modèle d'approximation effective de milieu (EMA) et de la loi de Ohm's. Les modèles de la loi de Ohm's sont semblables au modèle de Campbell-Allen et de Thorne's mais les fractions de volume du mortier et de l'agrégat sont remplacées par la fraction de volume du solide et des pores, respectivement. Cependant, le modèle de la loi de Ohm's pour le matériau poreux a été appliqué au béton. Un des modèles d'EMA appliqué au béton est le modèle de Hamilton et le modèle de Crosser's [44]. C'est un modèle biphasique, qui peut être prolongé à un modèle multiphasique, et il est donné par la formule 3.8.

$$k = \frac{(1 - p)k_a + EPk_f}{(1 - P) + EP} \quad (3.8)$$

$$E = \frac{nk_a}{(n - 1)k_s + k_f} \quad (3.9)$$

Avec k_s tenant de la conductivité et la fraction de volume de la phase 1. La phase 2 est une phase dispersée et la valeur de n est en fonction de la phase de distribution géométrie qui et doit être déterminé expérimentalement. Selon Harmathy les deux phases sont essentiellement inséparables, des données expérimentales sont disponibles, une valeur de $n=1.5$ semble pour être raisonnable. Pour les applications sur la pâte ciment, mortier et béton, ce modèle est prolongé à un système triphasique. Le béton se compose de trois phases : le solide se composant des particules de ciment hydraté et des agrégats, vides d'air

et l'eau de l'humidité. Cependant, quand le matériau est sec, on utilise le modèle biphasique. Par contre, on utilise le modèle triphasique quand le matériau est saturé.

Un modèle avancé semblable à EMA principalement pour les roches saturé a été suggéré par Zimmerman [44], qui en plus de la porosité, il prend en considération l'aspect des pores. Les expressions reliant la conductivité équivalente du matériau poreux avec la porosité, la conductivité de solide et l'aspect des pores sont données par la formule 3.10.

$$\frac{k}{k_s} = \frac{(1-P)(1-r) + r\beta P}{(1-P)(1-r) + \beta P} \quad (3.10)$$

$$\beta = \frac{(1-r)}{3} \left[\frac{4}{2+(r-1)N} + \frac{1}{1+(r-1)(1-N)} \right] \quad (3.11)$$

Avec $r = k_f/k_s$ et N étant un facteur qui dépend de aspect des pore. Le paramètre qui caractérise l'aspect des pores est dénoté Alpha (α). Les pores aplatis auront α inférieur à 1, et pour les pores allongés α supérieur à 1. Ainsi, N est lié à α de façon suivante :

Pour les pores aplatis

$$N = \frac{(2\theta - \sin 2\theta)}{2 \tan \theta \sin \theta} \quad (3.12)$$

Avec

$$\theta = \cos^{-1}(\alpha)$$

Pour les pores allongées

$$N = \frac{1}{\sin^2 \theta} - \frac{\cos^2 \theta}{2 \sin^3 \theta} \ln \left[\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right] \quad (3.13)$$

Avec

$$\theta = \cos^{-1}(1/\alpha)$$

En cas de béton, les pores peuvent être les pores capillaires formés du processus d'hydrations où peuvent être le rétrécissement des fissures formées à l'interface mortier. Une autre approche est suggérée par Bhattacharjee [44], la conductivité thermique du matériau de construction est fonction de la nature des pores où deux types de pores ont

été postulés pour la conduction de la chaleur notamment, les pores inclus et des pores enfermés.

Les expressions décrivant les mêmes modèles sont données par la relation 3.14.

$$\frac{k}{k_s} = k_1^{(1-f)} \times k_2^{(f)} \quad (3.14)$$

Avec k_1 et k_2 sont la conductivité des pores enfermés et des pores inclus, respectivement, et f l'emplacement de la fraction des pores inclus. Les pores inclus sont presque entourés par le solide dans toutes les directions, tandis que les pores enfermés entourent presque le solide dans toutes les directions. Ce système tient compte de la structure des pores, l'interconnectivité des pores et les types de pores. La conductivité des pores enfermés k_1 peut être obtenu par la formule 3.14.

$$k_1 = \frac{1}{(Ak_s + \mathbf{B})} \quad (3.14)$$

Les valeurs de k_2 dans l'état sec et saturé sont données par les formules 3.15 et 3.16 respectivement.

$$k_2(\text{sec}) = C - Dk_s \quad (3.19)$$

$$\log k_2(\text{sat}) = E - Fk_s + Gk_s^2 \quad (3.20)$$

Avec A, B, C, D et G sont en fonction de porosité dans les états secs et saturés.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre (après analyse de facteurs influant sur le coefficient de la conductivité thermique λ) on peut conclure que :

- Plusieurs méthodes existent pour mesurer λ (expérimentales et théoriques)
- Les facteurs affectant λ des bétons et des mortiers sont : la densité, le rapport E/C, l'humidité, la température, le ciment et le pourcentage des granulats fins.
- L'utilisation des cendres volantes et de laitier de haut fourneau diminue la conductivité thermique.

CHAPITRE 4 MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on donne les différents matériaux utilisés ainsi que les essais réalisés sur le matériau composite Ciment/Liège. Le but principal de l'étude est de recycler les déchets du liège, ces derniers seront mélangés avec du ciment afin d'obtenir un matériau composite qui sera utilisé comme un isolant dans les constructions. Pour ce faire, plusieurs séries d'essais ont été réalisées pour caractériser ce matériau composite à savoir la densité, la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

4.2. Matériaux utilisés

4.2.1. Ciment

Pour confectionner notre matériau composite Ciment/Liège, nous avons utilisé un ciment provenant de Chlef type CEMII 42,5 contenant 10 % de calcaire. Les analyses chimiques et minéralogiques ont été déterminées au laboratoire CETIM à Boumerdès. Les résultats des analyses chimiques et minéralogiques sont regroupés dans les tableaux 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1 : Composition chimique du ciment utilisé

Composition chimique	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	C_aO	M_gO	K_2O	Na_2O	SO_3	C_aO libre	insoluble	P.F
Teneur %	18.78	4.93	3.70	63.06	0.88	0.47	0.21	2.43	0.85	0.74	5.5

Tableau 4.2 : Composition minéralogique du ciment utilisé

Phase	Constituant minéralogique du clinker	Teneur rapportée au clinker %
Clinker	C_3S	54
	C_2S	26
	C_3A	11
	C_4AF	08
	$\text{C}_a\text{O.L}$	< 01
Régulateur de prise	gypse	6
Ajout	calcaire	10

Les essais mécaniques ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm avec un mortier normalisé ; 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau, ces essais sont réalisés selon la norme NF P15-471 [51]. Le tableau 4.3 récapitule les résultats obtenus des essais mécaniques.

Tableau 4.3 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge

Echéance en jours	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
2	3.12	13.90
7	5.10	30.64
28	7.43	42.66

Les caractéristiques physiques ont été aussi déterminées pour vérifier la conformité du ciment utilisé. Les résultats des essais physiques sont regroupés dans le tableau 3.4.

Tableau 4.4 : Essai physiques réalisés sur le ciment

Consistance normale (%)	H ₂ O	23.6
Temps de prise (mn)	début	165
	fin	250
Stabilité (mm)	Froid	/
	chaud	0.20
Essai de retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$)	3 jours	387.50
	7 jours	412.50
	28 jours	518.75
Essai de gonflement ($\mu\text{m}/\text{m}$)	3 jours	22.50
	7 jours	22.50
	28 jours	22.50
Masse volumique absolue du ciment (g/cm^3)		3.12
La finesse suivant la méthode Blaine (cm^2/g)		3085

D'après les résultats obtenus, le ciment correspond à un ciment CPJ-CEMII/A 42,5 selon la norme NF P15-301 [52], avec des propriétés physico-mécaniques et chimiques satisfaisants aux exigences de la norme.

4.2.3. Granulats et la poudre de liège

i) Introduction

Les déchets de liège utilisés dans la confection du matériau composite sont des résidus de la production des panneaux d'agglomérés expansé et de broyage de liège. Ces déchets ont été obtenus de l'unité de transformation de Jijel. Pour le besoin de notre étude, nous avons effectués plusieurs essais de caractérisation du liège .

ii) Analyse granulométrique

Pour la confection des éprouvettes, nous avons utilisé deux types de granulats de déchets de liège, expansé et cru ainsi que la poudre de liège expansé. Afin de broyer ou déchiqeter les déchets de liège expansé, un broyeur de recyclage de plastique a été utilisé. Après broyage, les granulats du liège ont été ensuite nettoyés de toutes les impuretés telles que les cailloux et les végétaux. Par contre, les déchets de liège cru ont été utilisés à l'état brut sans traitement préalable. Ils ont été uniquement nettoyés des impuretés.

L'analyse granulométrique de deux granulats, expansé et cru, est réalisée par tamisage selon la norme NF B57-011 [53]. La figure 4.1 représente la granulométrie des deux déchets de liège. Le module de finesse est de 4.6 pour le liège cru et de 3.48 pour le liège expansé. Les déchets de liège sont appelés poudre lorsque leurs diamètres sont inférieur ou égal à 0.25 mm conformément à la norme NF B 57-010 [54].

D'après la figure 4.1, on constate que les déchets du liège expansé contiennent 8 % de poudre, ceci est du principalement au changement de la nature du liège expansé. Par contre les déchets de liège cru ont un pourcentage très faible, il est environ de 0.2 %. Le liège expansé est friable, donc il peut engendrer une quantité de fines, par contre le liège cru se comporte comme une matière spongieuse, ce qui explique le faible pourcentage de la poudre du liège cru.

Après fractionnement, les granulats de liège ont été criblés afin d'obtenir deux fractions granulaires, nous avons choisi la fourchette granulaire qui étale entre 2 et 5 mm pour le liège cru et 2 à 6.3 mm pour le liège expansé. Par contre, pour la poudre de liège expansé, nous avons choisi un diamètre inférieur à 0.25 mm. Ces granulats sont utilisés pour confectionner le matériau composite ciment /Liège.

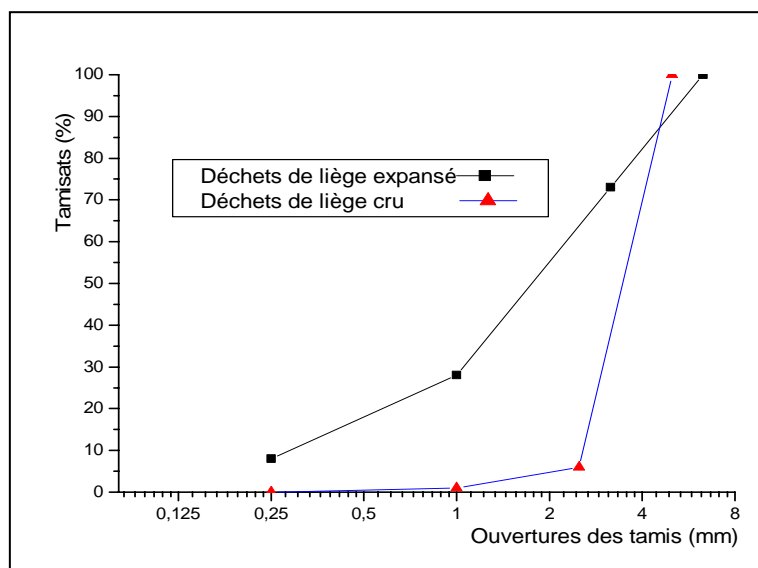


Figure 4.1 : Analyse granulométrique des deux granulats du liège

iii) Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des déchets de liège expansé et cru ainsi que la poudre du liège a été effectuée conformément à la norme française B 57-0.12 [55]. L'échantillon de l'essai est conditionné à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ dans une atmosphère d'humidité relative de $65 \pm 5\%$ pendant 24 heures. Une masse est prélevée au hasard de l'échantillon global selon la norme NF B 57- 014 [56]. L'essai est effectué à l'aide d'un appareil spécifique, ce dernier est constitué d'un récipient de 2 dm^3 du volume. On verse la prise d'essai des granulats de façon à remplir la trémie, la base inférieure de cette dernière doit être fermée, on ouvre ensuite totalement le fond de la trémie, afin de permettre aux granulats de tomber dans le récipient, par la suite, on arase la surface par une règle en bois. Les granulats de déchets de liège sont pesés seuls à l'aide d'une balance d'une précision 0.5 g. 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 d'essai et la moyenne arithmétique des cinq essais est la masse volumique apparente qui doit être prise comme résultat final. Les résultats des essais sont récapitulés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Les valeurs de la masse volumique apparente des débris du liège

N° de l'échantillon	Masse volumique apparente du liège expansé (kg/m ³)	Masse volumique apparente du liège cru (kg/m ³)	Masse volumique apparente de poudre du liège expansé (kg/m ³)
1	169	139	156
2	168	140	157
3	170	142	156
4	168	143	158
5	169	141	157
Moyenne	169	141	157

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 4.5, on remarque que la masse volumique apparente des granulats du liège expansé est nettement supérieure à celle des granulats de liège cru et de la poudre du liège expansé.

iv) Détermination de l'humidité des granulats de liège

Afin d'obtenir le taux de l'humidité des granulats de déchets de liège, nous avons effectué l'essai conformément à la norme NF B 57-013 [57]. Trois échantillons pris au hasard de 100 g chacun, cette opération est effectuée selon les prescriptions de la norme NF B57-014 [58]. 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 est poursuivi jusqu'à ce que les résultats de deux pesées successives, effectués à deux heures d'intervalles 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. La moyenne arithmétique des résultats obtenus sur les trois prises d'essai est prise comme résultat final de cette expérimentation.

Les résultats des trois prises d'essai sont calculés par la formule (4.1) :

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

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.

Les résultats de l'essai sont récapitulés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Résultats de taux de l'humidité pour débris du liège

Nombre d'essai	L'humidité (%) granulats du liège expansé	L'humidité (%) granulats du liège cru
1	9	9
2	10	10
3	10	9
Moyenne	10	9

D'après les résultats de tableau 4.6, on remarque que le taux de l'humidité des granulats de liège expansé est légèrement supérieur à celle des granulats de liège cru. D'après la norme de caractérisation physique et mécanique de bois NF B 51-002 [58], les granulats de liège sont anhydres (sans eau), puisque le taux de l'humidité est inférieur à 13%.

v) Taux d'absorption d'eau par les grains de liège

L'absorption d'eau par les granulés du liège a été déterminée sur une période de 24 heures, trois essais ont été réalisés sur des échantillons d'une masse de 50g. Les granulés du liège sont séchés pendant 24 heures à une température de 103°C. Ensuite, ils sont plongés dans l'eau dans des passoires dont le diamètre est inférieur à ceux de granulats à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative de $65 \pm 5\%$. Afin de permettre aux granulats de s'égoutter librement, nous avons placés les échantillons dans des passoires pendant 24 heures. Pour ne pas permettre à l'eau de s'évaporer, les échantillons ont été couverts par des sachets en plastique. Le taux d'absorption d'eau par les déchets de liège est calculé par la formule (4.2) :

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

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.

Le taux d'absorption des granulats du liège pendant 24 heures est regroupé dans le tableau 4.7.

Tableau.4.7 : Résultats des essais d'absorption pendant 24 heures pour une masse de 50 g

Nombre d'échantillons	Masse initiale M_1 (g)	Granulats expansés M_2 (g)	Granulats cru (M_2) (g)	Absorption A (%) expansé	Absorption A(%) cru
1	50	123.6	128.2	147.2	156.4
2	50	118.8	126.7	137.6	153.4
3	50	120.6	125.8	142.1	151.6
moyenne				142.0	153.8

D'après les résultats mentionnés dans les tableau 4.7, on remarque que les granulats de liège cru absorbent une quantité d'eau d'environ 1.5 fois du poids utilisé, par contre les déchets du liège expansé 1.4 fois du poids. Ceci nous permis de dire que le liège cru absorbe une quantité d'eau pendant 24 heures supérieure à celle absorbée par le liège expansé. On constate d'après ces résultats que le taux d'absorption d'eau des grains du liège est très élevé en raison de leur caractère hydrophile.

4.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du matériau composite ciment/ Liège est une eau potable du robinet.

4.3. Préparation du mélange (Ciment / Liège)

Trois mélanges Ciment / Liège : 1/1, 1/2 et 1/3 (rapport Ciment / Liège, en volume) ont été utilisés pour la confection des éprouvettes du matériau composite à base du liège. Le ciment et le liège sont mélangés entièrement sec en volume, l'eau est versée dans la cuve du malaxeur, le mélange du ciment et du liège est ajouté par la suite dans le malaxeur normalisé [59], le temps de malaxage de ce mortier est de 3 minutes.

Le matériau composite obtenu est placé dans des moules prismatiques 4x4x16cm et à l'aide de la table à secousses selon la norme française NF P15-412 [60]. La surface du matériau composite est nivelée par une règle métallique et les moules sont conservés dans une salle de conservation à une température de 20 ± 2 °C avec une humidité relative de $65\pm 5\%$ pendant 24 heures. Après cette période, on procède au démoulage des éprouvettes, ces dernières sont conservées dans l'eau pour l'essai de gonflement, les éprouvettes destinées aux essais du retrait sont conservées à l'air libre à l'intérieur du laboratoire.

La plasticité de ce matériau composite n'est pas mesurable par les méthodes utilisées pour les bétons et ces compositions sont caractérisées seulement par leurs rapports E/C.

4.4. Essais effectués sur les matériaux composites

4.4.1. Essais préliminaires

Dans cette partie, nous avons varié plusieurs paramètres, les déchets de liège, le rapport E/C et le rapport volumétrique Ciment/Liège. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm. Les essais réalisés dans cette étape auront pour but de déterminer les compositions optimales sur la base de la masse volumique, la résistance à la compression et la consistance normale du mélange. La consistance du matériau composite est observée à chaque confection des éprouvettes.

i) Méthode de cure et de conservation des éprouvettes

La conservation des éprouvettes du matériau composite ciment/ Liège est différente du mortier normalisé, les granulats ont des propriétés physiques différentes des autres granulats. Afin de trouver les conditions idéales de conservation des éprouvettes, nous avons utilisé la composition dont le volume du ciment et de déchets de liège cru sont égales (1/1), avec un rapport E/C égal à 0.40. Nous avons confectionné 42 éprouvettes et la conservation de ces dernières est effectuée différemment. La procédure de conservation est exécutée par la méthode suivante :

- ✓ CE1 : conservation continue dans l'eau pendant 1 jour et le reste à l'air libre du laboratoire
- ✓ CE3 : conservation dans l'eau pendant 3 jours et le reste à l'air libre du laboratoire

- ✓ CE7 : conservation dans l'eau pendant 7 jours et le reste à l'air libre du laboratoire
- ✓ CE14 : conservation dans l'eau pendant 14 jours et le reste à l'air libre du laboratoire
- ✓ CE21 : conservation dans l'eau pendant 21 jours et le reste à l'air libre du laboratoire
- ✓ CE : conservation continue dans l'eau pendant 28 jours.

Les essais de flexion et de compression ont été effectués pour chaque âge de conservation ; 1, 3, 7, 14, 21 et 28 jours. Ils ont été réalisés sur une période de 28 jours à l'exception des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 14 jours, nous avons étalé cette période jusqu'à 35 jours.

ii) Essai de rupture par flexion

La contrainte de traction par flexion est déterminée conformément à la norme européenne EN 196-1 [61]. L'essai est réalisé sur un appareil de flexion sur des éprouvettes 4x4x16cm. L'appareil est disposé de deux rouleaux sur lesquels les éprouvettes sont appuyés, et d'un autre rouleau qui est destiné à appliquer un moment fléchissant à mi-travée. 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, 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 (4.3) :

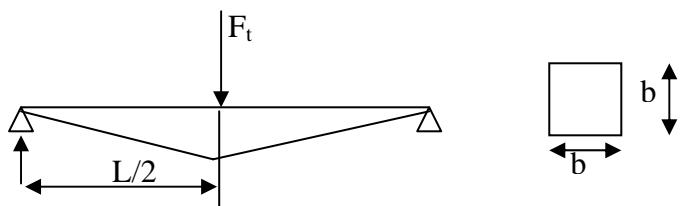
$$R_t (\text{N/mm}^2) = \frac{1.5 F_t \cdot L}{b^3} \quad (4.3)$$


Figure 4.2 : Schéma de rupture par flexion

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 ($b=40\text{mm}$)

iii) Essai de rupture par compression

L'essai a été réalisé sur les deux morceaux obtenus après la rupture de l'éprouvette en traction par flexion.

Le dispositif et 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 4x4 cm. L'expérience a été menée conformément à la norme européenne EN 196-1 [61].

4.4.2. Essai de retrait sur le matériau composite

Le retrait est un phénomène physique du essentiellement à l'évaporation de l'eau contenue dans les éprouvettes. Les éprouvettes subissent une diminution du volume apparent, qui provoque des fissures plus au moins importantes. Ce phénomène est régi par deux facteurs, la quantité de l'eau de gâchage et la rigidité du squelette granulaire.

L'essai a été effectué conformément à la norme française NF P15-433 [62]. Les éprouvettes utilisées dans cette expérience sont de dimension 4 x 4 x 16cm, elles ont été conservées dans une salle de conservation dont la température est de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et l'humidité relative de $60\pm 5\%$. Le retrait a été mesuré à l'aide d'un retractomètre conformément à la norme française NF P15-433 [62]. La variation dimensionnelle a été mesurée en fonction du temps à 3, 7, 14, 28 et 90 jours.



Figure 4. 3 : Appareil utilisé pour la mesure de la variation dimensionnelle (Retrait et gonflement)

4.4.3. Essai de gonflement

L'essai de gonflement consiste à mesurer par un retractor à 3, 7, 14, 28 et 90 jours la variation de longueur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm. Ces dernières ont été conservées dans l'eau pendant la période de l'essai.

4.4.4. Gain et perte de masse

En plus du retrait et du gonflement, on peut mesurer la variation de masse après chaque mesure de longueur des éprouvettes. Le gain et la perte de masse sont désignés respectivement par la quantité de l'eau absorbée ou hydratée par le matériau. Les éprouvettes ont été pesées à chaque fois qu'elles sont sorties de l'environnement de cure. La pesée est effectuée à 3, 7, 14, 28 et 90 jours à l'aide d'une balance électronique d'une précision 1/100 g.

4.4.5. Essai d'absorption par capillarité

Le but de cet essai est d'évaluer la capacité d'absorption d'eau du matériau composite Ciment /Liège. L'expérience est effectuée sur des éprouvettes 4 x 4 x 16cm préalablement séchées à l'étuve jusqu'à un poids constant. Ensuite, on place les éprouvettes dans une enceinte climatique de température de 20 °C avec un taux d'humidité relative de 65%. Le principe consiste à poser la section transversale de l'éprouvette en contact avec l'eau dans un bac où la profondeur d'immersion a été maintenue constante pendant l'essai. Cette expérience est réalisée sur une durée de 90 minutes conformément à la norme EN 480-5 [63].

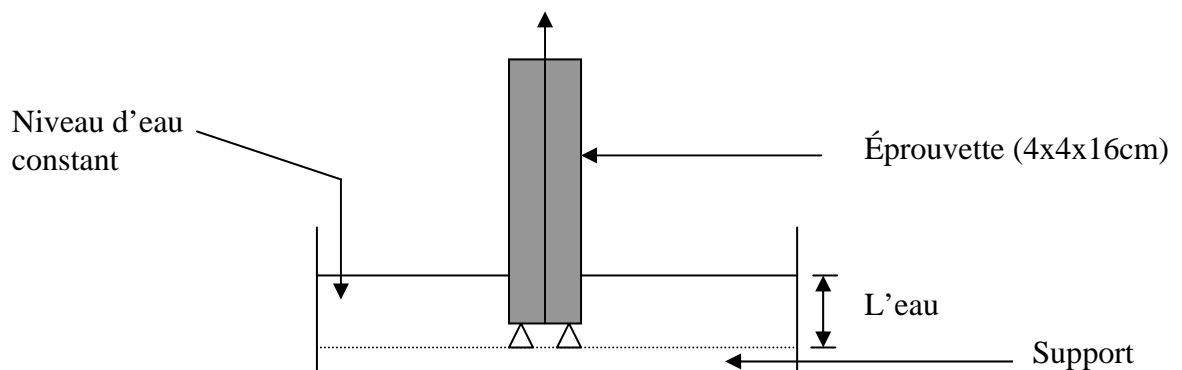


Figure 4.4: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

4.4.6. Essai d'absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau par immersion du matériau composite a été effectuée sur des éprouvettes 4x4x16 cm. L'essai consiste à mettre les éprouvettes dans une étuve jusqu'à un poids constant, ensuite les immerger dans l'eau pendant 24 heures. Cette expérience a été réalisée sur trois éprouvettes, la moyenne arithmétique de trois résultats caractérise la valeur du coefficient d'absorption d'eau par immersion. Pour chaque éprouvette du matériau composite, on calcule le coefficient d'absorption d'eau par la formule (4.4) :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} 100 \quad (4.4)$$

Avec :

M_s : masse de l'éprouvette sèche,

M_a : masse de l'éprouvette après saturation.

4.4.7. Essai thermique sur le matériau composite

Afin de mesurer le coefficient de la conductivité thermique λ du matériau composite Ciment/Liège, nous avons utilisé le CT-METRE. Des éprouvettes de dimensions 20x10x4 cm ont été confectionnés. Ces dernières ont été conservées dans une étuve pendant 24 heures à une température de 103°C. Ensuite, conservées dans un dessiccateur pendant une journée avant d'être passés à l'essai. Le nombre d'éprouvettes utilisés pour chaque composition est de six, la détermination de λ se fait entre deux échantillons, et la moyenne de trois résultats trouvés est la valeur retenue de l'essai.



Figure 4.5: L'appareil de mesure de la conductivité thermique (CT-METRE)

4.4.8. Essai acoustique sur le matériau composite

Autre caractéristique recherchée du matériau composite Ciment /Liège est l'isolation acoustique. L'objectif de cette expérience est de mesurer le coefficient d'absorption acoustique (α), ce dernier étant le rapport de l'énergie acoustique absorbée à l'énergie acoustique incidente. La valeur de (α) est comprise entre 0 et 1. Elle tend vers 0 pour une paroi lisse, dure et lourde, donc très réfléchissante. Elle est égale à 1 pour une fenêtre ouverte [64]. Ce coefficient dépend de la paroi et de la hauteur du son incident, les matériaux ne réfléchissent pas uniformément toutes les fréquences sonores, certains matériaux absorbent préférentiellement l'aigu, d'autres absorbent mieux le grave ou le médium. L'essai a été réalisé conformément au DTR C3.1.1 sur les six bandes d'octaves 125 Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000 Hz et 4000 Hz. Les fréquences perçues par homme se situent généralement entre 20 et 16000 Hz, les fréquences graves de 20 à 400Hz, les fréquences moyennes de 400 à 1600 Hz et les fréquences aiguës : de 1600 à 16000 Hz.

L'expérience a été réalisée par un appareil à double microphone (4206) disponible au niveau du CNERIB. Des éprouvettes cylindriques de diamètres 29 et 100 mm et de 50 mm de hauteur ont été élaborées pour déterminer le coefficient d'absorption acoustique (α). Cet appareil est utilisé pour mesurer les paramètres acoustiques des petits échantillons dans une gamme de fréquence de 50 Hz à 6,4 KHz. Il est constitué de deux tubes, le petit tube est monté directement sur le grand tube en utilisant des vis de sécurité sur un support réglable de manière à ce que la moitié du tube soit inséré dans le grand tube. Un bloc tubaire de mousse est placé et fortement fixé entre l'intérieur du petit tube et l'extérieur du grand tube. Chaque tube de mesure porte son propre échantillon. L'échantillon est mis à une extrémité du tube et à l'autre extrémité un signal est généré par une source sonore. La figure 4.6 nous montre l'appareil utilisé pour mesurer le coefficient de l'absorption acoustique (α).

La méthode de mesure du coefficient d'absorption acoustique consiste en la décomposition d'un pseudo signal stationnaire d'une large bande en des composants d'incidence (P_I) et de réflexion (P_R). Les composants réfléchis et d'incidence sont déterminés à partir de la relation entre la pression acoustique mesurée par un microphone à deux endroits sur la paroi du tube (voir figure 4.6). Le coefficient d'absorption acoustique (α) est donnée directement par cet appareil.



Figure 4.6 : L'appareil de mesure de l'absorption acoustique (double microphone 4206)

4.4.9. Essai de faisabilité du matériau composite

L'objectif principal de cette partie d'étude est de tester la faisabilité du matériau composite. Pour ce faire, des blocs de dimension 110x 230x 85 mm ont été confectionnés par une presse manuelle destinée à la fabrication du Béton de Terre Stabilisée (B.T.S). L'utilisation de cette presse est simple, elle est constituée d'un moule, dont le fond est mobile qui nous permet d'avoir des épaisseurs variées de 35 à 85 mm, d'un couvercle qui peut subir un mouvement de translation pour l'ouverture et la fermeture, et d'un levier prolongé par une barre d'acier. Le démoulage des éprouvettes se fait par un piston à déplacement vertical.

Afin de confectionner des éprouvettes dont les dimensions du moule de la presse, un malaxeur qui peut contenir les quantités nécessaires des matériaux employés a été conçu au niveau du CNERIB. Ce dernier, possède un axe horizontal qui nous permet de malaxer sans la crainte d'une ségrégation éventuelle des matériaux utilisés.

Le ciment et le liège ont été mélangés à sec dans le malaxeur, ensuite on ajoute de l'eau. Une fois le mélange est préparé, nous procédons au remplissage du moule à l'aide d'une pelle, et après on ferme le moule par translation du couvercle. Après durcissement des blocs, on éjecte les blocs par un levier vertical.

Le matériau composite Ciment/Liège est un matériau poreux qui peut engendrer la pénétration de l'eau pluviale, pour remédier à ce problème, nous avons appliqué un enduit en mortier du ciment sur les deux faces du bloc.

Pour vérifier l'adhérence de l'enduit appliqué sur la surface du bloc, nous avons effectué un essai d'arrachement sur ces blocs après 28 jours de l'application de l'enduit. L'enduit en ciment est réalisé selon le DTU 26-1 et la norme française P 15-201-1 [65]. Le support des blocs sont dépoussiérés et humidifiés avant l'application de l'enduit. Trois couches de l'enduit du ciment ont été réalisées, la première couche (gobetis) est dosée à 400 kg/m^3 de sable sec, ce dernier à une granulométrie de 0/3 qui contient peu d'élément fin qui doit être rêche ou creux pour permettre à la deuxième couche de s'adhérer facilement. L'épaisseur de la première couche est de 3 mm. La deuxième couche a été appliquée après 48 heures de l'application de la première couche. Elle a été appliquée sur le gobetis ré-humidifié mais non ruisselant et de dosage de cette couche est de 300 à 350 kg/m^3 de sable sec et l'épaisseur moyenne cumulée des deux première couches est comprise entre 15 mm et 20 mm. La surface de la deuxième couche est rugueuse pour permettre l'application de troisième couche. Le sable utilisé est un granulat 0/3 qui comporte 5 % de fines. Par contre, la troisième couche ou couche de finition a été dosée entre 250 et 300 kg/m^3 de sable sec, ce dernier est riche en éléments fins. Cette dernière couche a été appliquée pour assurer le corps d'enduit et contribue à la conservation de l'imperméabilité du corps. L'épaisseur de la couche de finition est comprise entre 5 et 7 mm. Elle a été talochée fin mais non lissée et le délai d'application de la couche de finition est de 4 à 7 jours.

4.5. Variables étudiées

Plusieurs paramètres ont été variés pour déterminer les propriétés mécaniques, physiques et thermo-physiques des matériaux composites Ciment/Liège. Le programme expérimental a nécessité la confection de 135 éprouvettes pour la phase préliminaire et 18 éprouvettes pour la phase finale. Les variables étudiées et les essais effectués dans notre étude expérimentale sont récapitulés sur la figure 4.7.

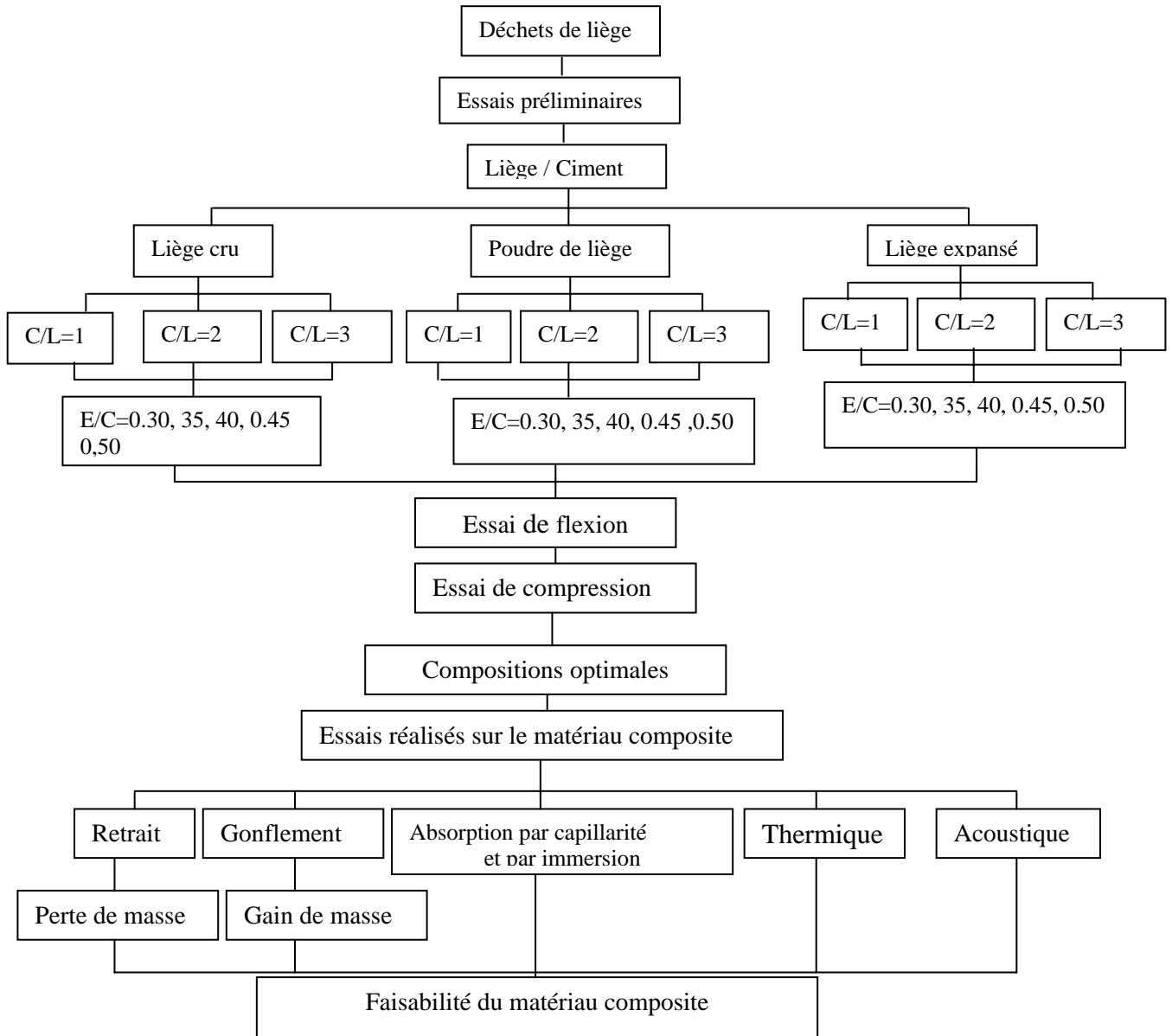


Figure 4.7 : Les variables étudiées et essais réalisés dans partie expérimentale

CHAPITRE 5

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, on donne les résultats des essais expérimentaux obtenus sur le matériau composite Ciment/ Liège. Des analyses et des discussions des résultats ont été exposées dans cette partie.

5.2. Essais préliminaires sur le matériau composite

5.2.1. Introduction

L'objectif de ces essais est d'une part de déterminer la méthode appropriée de conservation des éprouvettes du matériau composite Ciment/Liège et d'autre part, choisir la composition optimale de ce matériau qui doit répondre à certains critères tels que la résistance à la compression et la consistance du mélange.

Trois pourcentages en volume du liège ont été utilisés 50 %, 67 % et 75 % en fonction du volume du ciment. Pour la confection du matériau composite Ciment / Liège, on a utilisé trois types du liège, liège expansé, liège cru et la poudre du liège expansé. Le rapport pondéral Eau/Ciment a été aussi varié dans le but de chercher une consistance normale de ce matériau composite.

5.2.2. Effet de l'environnement de cure sur la résistance à la compression

Après confection des éprouvettes de la composition A₀₃ (C/L =1), nous avons conservé ces dernières dans une salle de conservation pendant 24 heures. Ensuite, on a procédé au démoulage de ces éprouvettes. La conservation de ces dernières se fait dans un milieu humide (HR =100 % à T = 20°C) pendant 1 jour, 3, 7, 14 ou 21 jours suivi d'une cure à l'intérieur du laboratoire à l'air libre à 65±5 % de l'humidité et à une température de 20±2°C. Le tableau 5.1 nous donne la résistance à compression en fonction de la méthode de cure et la figure 5.1 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les éprouvettes conservées d'une façon continue dans l'eau. On remarque qu'il y a un développement continu de la résistance à la compression en fonction du temps, et la résistance maximale est obtenue pour les éprouvettes conservées dans l'eau pendant 14 jours.

Tableau 5.1 : La résistance à la compression en fonction de la méthode cure

Conservation dans l'eau	Résistance à la compression (MPa)					
	1 j	3 j	7 j	14 j	21 j	28 j
1 j	4,41(0.55)*	-	-	-	-	-
3 j	-	4,75 (0.30)	-	-	-	-
7 j	-		7,33 (0.37)	-	-	-
14 j	8,91 (0.67)	8,92 (0.28)	-	10,29(0.30)	-	-
21 j	-	-	-	-	9,21(0.52)	-
28 j	9,77 (0.78)	10,25(0.17)	10,29 (0.64)	10,62(0.84)	8,35(0.42)	8,63(0.65)

()* : Écart type

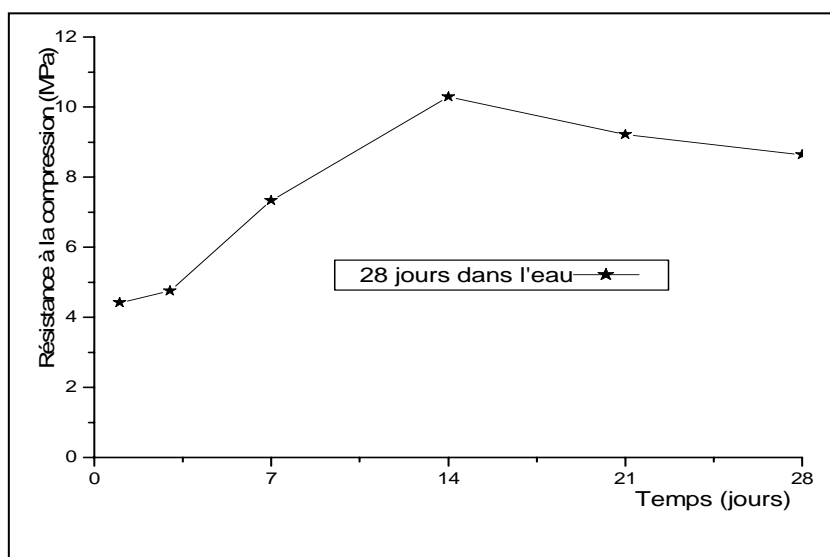


Figure 5.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps (environnement CE)

La figure 5.2 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps de cure humide dans l'eau pendant 1, 3, 7, 14 et 21 jours. On remarque d'après cette figure que la résistance à la compression augmente avec l'âge et avec l'augmentation de la durée de cure humide initiale dans l'eau. Cette augmentation est due à l'hydratation continue du ciment. La durée de cure humide pendant 14 jours semble être la durée optimale pour avoir la plus grande résistance à la compression. Ceci peut être due à la quantité d'eau contenue dans les éprouvettes à base du liège, cette quantité d'eau est suffisante pour hydratation et le durcissement du ciment.

L'augmentation de la durée de cure au delà de 14 jours n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Au contraire, une diminution de la résistance a été observée. Cette diminution est due à la grande quantité d'eau absorbée par le matériau composite et par conséquent ceci retarde l'hydratation du ciment et diminue la résistance à la compression du composite.

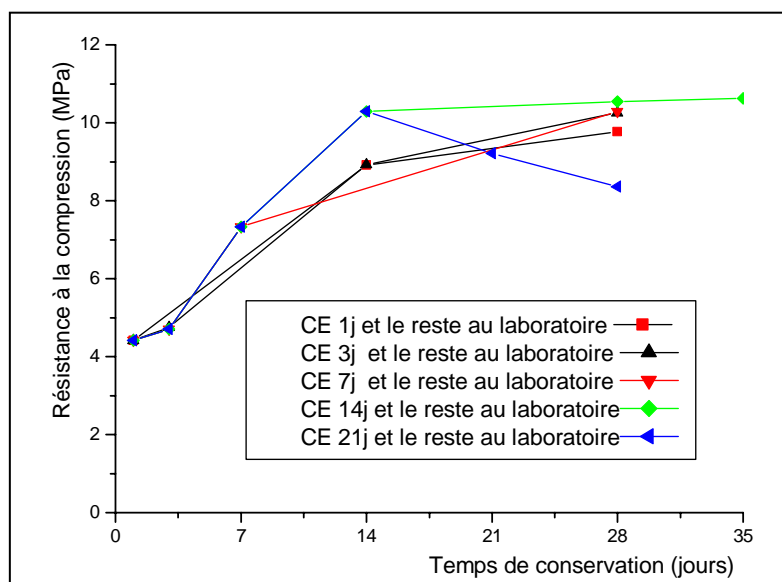


Figure 5.2 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans les différents environnements de cure

La figure 5.3 résume les résultats obtenus de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la durée de cure humide. On remarque d'après cette figure que la résistance maximale à la compression est obtenue pour les éprouvettes conservées dans l'eau pendant 14 jours, et au delà de 14 jours de conservation dans l'eau nous donne une diminution de la résistance à la compression. Une durée de cure humide optimale de 14 jours suivi d'une cure au laboratoire est aussi trouvé par d'autres chercheurs pour le béton colloïdal léger de billes de polystyrène expansé, le béton et le mortier à base de palmier dattier et le béton du liège utilisant des granulats de liège provenant de recyclage de l'emballage de fruits [15, 35, 66]. Cette méthode de cure a été adoptée pour le reste du programme expérimental.

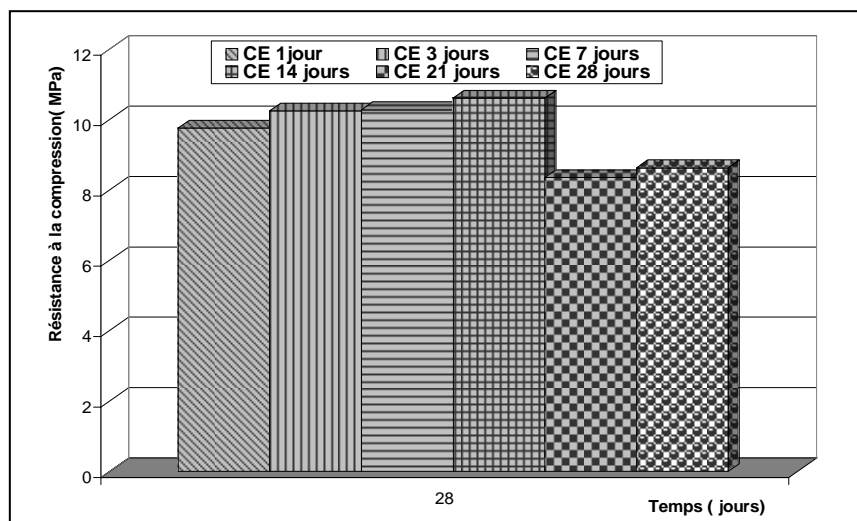


Figure 5.3 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la durée de cure humide

5.2.3. Matériau composite à base des granulats de liège expansé

i) Consistance du mélange

Après malaxage du mélange du matériau composite Ciment/Liège expansé, nous avons constaté que l'ouvrabilité du mortier diminue avec l'ajout du liège. Seules les compositions A₀₃, A₁₀ et A₁₅ ont une consistance normale. Par contre, les compositions A₀₄ et A₀₅ sont molles et les compositions A₀₆ à A₀₉ et A₁₁ à A₁₄ sont sèches (tableau 5.1). Les éprouvettes dont la consistance est sèche peuvent être damées mais les caractéristiques d'isolations seront diminuées. Les compositions molles du matériau composite Ciment/Liège engendrent une ségrégation lorsque la quantité d'eau employée est importante. Cette consistance crée une ségrégation des matériaux et cela peut être vérifiée lors de l'écrasement des éprouvettes à la compression ou à la flexion.

ii) Masse volumique du matériau composite (liège expansé)

Le tableau 5.2, nous donne la masse volumique apparente du matériau composite ciment/ granulats du liège expansé à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes sont conservées dans l'eau pendant 14 jours et le reste à l'air libre. On remarque que l'ajout de liège réduit considérablement la masse volumique du matériau composite.

Tableau 5.2 : La masse volumique apparente en fonction du rapport E/C et du rapport C/L

Compositions	Ciment/Liège expansé (C/L)	E/C	Masse volumique apparente (kg/m ³)
A ₀₁ } A ₀₂ } A ₀₃ } A1 A ₀₄ } A ₀₅ }	1/1 1/1 1/1 1/1 1/1	0.30 0.35 0.40 0.45 0.50	1572 (71)* 1569 (14) 1493 (65) 1380 (23) 1359 (18)
A ₀₆ } A ₀₇ } A ₀₈ } A2 A ₀₉ } A ₁₀ }	1/2 1/2 1/2 1/2 1/2	0.30 0.35 0.40 0.45 0.50	776 (32) 1037 (40) 1097 (31) 1122 (12) 1086 (62)
A ₁₁ } A ₁₂ } A ₁₃ } A3 A ₁₄ } A ₁₅ }	1/3 1/3 1/3 1/3 1/3	0.30 0.35 0.40 0.45 0.50	614 (10) 690 (28) 728 (22) 752 (03) 782 (66)

()* : Écart type

D'après le tableau 5.2, on remarque que la masse volumique apparente du matériau composite ciment/Liège expansé des compositions dont le volume du ciment est égal au volume du liège (A₁) dépasse 1200 kg/m³, et peut être classé dans les bétons légers isolants porteurs [7, 67]. Les figures 5.4 et 5.5 représentent respectivement l'évolution de la masse volumique apparente en fonction du rapport E/C et la masse volumique en fonction de la concentration du liège expansé dans le matériau composite. On remarque sur la figure 5.5 que la masse volumique apparente diminue en fonction de l'ajout de granulats du liège. La valeur maximale de la masse volumique apparente est obtenue pour la composition A₀₁ (1/1) qui est de 1572 kg/m³. Ceci est prévisible car la masse volumique du liège est nettement inférieure à celle du ciment.

L'augmentation du rapport E/C pour un rapport C/L constant (figure 5) diminue la masse volumique apparente pour un C/L=1 mais un effet continue pour C/L=1/2 et 1/3. Ceci est du probablement au saturation du ciment pour le rapport C/L=1. Par contre, les compositions dont les rapports C/L=1/2 et 1/3 demandent plus d'eau et par conséquent l'hydratation du ciment continue pendant une durée plus longue avec la disponibilité d'une

quantité d'eau plus importante avec un rapport E/C plus élevée. La poursuite de l'hydratation pendant une période plus longue améliore la compacité du matériau.

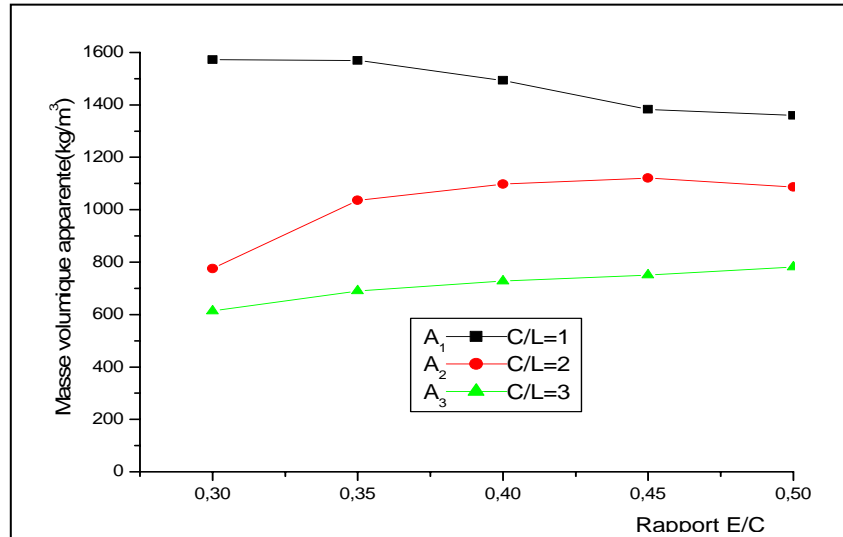


Figure 5.4 : Evolution de la masse volumique en fonction du rapport E/C (Granulats du liège expansé)

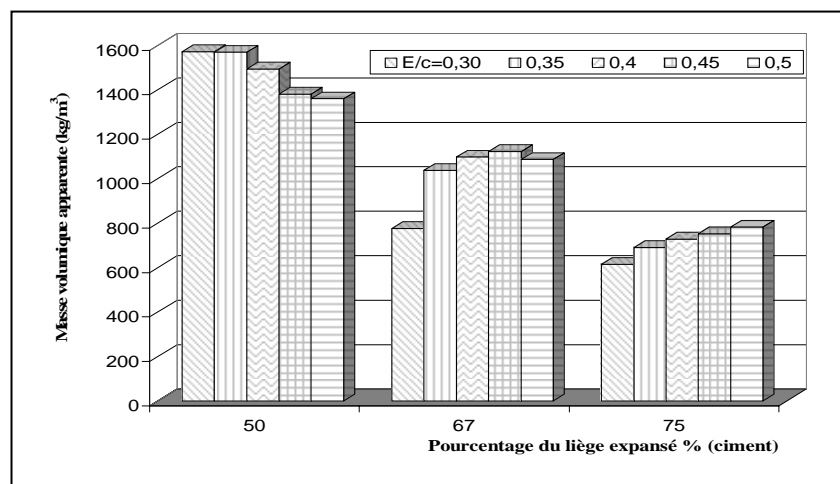


Figure 5.5 : Evolution de la masse volumique en fonction du pourcentage du liège expansé

iii) Résistance à la compression du matériau composite (liège expansé)

Le tableau 5.3 on donne la résistance à la compression à 28 jours du matériau composite à base de granulats de liège expansé en fonction du rapport E/C et du rapport C/L.

Tableau 5.3 : Résistance à la compression en fonction du rapport E/C et du rapport volumique C/L

Compositions	Ciment/Liège expansé (C/L)	E/C	Résistance à la compression (MPa)	
A ₀₁ } A ₀₂ } A ₀₃ } A1 A ₀₄ } A ₀₅ }	1/1 1/1 1/1 1/1 1/1	0.30 0.35 0.40 0.45 0.50	15.02 14.76 14.59 12.26 10.33	(2.46)* (0.32) (1.21) (0.50) (0.28)
A ₀₆ } A ₀₇ } A ₀₈ } A2 A ₀₉ } A ₁₀ }	1/2 1/2 1/2 1/2 1/2	0.30 0.35 0.40 0.45 0.50	1.49 3.87 5.72 5.05 4.91	(0.14) (0.18) (0.57) (0.81) (0.29)
A ₁₁ } A ₁₂ } A ₁₃ } A3 A ₁₄ } A ₁₅ }	1/3 1/3 1/3 1/3 1/3	0.30 0.35 0.40 0.45 0.50	0.80 1.28 1.82 2.21 2.39	(0.05) (0.05) (0.09) (0.13) (0.24)

()* : Écart type

D'après la figure 5.6, on voit que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du volume des granulats du liège. Cela est dû à l'augmentation des vides et par conséquent la compacité du matériau est diminuée. A titre exemple, la résistance maximale est obtenue avec la composition A₀₁, mais elle chute d'environ 90 % et de 95 % respectivement de la composition A₀₆ et A₁₁ pour un rapport E/C égal à 0.30. Cette chute est due principalement à la quantité d'eau qui est insuffisante et engendre un ralentissement de l'hydratation du ciment.

L'allure de la variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C (figure 5.7) est similaire à celle observée pour la masse volumique apparente (figure 5.4). L'augmentation du rapport E/C pour la composition ou C/L =1 réduit la résistance à la compression car la présence d'un excès d'eau s'évapore laissant des vides qui font chuter la résistance à la compression. Par contre, lorsque C/L=1/2 où 1/3, un excès d'eau est bénéfique car une partie sera absorbée par le liège et l'hydratation continue avec un effet bénéfique sur la résistance à la compression.

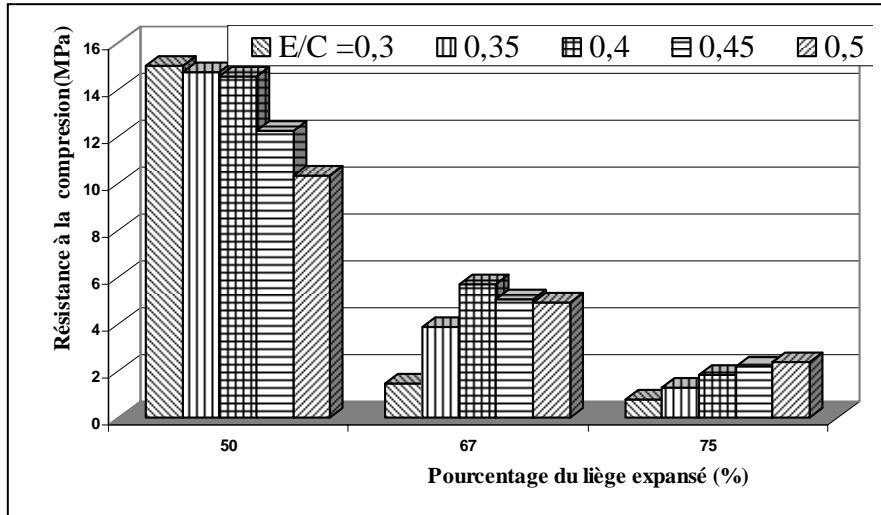


Figure 5.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage du liège expansé

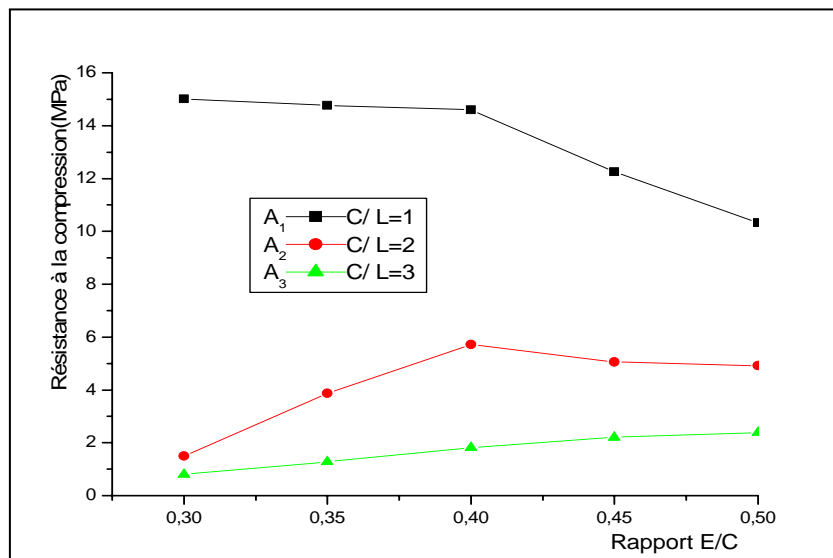


Figure 5.7 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C (liège expansé)

iv) Résistance à la flexion du matériau composite

La résistance à la flexion à 28 jours pour les différentes compositions étudiées est donnée par le tableau 5.4 et les figures 5.8 et 5.9.

Tableau 5.4: La résistance à la flexion en fonction du rapport E/C
et du rapport volumique C/L

Compositions	Ciment/Liège expansé (C/L)	E/C	Résistance à la flexion (MPa)	
A ₀₁ } A ₀₂ } A ₀₃ } A ₀₄ } A ₀₅ }	1/1	0.30	3.13	(0.44)*
	1/1	0.35	2.92	(0.33)
	1/1	0.40	2.55	(0.10)
	1/1	0.45	2.44	(0.06)
	1/1	0.50	2.13	(0.18)
A ₀₆ } A ₀₇ } A ₀₈ } A ₀₉ } A ₁₀ }	1/2	0.30	0.45	(0.09)
	1/2	0.35	1.07	(0.08)
	1/2	0.40	1.56	(0.01)
	1/2	0.45	1.70	(0.03)
	1/2	0.50	1.34	(0.11)
A ₁₁ } A ₁₂ } A ₁₃ } A ₁₄ } A ₁₅ }	1/3	0.30	0.27	(0.02)
	1/3	0.35	0.39	(0.02)
	1/3	0.40	0.43	(0.04)
	1/3	0.45	0.45	(0.02)
	1/3	0.50	0.67	(0.04)

()* : Écart type

D'après les figures 5.8 et 5.9, on constate que la résistance à la flexion du matériau est faible en comparaison à un mortier ordinaire. En effet, la valeur maximale de flexion est obtenue sur la composition A₀₁ avec un rapport E/C égal à 0.30 et chute d'environ 86 % et de 91 % respectivement par rapport aux compositions A₀₆ (C/L = 1/2) et A₁₁ (C/L = 1/2) pour le même rapport E/C.

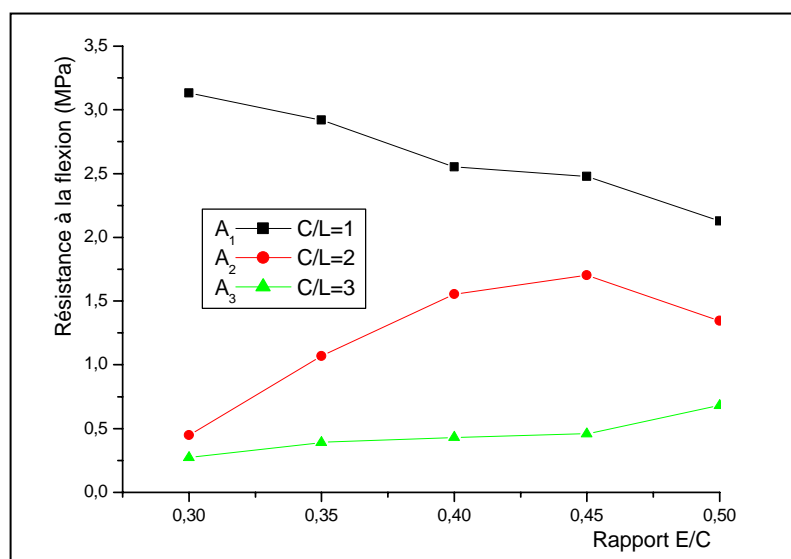


Figure 5.8 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du rapport E/C
(Liège expansé)

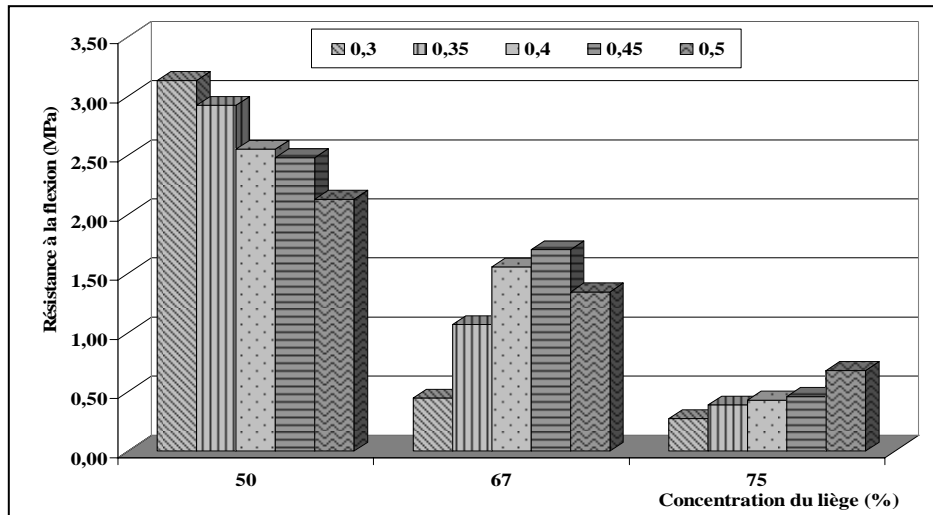


Figure 5.9: Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du liège expansé

v) Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion

Pour montrer la relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion, nous avons essayé de trouver une corrélation entre eux. La figure 5.10 présente la corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion pour les différentes compositions. La relation M.BONZEL de type puissance ($F_t = 0.23 F_c^{0.67}$) semble sous-estimer la résistance à la flexion avec un coefficient de corrélation $R = 0.88$. Un meilleur coefficient de corrélation de 0.97 est trouvé avec la relation (5.1).

$$R_t = 0.31 R_c^{0.84}; \quad (R_c \text{ en MPa}) \quad (5.1)$$

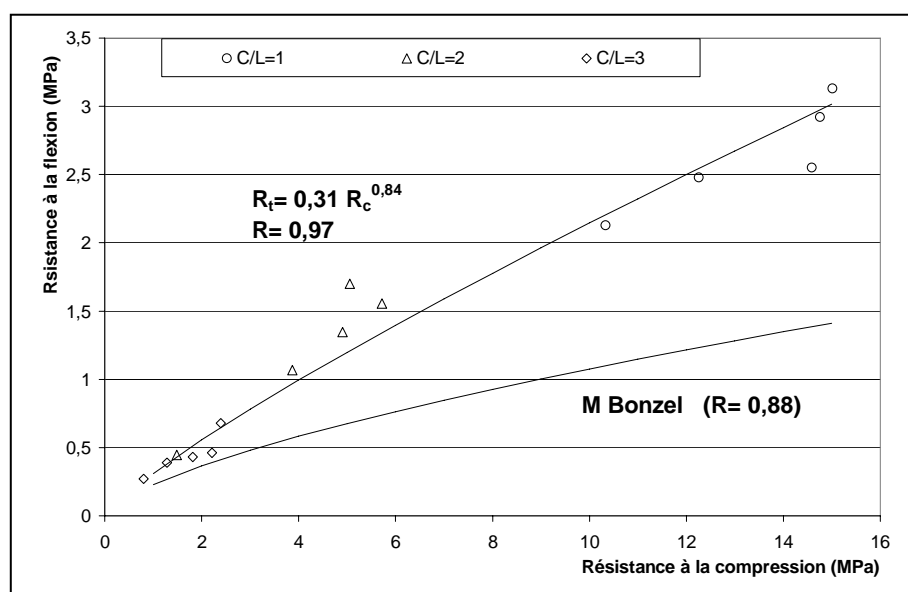


Figure 5.10 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion pour les différents rapports E/C

vi) Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente

Une relation linéaire est proposée entre la résistance à la compression 'Rc' et la masse volumique apparente 'M' pour les différentes compositions et pour les différents rapports E/C. On remarque que la résistance à la compression augmente avec la masse volumique pour toutes les compositions étudiées. La relation (5.2) estime la résistance à la compression d'une manière satisfaisante avec un coefficient de corrélation $R = 0,97$.

$$R_c \text{ (MPa)} = -10,16 + 0,016 M ; \quad (M \text{ en kg/m}^3) \quad (5.2)$$

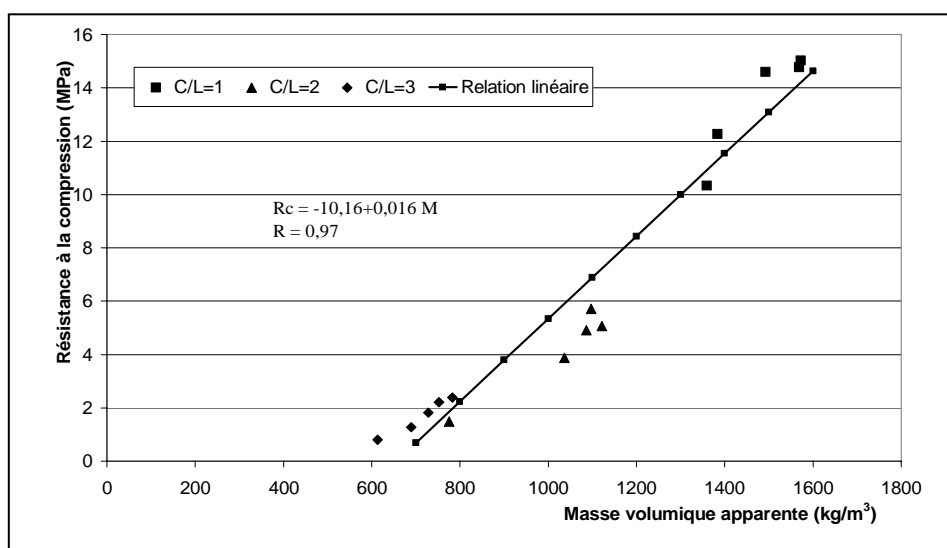


Figure 5.11 : Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique pour les différents rapport E/C (liège expansé)

5.2.4. Matériau composite à base des granulats du liège cru

i) Consistance du mélange

La consistance des éprouvettes est différente selon le rapport E/C, les compositions B₀₃ et B₁₀ et B₁₅ ont une consistance normale. Par contre, les autres compositions ont une consistance sec ou molle suivant le rapport E/C et le pourcentage d'ajout du liège. L'ajout du liège dans les compositions exigent une quantité d'eau plus élevée, ceci est du au caractère hydrophile de liège.

ii) Masse volumique du matériau composite

Le tableau 5.5 nous donne la masse volumique apparente à 28 jours de toutes les compositions confectionnées avec du liège cru et conservées dans un milieu humide pendant 14 jours en fonction du rapport E/C du rapport C/L.

Tableau 5.5 : La masse volumique apparente en fonction du rapport E/C et du rapport C/L

Compositions	Ciment/Liège cru (C/L)	E/C	Masse volumique apparente (kg/m ³)
B ₀₁	1/1	0.30	1526 (15)*
B ₀₂	1/1	0.35	1581 (15)
B ₀₃	1/1	0.40	1525 (18)
B ₀₄	1/1	0.45	1424 (21)
B ₀₅	1/1	0.50	1354 (78)
B ₀₆	1/2	0.30	834 (06)
B ₀₇	1/2	0.35	986 (30)
B ₀₈	1/2	0.40	1073 (25)
B ₀₉	1/2	0.45	1162 (12)
B ₁₀	½	0.50	1079 (22)
B ₁₁	1/3	0.30	624 (22)
B ₁₂	1/3	0.35	681 (17)
B ₁₃	1/3	0.40	703 (08)
B ₁₄	1/3	0.45	722 (24)
B ₁₅	1/3	0.50	729 (58)

()* : Écart type

La figure 5.12 présente l'évolution de la masse volumique apparente en fonction de concentration du liège cru dans le matériau composite.

On remarque que plus la concentration du liège est élevée plus la masse volumique est faible. A titre exemple, la composition B₀₁ enregistre une masse volumique apparente de 1526 kg/m³ pour un rapport E/C égal à 0.30, et chute d'environ 45 % de la composition B₀₆ (C/L=1/2) et d'environ 59 % de la composition B₁₁ (C/L=1/3). L'augmentation du rapport E/C diminue la masse volumique pour les concentrations modérées de liège (C/L=1) et augmente la masse volumique pour les concentrations élevées (C/L=1/2 et 1/3).

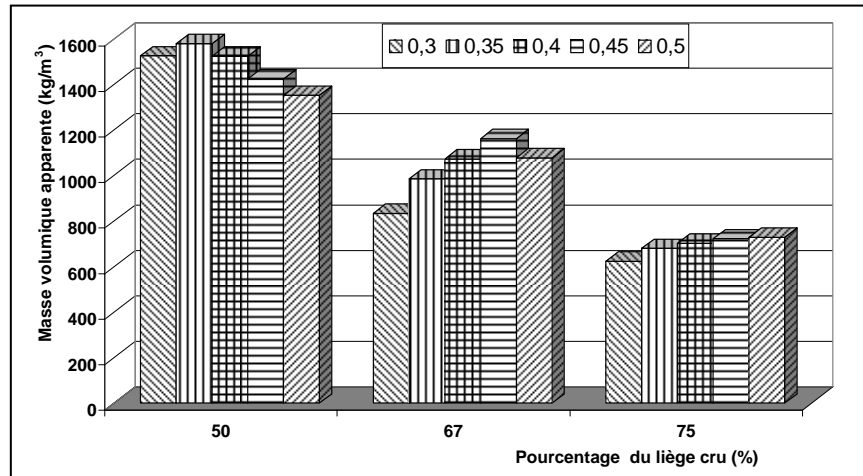


Figure 5.12. Evolution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage du liège cru

iii) Résistance à la compression du matériau composite

Le tableau 5.6 et les figures 5.13 illustre l'évolution de la résistance à la compression en fonction du rapport C/L.

Tableau 5.6 : La résistance à la compression en fonction du rapport E/C et du rapport C/L

Compositions	Ciment/Liège cru (C/L)	E/C	Résistance à la compression (MPa)
B ₀₁	1/1	0.30	11,76 (1.99)*
B ₀₂		0.35	13,83 (1.19)
B ₀₃		0.40	10,84 (0.30)
B ₀₄		0.45	8,59 (0.06)
B ₀₅		0.50	7,77 (0.96)
B ₀₆	1/2	0.30	1,96 (0.28)
B ₀₇		0.35	3,42 (0.14)
B ₀₈		0.40	4,63 (0.95)
B ₀₉		0.45	5,49 (0.70)
B ₁₀		0.50	4,41 (0.43)
B ₁₁	1/3	0.30	0,86 (0.49)
B ₁₂		0.35	1,37 (0.09)
B ₁₃		0.40	1,76 (0.19)
B ₁₄		0.45	1,86 (0.09)
B ₁₅		0.50	2,00 (0.22)

()* : étant l'écart type

L'allure de ces courbes est identique à celle de la masse volumique apparente. La résistance à la compression diminue avec l'ajout du liège, la composition B₀₁ (C/L=1) atteint une valeur de 11,76 MPa à la compression pour le rapport E/C égal à 0,30, et chute respectivement d'environ 83 % et de 93 % des compositions B₀₆ (C/L=1/2) et B₁₁(C/L=1/3). Cette chute de résistance à la compression pour E/C égal 0,30 diminue avec l'augmentation du rapport E/C.

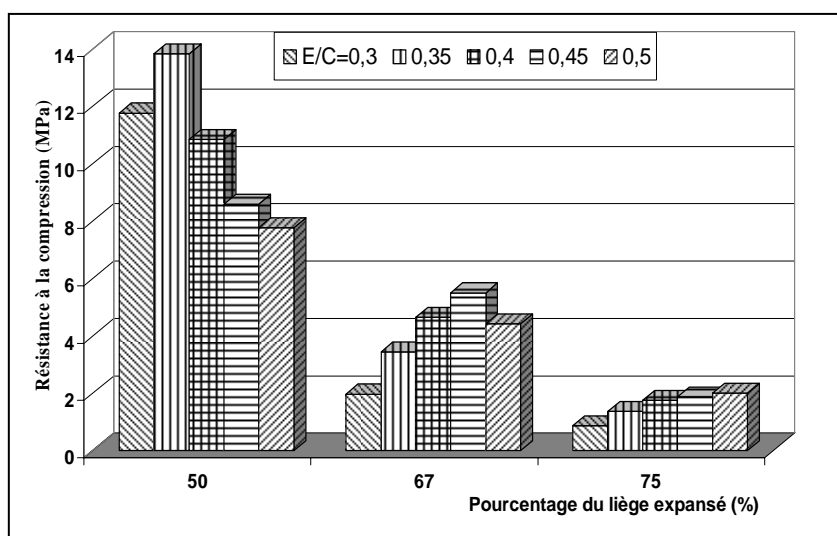


Figure 5.13 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de concentration du liège cru

iv) Résistance à la flexion du matériau composite

La résistance à la flexion du matériau composite à base de liège cru en fonction du rapport E/C et du rapport C/L est donnée par le tableau 5.7 et la figure 5.14.

On remarque que la résistance à la flexion de ce matériau composite est nettement inférieure à celle d'un mortier ordinaire.

Tableau 5.7: La résistance à la flexion en fonction du rapport E/C et du rapport C/L

Compositions	Ciment/Liège cru (C/L)	E/C	Résistance à la flexion (MPa)	
B ₀₁ B ₀₂ B ₀₃ B ₀₄ B ₀₅ } B1	1/1	0.30	2.85	(0.34)*
	1/1	0.35	3.20	(0.38)
	1/1	0.40	2.79	(0.31)
	1/1	0.45	2.32	(0.07)
	1/1	0.50	2.25	(0.42)
B ₀₆ B ₀₇ B ₀₈ B ₀₉ B ₁₀ } B2	1/2	0.30	0.56	(0.14)
	1/2	0.35	0.94	(0.03)
	1/2	0.40	1.34	(0.10)
	1/2	0.45	1.52	(0.02)
	1/2	0.50	1.37	(0.23)
B ₁₁ B ₁₂ B ₁₃ B ₁₄ B ₁₅ } B3	1/3	0.30	0.33	(0.01)
	1/3	0.35	0.47	(0.04)
	1/3	0.40	0.52	(0.05)
	1/3	0.45	0.52	(0.08)
	1/3	0.50	0.56	(0.12)

()* : Écart type

La résistance à la flexion diminue avec l'ajout du liège. A titre exemple, la valeur de la résistance à la flexion pour un rapport E/C= 0.30 (B₀₁) est de 2.85 MPa, et diminue pour le même rapport E/C d'environ 80 % et d'environ 88 % pour la compositions B₀₆ (C/L=1/2) et B₁₁(C/L=1/3) respectivement. L'augmentation du rapport E/C a un effet négatif sur la résistance à la flexion pour C/L=1 et un effet positif pour les rapports C/L=1/2 et 1/3.

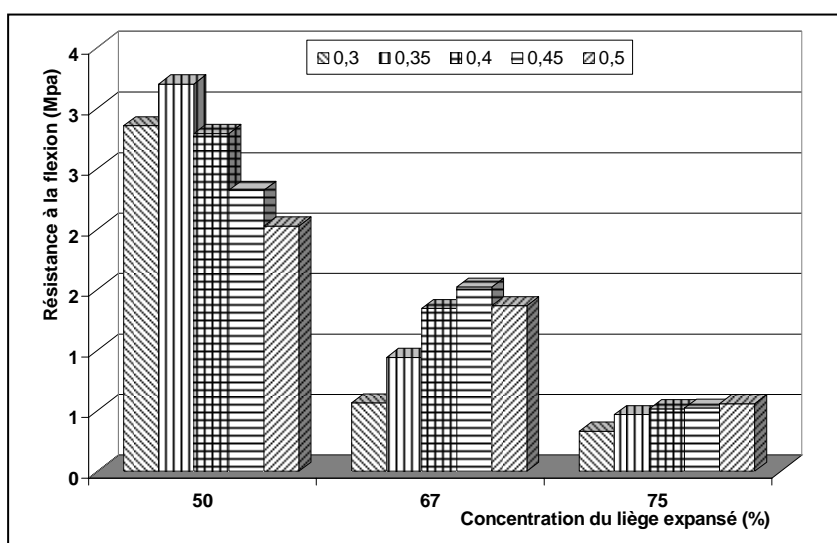


Figure 5.14: Evolution de la résistance à la flexion en fonction de concentration du liège cru

v) Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion

La figure 5.15 présente la corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion de différentes compositions (C/L =1, 1/2, 1/3) avec des différents rapports E/C. On remarque que le rapport R_c/R_t diminue en fonction du pourcentage du liège, la composition B₀₁ (C/L=1) enregistre un rapport de 4.12, ce rapport diminue d'environ 15 % pour la composition B₀₆ (C/L=1/2) et de 37 % pour la composition B₁₁(C/L=1/3).

Pour le matériau composite à base du liège cru, il semble que la formule (5.3) proposée de type puissance semble adéquate et donne une bonne prévision de la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation $R=0.99$.

$$R_t \text{ (MPa)} = 0.33 R_c^{0.86} ; \quad (R_c \text{ en MPa}) \quad (5.3)$$

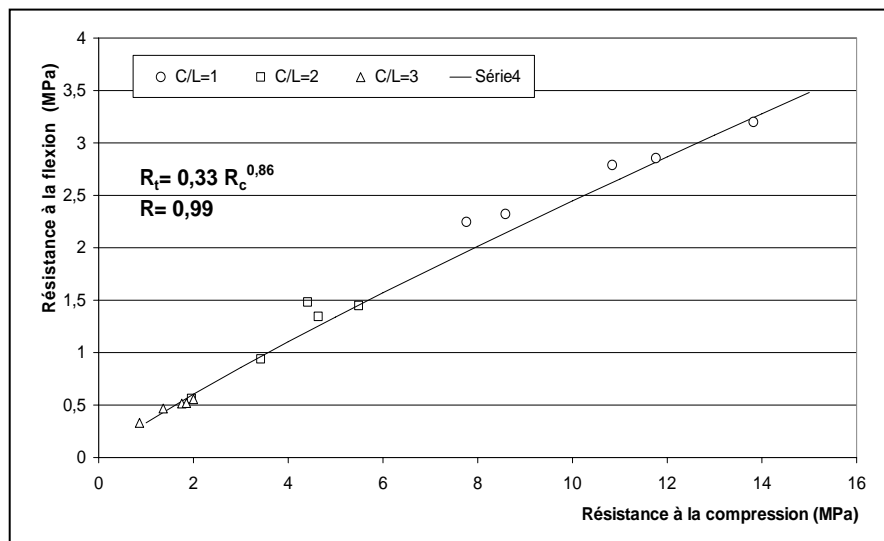


Figure 5.15 : Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion

vi) Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente

D'après la figure 5.20, on remarque que la résistance à la compression est proportionnelle à la masse volumique apparente. Cette relation est toute à fait évidente, plus le matériau est dense plus sa résistance est élevée.

La composition B₃ ayant 75 % du liège à la plus faible masse volumique apparente. Par conséquent, il a la plus faible résistance à la compression.

La corrélation entre les résultats expérimentaux est présentée sous forme d'une relation linéaire (figure 5.16). Il semble que la relation linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente du matériau composite à base du liège expansé (relation 5.2) peut être appliquée pour le matériau composite à base du liège cru avec un coefficient de corrélation égal à $R = 0.98$.

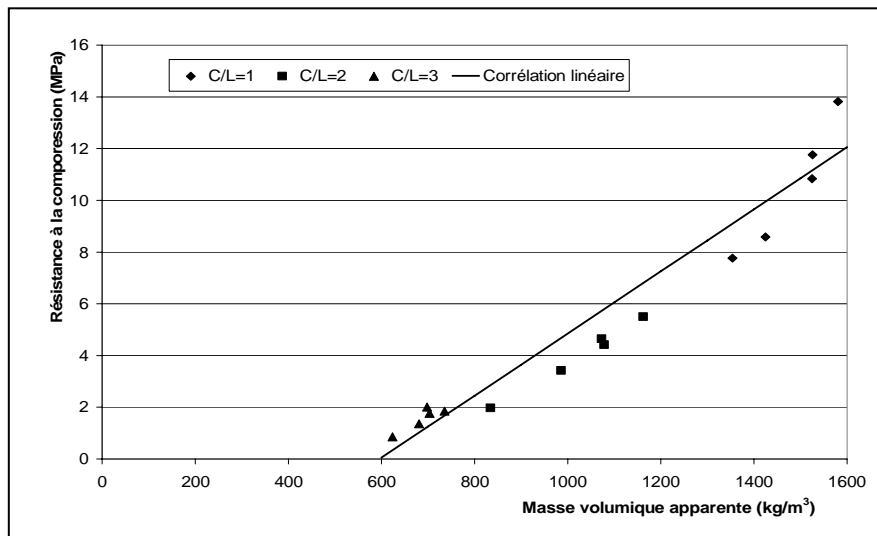


Figure 5.16: Corrélation entre la résistance à la compression et à la masse volumique apparente pour les différents rapports E/C

5.2.5. Matériau composite à base de poudre du liège expansé

Après 24 heures de conservation, on a procédé au démoulage des éprouvettes du matériau composite Ciment/Poudre du liège expansé. Sur les 15 essais effectués, on n'a pu obtenir que deux compositions C₀₄ et C₀₅. Pour les autres compositions réalisées, on a remarqué une absence totale de l'adhérence entre la poudre du liège et de ciment. Ceci est dû essentiellement au manque d'eau, car la poudre du liège expansé demande un pourcentage d'eau plus élevé en comparaison aux granulats du liège. Le tableau 5.8 résume les résultats obtenus sur le matériau composite à base de poudre du liège expansé.

Tableau 5.8: Les résultats obtenus sur le matériau composite Ciment/Poudre du liège

Notations Les compositions	Ciment/Liège cru (C/L)	E/C	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
C ₀₄	1/1	0.45	1422 (08)*	2.94 (0.08)	11.34 (0.13)
C ₀₅	1/1	0.50	1357 (05)	2.91 (0.12)	11.31 (0.06)

()* : étant l'écart type

D'après les résultats du tableau 5.8, on constate que la résistance à la flexion et la compression ainsi que la masse volumique apparente diminuent avec l'augmentation du rapport E/C.

5.3. Comparaison entre les trois matériaux composites à base du liège

D'après les nombreux essais effectués sur le matériau composite Ciment/Liège, on a constaté que la résistance à la compression du matériau composite à base du liège expansé est plus élevée que les autres matériaux confectionnés avec du liège cru et de la poudre du liège expansé. Ce matériau peut atteindre une résistance à la compression de 15 MPa. Le rapport optimal semble être 0.3 pour C/L=1, 0.45 pour C/L=1/2 et 0.5 pour C/L=1/3 et ce pour le liège expansé et cru.

Les chutes de la masse volumique et de la résistance à la flexion et à la compression du matériau composite à base du liège expansé sont plus importantes avec l'ajout du liège comparativement avec le matériau confectionné avec du liège cru.

5.4. Optimisation des compositions du matériau composite à base du liège

Nous avons constaté que le rapport E/C a une influence sur la masse volumique, la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Ce même rapport a une influence directe sur la consistance du mélange. Nous avons obtenu trois consistances normales pour le matériau composite à base du liège expansé A₀₃, A₁₀ et A₁₅, et trois autres pour le matériau confectionné avec du liège cru B₀₄, et B₁₀ et B₁₅. Par contre, on a constaté qu'il y a une absence totale de l'adhérence entre la poudre et le ciment. Cependant, l'utilisation des compositions A₀₃, et B₀₄ nécessite une quantité importante de ciment. La masse volumique apparente de ces compositions dépasse celle des bétons légers isolants et porteurs (entre 1000 et 1400 kg/m³) [7, 67].

Comme on cherche un matériau léger isolant non porteur qui peut être utilisé comme un isolant dans les constructions, nous avons opté pour les composites A₁₀, A₁₅, B₁₀ et B₁₅ qui ont une masse volumique inférieure ou égale à 1000 kg/m³ [7, 67].

5.5. Les essais réalisés sur le matériau composite (expansé, cru)

5.5.1. Introduction

Les essais sont effectués sur le matériau à base de deux granulats expansés et crus. Nous avons utilisé les compositions choisies dans la phase préliminaire et nous avons introduit les compositions A₀₅ et B₀₅ qui ont le même rapport E/C pour pouvoir comparer les résultats. Les compositions utilisées dans l'expérimentation afin de terminer les déformations du retrait, gonflement, absorption d'eau par immersion et par capillarité sont regroupées dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 : Les variables retenues pour le matériau composite (Liège expansé et cru)

Notation	E/C	Ciment / granulats du liège expansé
A ₀₅	0.50	1/1
A ₁₀	//	1/2
A ₁₅	//	1/3
B ₀₅	//	1/1
B ₁₀	//	1/2
B ₁₅	//	1/3

5.5.2. Variation pondérale du matériau composite

Après chaque mesure du retrait et du gonflement, des pesées de gains de masse et perte de masse sont effectuées

i) Perte de masse en fonction de l'âge pour les différentes compositions

Les figures 5.17 et 5.18 illustrent l'évolution de la perte de masse en fonction du temps des différentes compositions étudiées pour un rapport E/C égal à 0.50.

On constate d'après ces figures que les pertes de masse évoluent jusqu' à l'âge de 14 jours, après cette période ces courbes commencent à s'aplatissent.

Le matériau composite à base du liège cru enregistre une perte de masse plus élevée que le matériau composite à base du liège expansé. Cette perte de masse augmente avec la diminution du pourcentage des grains du liège dans le matériau. Ceci s'explique par le fait que lorsque le pourcentage du liège augmente la quantité d'eau emmagasinée dans les grains augmente et contribue à l'amélioration de l'hydratation du ciment et à la réduction de la quantité d'eau disponible à l'évaporation et par conséquent les pertes de masse sont diminuées.

La plus grande perte de masse a été obtenue pour la composition B₀₅ environ 12 % à 14 jours, 13 % à 90 jours. Cette perte de masse est plus élevée pour la composition B₁₀ d'environ 11 % à 14 jours et de 6 % à 90 jours.

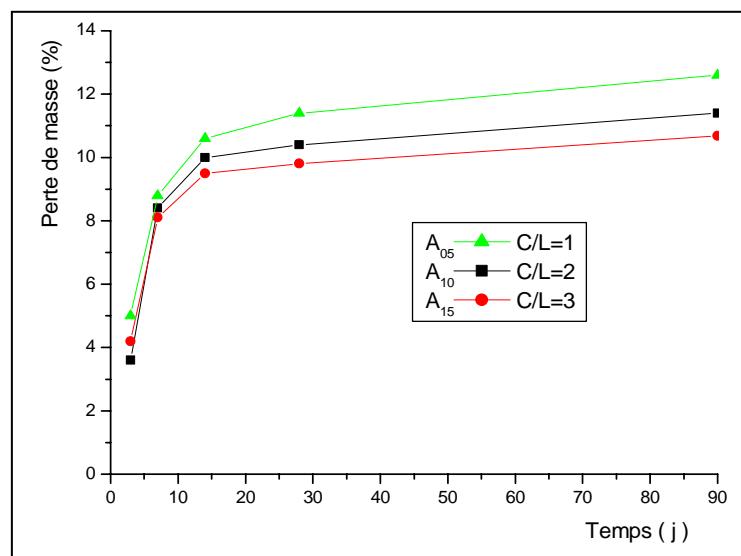


Figure 5.17: Evolution de la perte de masse en fonction du temps (liège expansé)

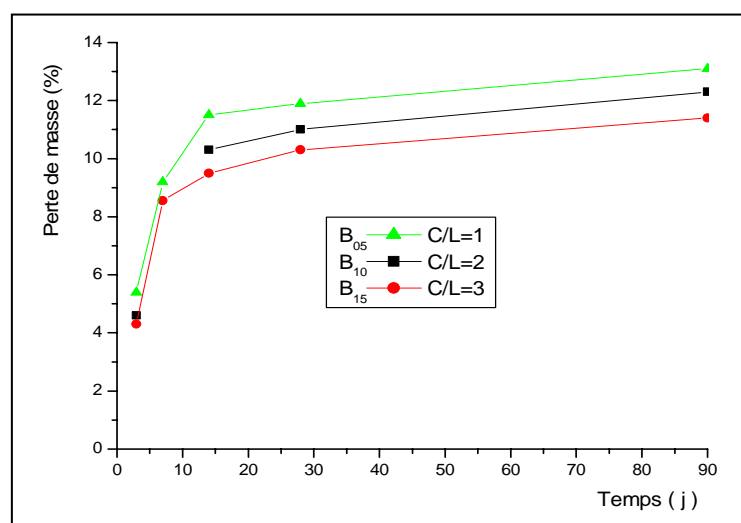


Figure 5.18: Evolution de la perte de masse en fonction du temps (Liège cru)

ii) Gain e de masse en fonction de l'âge pour les différentes compositions

Les figures 5.19 et 5.20 montrent l'évolution du gain de masse en fonction du temps du matériau composite à base du liège expansé et cru. On constate que le gain de masse trouvé est très important, ceci est du principalement au caractère hydrophile des granulats du liège. Les éprouvettes confectionnées avec les granulats du liège cru enregistrent un gain de masse plus élevé que celui du liège expansé. Le gain de masse augmente avec l'augmentation de quantité de liège et par conséquent le pouvoir de stockage de l'eau par les grains de liège.

Le changement de la pente des courbes est aperçu à l'âge de 28 jours. Le grand gain de masse est enregistré pour la composition B_{15} ($C/L=1/3$) qui est de 23 % à 28 jours et atteint 25 % à 90 jours. Ce gain de masse n'est que de 12 % et 15 % à 28 jours et de 8 % et 9 % à 90 jours pour les compositions B_{10} ($C/L=1/2$) et B_{05} ($C/L=1$) respectivement.

D'après les résultats expérimentaux, on constate que le gain de masse du matériau composite Ciment/Liège est plus élevé que la perte de masse.

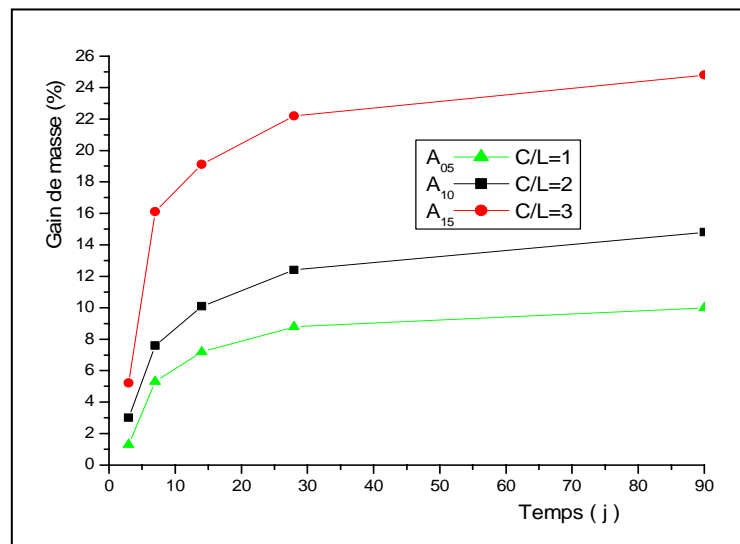


Figure 5.19: Evolution du gain de masse en fonction du temps (liège expansé)

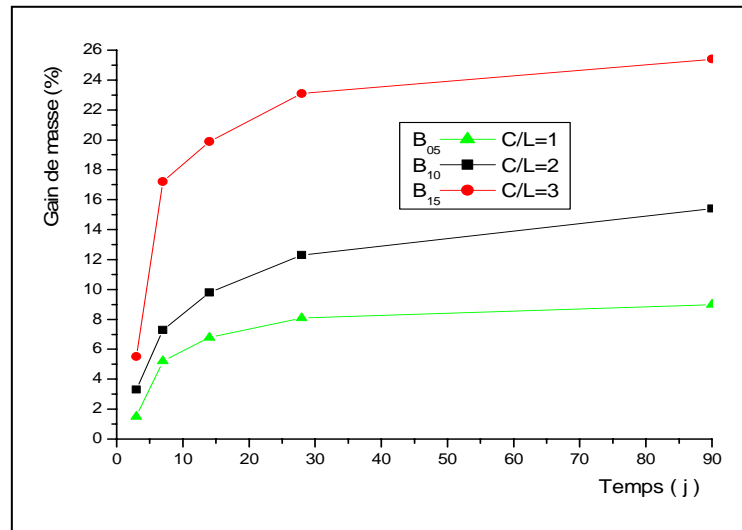


Figure 5.20: Evolution du gain de masse en fonction du temps (liège cru)

5.5.3. Variation dimensionnelle du matériau composite

i) Retrait du matériau composite à base de granulats du liège

Les figures 5.21 et 5.22 montrent l'évolution du retrait en fonction de l'âge pour les deux matériaux composites (expansé et cru) et le même rapport E/C. On constate que ces courbes ont une même allure hyperbolique, présentent une tangente accentuée à l'origine puis elle s'adoucit vers une asymptote horizontale à long terme. Par conséquent, on peut dire que la plus grande partie du retrait a été effectué à jeune âge.

Le retrait semble être proportionnel avec la concentration du liège. La comparaison des deux matériaux composites, montre un retrait plus élevé pour les granulats du liège cru. Ceci est probablement dû à la porosité élevée des granulats recyclés ainsi que le degré important d'absorption d'eau du granulats du liège cru. En effet, la composition B₁₅ (C/L=1/3) nous donne un retrait d'environ 1150 $\mu\text{m}/\text{m}$ à jeune âge (7 jours) et atteint 4650 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 90 jours. Ce retrait est plus grand d'environ 31 % de la composition B₁₀ (C/L=1/2) à jeune âge et d'environ 4 % à 90 jours. Par contre, la composition B₀₅ (C/L=1) nous donne un retrait inférieur d'environ 54 % de la composition B₁₅ à jeune âge et de 10 % à 90 jours.

Le retrait du matériau composite à base du liège cru est plus important que les panneaux en laine de bois et le matériau composite à base des copeaux de sapin d'environ 33 % et de 55 % respectivement [11, 37].

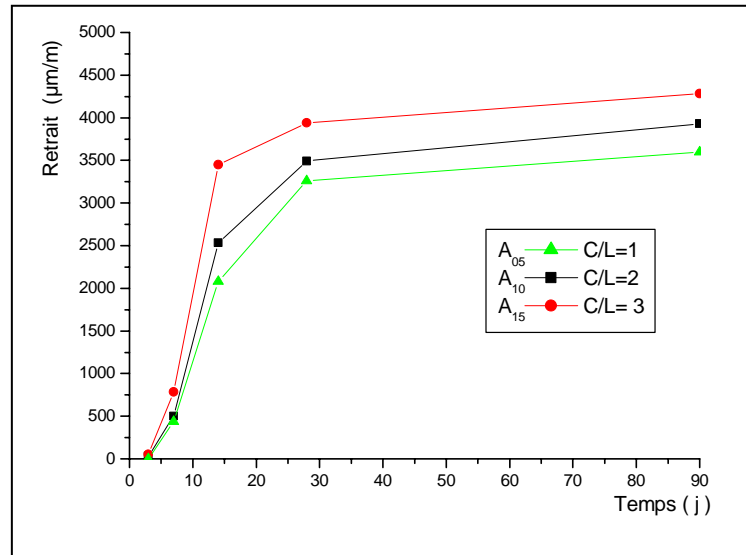


Figure 5.21 : Evolution du retrait en fonction du temps (liège expansé)

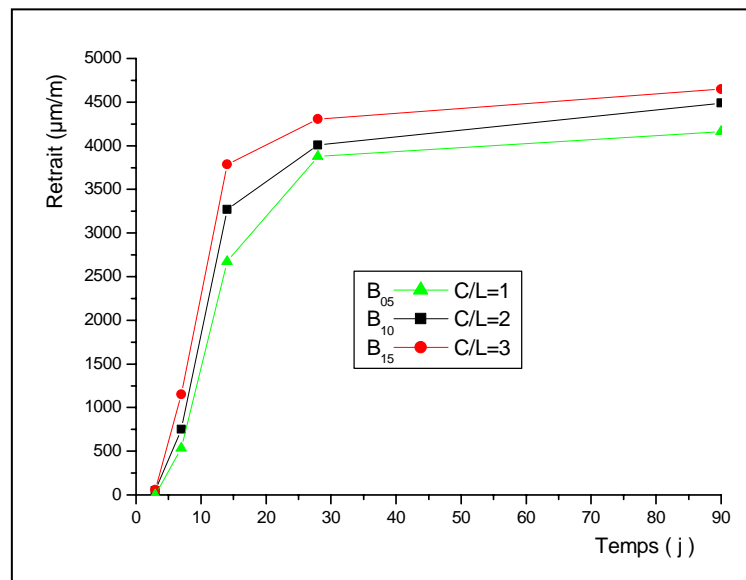


Figure 5.22: Evolution du retrait en fonction du temps (liège cru)

ii) Gonflement du matériau composite à base des granulats de liège

Sur les figures 5.23 et 5.24 on représente l'évolution du gonflement de deux matériaux composites en fonction du temps avec un rapport E/C égal 0.50 et pour les différents pourcentages du liège. Il est clair que le gonflement augmente avec le pourcentage d'ajout du liège. Probablement en raison de la plus forte capacité d'absorption d'eau des granulats de liège. Le matériau composite à base du liège se comporte comme une éponge qui absorbe et conserve des quantités importantes d'eau de gâchage. La saturation des éprouvettes semble se réaliser à 28 jours, l'augmentation de gonflement est très faible à long terme.

Le gonflement du matériau à base de granulats du liège cru est plus élevé à celle du liège expansé. Ce résultat est prévisible puisque les granulats du liège cru absorbent une quantité d'eau plus élevée que les granulats du liège expansé. L'évolution de gonflement des compositions A₀₅ (C/L=1) et B₀₅ (C/L=1) est peu significative avec le temps. Car ces éprouvettes sont molles avec l'incorporation d'un seul volume du liège.

Le plus important gonflement est celui de la composition B₁₅ (C/L=3), qui donne un gonflement de 2050 $\mu\text{m}/\text{m}$ à jeune âge (7 jours) et d'environ 2530 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 90 jours. La composition B₀₅ (C/L=1) enregistre un gonflement inférieur de 74 % à jeune âge par rapport à la composition B₁₅ et environ 71 % à long terme.

En comparaison du gonflement avec le retrait du matériau composite, on constate que les valeurs du retrait plus important que celles du gonflement.

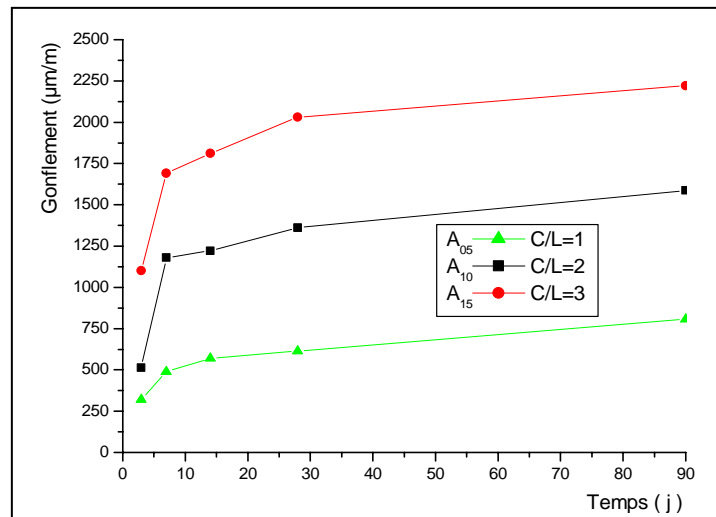


Figure 5.23: Evolution du gonflement en fonction du temps (liège expansé)

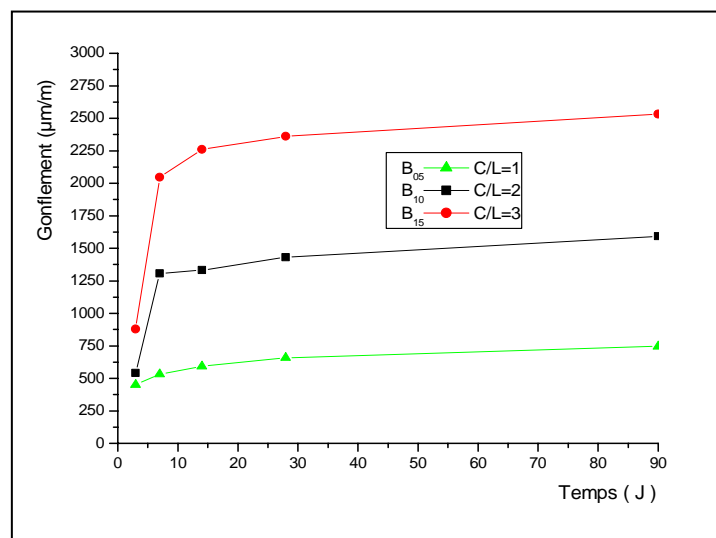


Figure 5.24: Evolution du gonflement en fonction du temps (liège cru)

iii) Relation entre le retrait et la perte de masse

La relation entre le retrait et la perte de masse du matériau composite Ciment/Liège a âge de 90 jours est donnée par les figures 5.25 et 5.26. On remarque que le retrait est inversement proportionnel avec la perte de masse. Il semble que plus le retrait diminue plus la perte de masse augmente (expansé, cru).

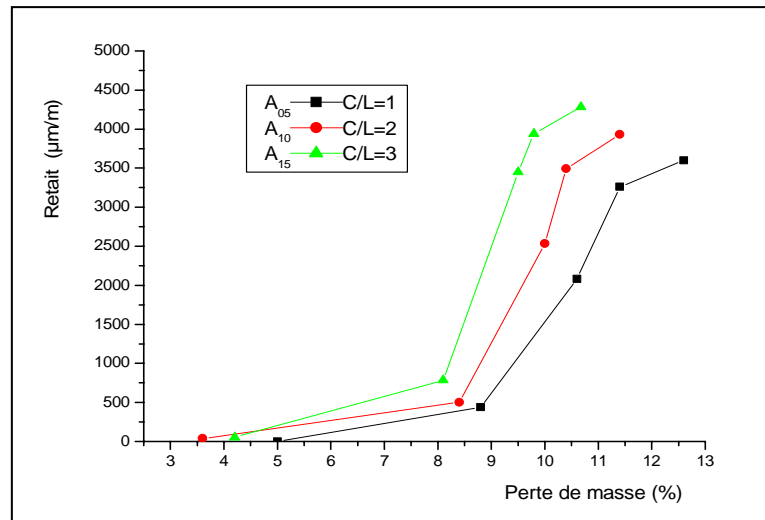


Figure 5.25: Relation entre le retrait et la perte de masse (Liège expansé)

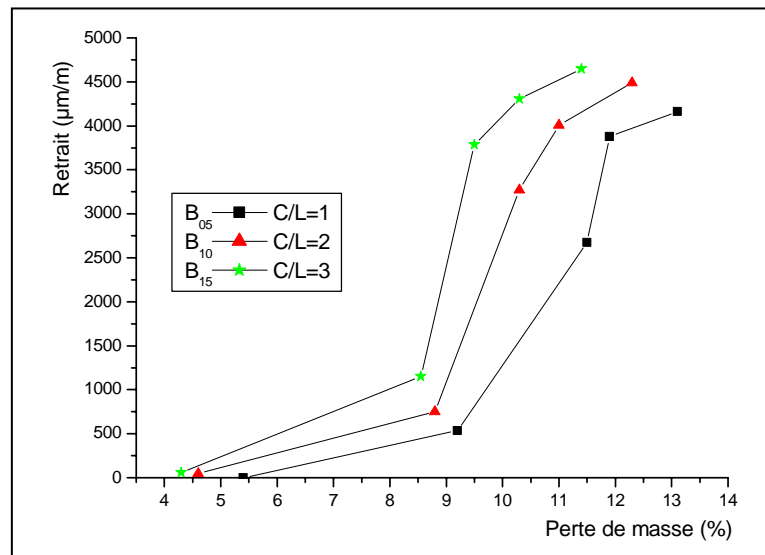


Figure 5.26: Relation entre le retrait et la perte de masse (Liège cru)

iv) Relation entre le gonflement et le gain de masse

Les figures 5.27 et 5.28 nous donnent la relation entre le gonflement et le gain de masse de deux matériaux composites Ciment/ Liège. On constate d'après ces figures que le

gonflement est proportionnel avec le gain de masse, plus le gonflement augmente plus le gain de masse augmente.

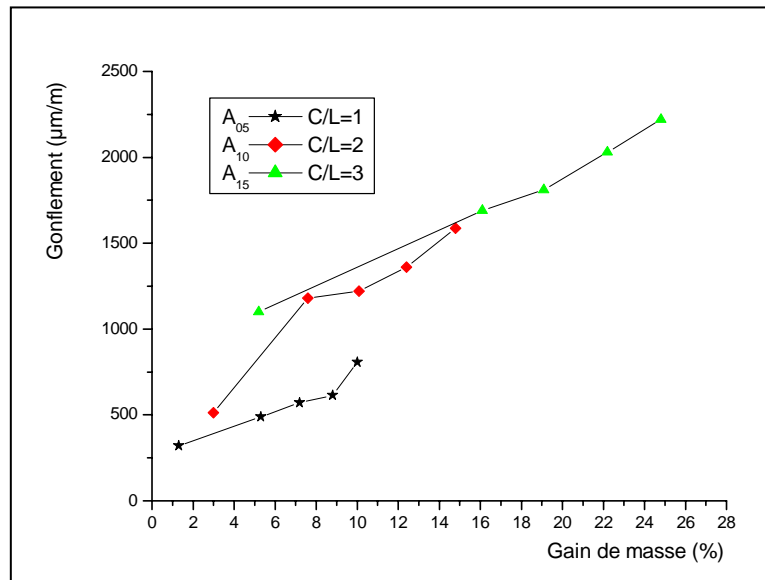


Figure 5.27 : Relation entre le gonflement et le gain de masse pour les différents âges (liège expansé)

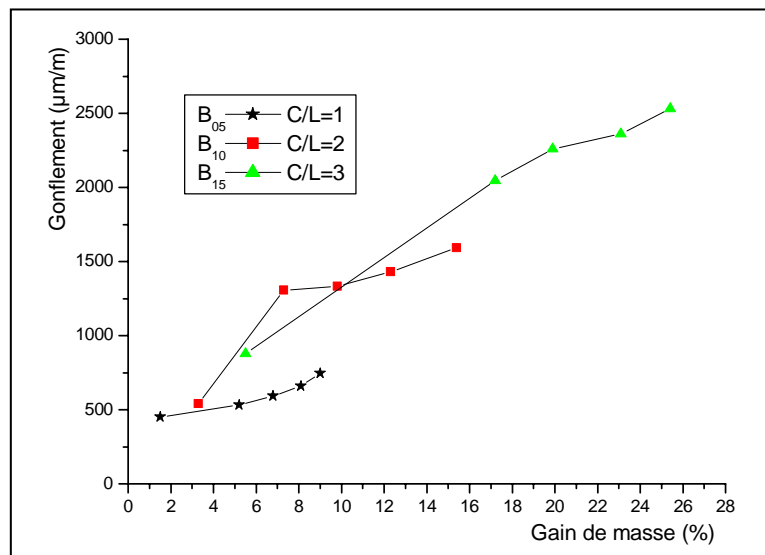


Figure 5.28: Relation entre le gonflement et le gain de masse pour les différents âges (liège cru)

5.5.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité et par immersion

L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué sur des éprouvettes 4x4x16 cm sur une période de 90 minutes. Six compositions ont été testées avec un rapport E/C constant. Les figures 5.29 et 5.30 représentent l'évolution de l'absorption d'eau en fonction du temps.

Il est clair que l'ajout du liège augmente la porosité du matériau composite. En revanche, l'absorption d'eau par capillarité est directement liée à la porosité du matériau. En général, les compositions plus compactes, moins poreuses sont plus étanches à l'eau. Dans notre cas, on observe un fait inverse à 90 minutes car les compositions moins poreuses absorbent une quantité d'eau plus élevée. Les éprouvettes qui ont une concentration en liège de 67 % et 75 % se comportent comme des passoirs et par conséquent l'eau absorbée s'égoutte facilement à travers les pores existants dans les éprouvettes. Les figures d'absorption d'eau en fonction du temps montrent que ces matériaux composites peuvent absorber une quantité d'eau considérable avec le temps.

La composition à base du liège cru absorbe une quantité d'eau plus élevée que les compositions à base du liège expansé. Ceci est dû au pouvoir d'absorption du liège cru et au pourcentage élevé des petits diamètres, ces derniers auront une absorption capillaire plus grande. L'absorption capillaire pour la composition B₀₅ à 90 minutes est environ 21 % plus élevée que pour la composition A₀₅.

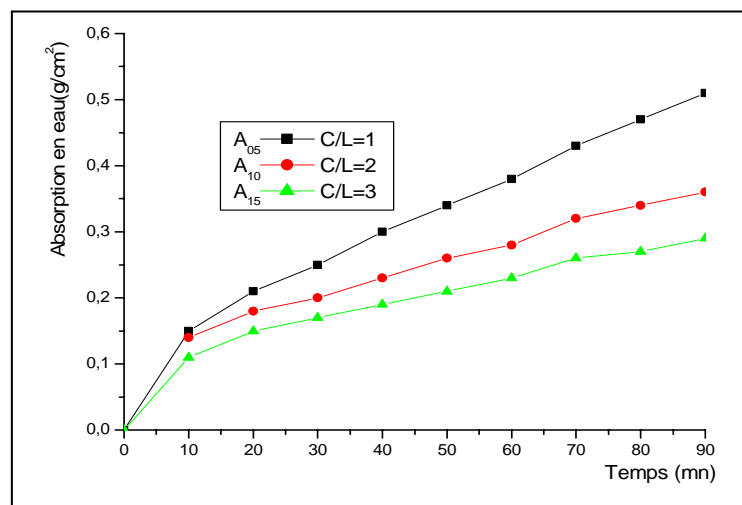


Figure 5.29 : Absorption de l'eau en fonction du temps (liège expansé)

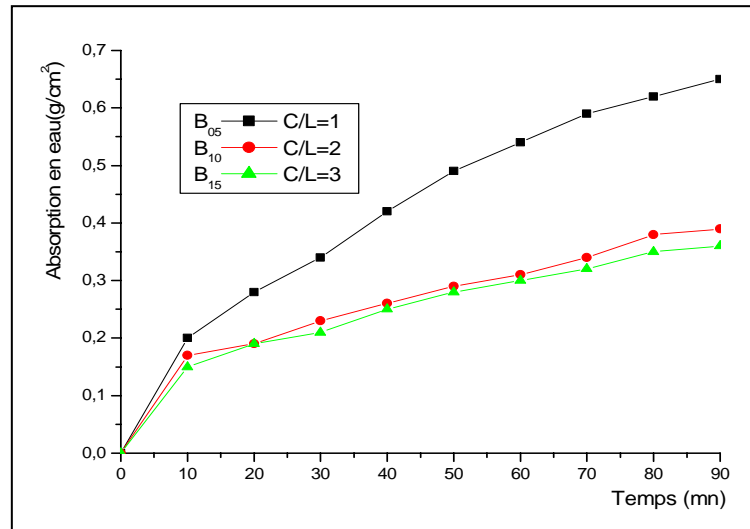


Figure 5.30 : Absorption de l'eau en fonction du temps (liège cru)

Le pourcentage d'absorption d'eau par le matériau composite après 24 heures d'immersion dans l'eau est au environ de 22.5 % pour la composition à base de liège cru B₁₅ (C/L=1/3), de 22 % pour le matériau composite à base du liège expansé A₁₅ (C/L=1/3), et de 19 % pour la composition B₁₀ (C/L=1/2) et de 18 % pour la composition A₁₀ (C/L=1/2). Par contre, les compositions B₀₅ (C/L=1) et A₀₅ (C/L=1) absorbent 17 % et 16 % respectivement. D'après ces résultats, on constate que l'absorption d'eau par immersion est très élevée ce qui nous indique que la porosité et la perméabilité de ce matériau sont élevées et par conséquent cela peut avoir un effet négatif sur la durabilité de matériau composite et également la perte des propriétés thermique et acoustique du matériau.

L'absorption d'eau par immersion des compositions B₁₅ (C/L=1/3) et A₁₅ (C/L=1/3) est comparable à celle du béton léger.

5.5.5. Essai thermique sur le matériau composite

Une autre caractéristique recherchée de ce matériau est sa bonne conductivité thermique pour être employé dans l'isolation thermique des constructions.

L'essai thermique a été réalisé sur les quatre compositions que nous avons choisies à partir des essais préliminaires, vu que ces dernières ont une consistance normale et une masse volumique apparente d'un matériau isolant non porteur qui peut être confectionné sans ségrégation. Le tableau 5.10 nous donne la masse volumique sèche et les coefficients

de conductivité thermique à 28 jours des éprouvettes testées. Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans l'eau pendant 14 jours et le reste à l'air libre.

Tableau 5.10: Les valeurs de la conductivité thermique de matériau composite

Notation	Ciment/Liège (C/L)	Masse volumique sèche (kg/m ³)	La conductivité thermique λ (w/m.°K)
A ₁₀	1/2	820 - 875	0.34
A ₁₅	1/3	602 - 711	0.20
B ₁₀	1/2	639 - 684	0.27
B ₁₅	1/3	603 - 638	0.19

La figure 5.31 montre la variation de la conductivité thermique en fonction de la concentration en liège dans les éprouvettes. On voit clairement sur cette figure que l'augmentation de concentration du liège dans les éprouvettes diminue la conductivité thermique du matériau composite. En effet l'ajout du liège engendre dans le matériau une porosité plus importante. D'après cette figure, on constate que le matériau composite à base du liège cru a une plus faible conductivité thermique que le matériau composite à base du liège expansé.

Pour la concentration 75 % du liège cru, on enregistre un coefficient de conductivité thermique de 0.19 W/m°K. Dans ce cas, ce matériau composite possède une meilleure isolation thermique, mais cette composition donne une faible résistance à la compression et à la flexion et donc ce matériau ne peut être utilisé que comme un matériau de remplissage pour l'isolation thermique.

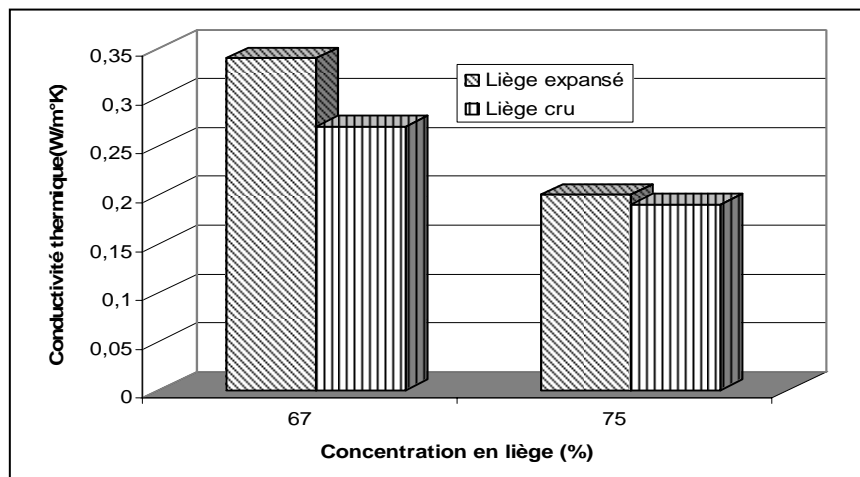


Figure 5.31: La conductivité thermique en fonction de concentration en liège (expansé, cru)

La relation entre le coefficient de la conductivité thermique et la masse volumique sèche et la résistance à la compression est donnée par les figures 5.32 et 5.33 respectivement. On constate que plus la masse volumique diminue plus la conductivité thermique diminue. La conductivité thermique diminue aussi avec la diminution de la résistance à la compression pour les matériaux composites à base du liège expansé et cru.

La résistance à la compression trouvée est conforme avec les recommandations de RILEM qui préconise que le béton léger qui possède une résistance à la compression supérieure à 3.5 MPa doit avoir un coefficient de conductivité thermique inférieur à 0.7 W/m°K [37].

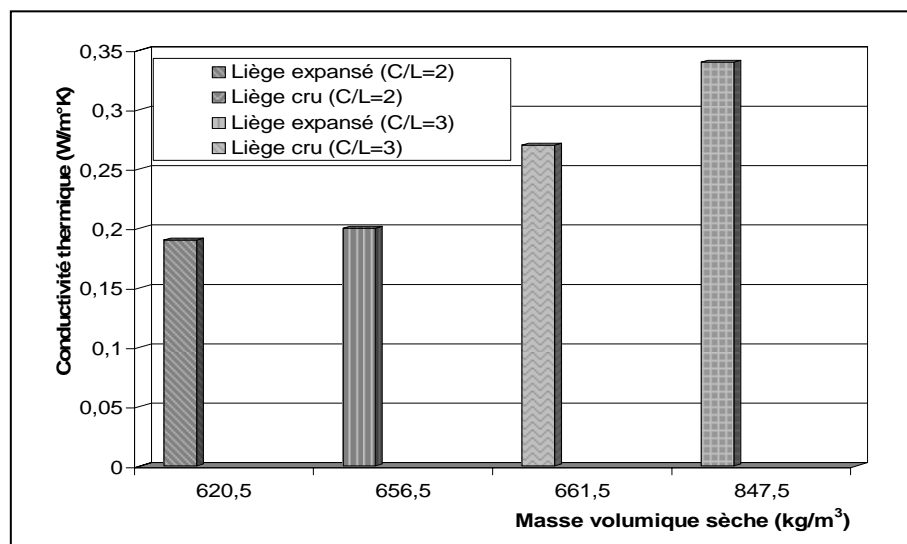


Figure 5.32 : La conductivité thermique en fonction de la masse volumique (expansé et cru)

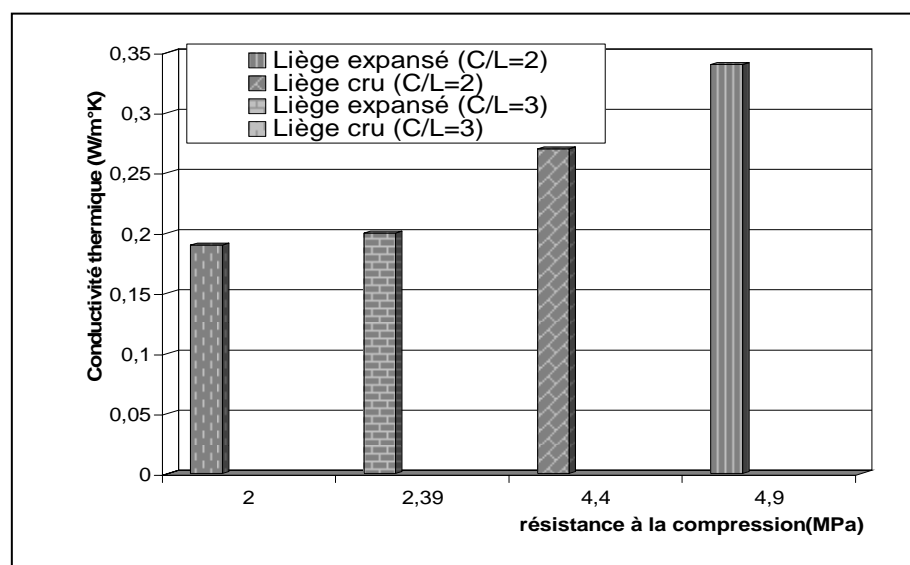


Figure 5.33 : La conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression (expansé, cru)

i) Comparaison du matériau composite Ciment/Liège avec d'autres matériaux isolants

Le tableau 5.11 nous donne le coefficient de la conductivité thermique et la résistance à la compression en fonction de la masse volumique de quelques matériaux isolants.

Tableau 5.11 : Le coefficient de la conductivité thermique et la résistance à la compression de quelques matériaux en fonction de la masse volumique

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Rc (MPa)	λ (W/m ^o .C)	Référence
- Matériaux composites				
✓ Ciment-sable-fibre de noix de coco	959	2.46	0.25	[33]
✓ Agile- ciment -Copeaux de sapin	850	-	< 0.20	[37]
✓ Ciment -sol-sable- fibre de durian	1456	3.29	0.35	[34]
✓ Ciment-sol-sable-fibres de noix de coco	1587	3.955	0.651	[34]
✓ Ciment- sable- fibres cellulosiques	1150	3	0.30	[36]
-Béton de vermiculite	300-700	0.3-3	0.10	[18]
- Béton caverneux d'argile expansé ou schiste expansé	600-800	-	0.25	[7]
-Bétons cellulaires	1200	4-5	0.40	[12]
✓ Bétons autoclaves	625-675	-	0.24	[67]
✓ Bétons autoclaves	675-725	-	0.27	//
✓ Béton de mousse	1000	2.5-3.0	-	[15]
✓ // //	600-1200	-	0.50	[7]
-Béton polystyrène	1000	5.5	-	[15]
-Panneau en laine de bois	250-560	-	0.075-0.16	[11]
-Panneau de liège expansé pur	160-170	0.30	0.035-0.037	[23]
-Plâtre courant enduit intérieur	750-1000	-	0.35	[7]
-Carreaux de plâtre pleins	900-1000	-	0.35	[7]
-Brique creuse ou perforée isolante (G)	550-800	-	< 0.30	[26]
-Mousse d'argile (matériau de terre cuite allégé)	900		0.18	[26]
-Matériau composite A ₁₀ (1/2)	1086	4.91	0.34	-
- Matériau composite A ₁₅ (1/3)	782	2.39	0.20	-
-Matériau composite B ₁₀ (1/2)	1079	4.41	0.27	-
-Matériau composite B ₁₅ (1/3)	729	2.0	0.19	-

L'utilisation de liège a donnée un matériau composite léger de masse volumique varie entre 614 et 1581 kg/m³. Cette masse volumique est comparable à celle des bétons de granulats légers et plus faibles à celle des bétons de granulats courants (béton plein et caverneux) [67].

La conductivité thermique du matériau composite Ciment/Liège est meilleure que le béton de mousse, béton autoclave et le plâtre. Cette conductivité thermique peut être comparée avec le béton caverneux d'argile expansé ou de schiste expansé, la brique creuse (G) et à la mousse d'argile.

La résistance des compositions A₁₀, A₁₅, B₁₀, B₁₅ à la compression est entre 2 et 5 MPa, ces matériaux composites peuvent concurrencer le béton autoclave et le béton de mousse (Béton cellulaire) et les panneaux de liège expansé pur. Si on compare le matériau composite Ciment/Liège avec le matériau récemment réalisé avec de sol-ciment-sable-fibres de noix de coco, on dira que la résistance à la compression de ce dernier est inférieure à celle du composite Ciment/Liège.

La résistance à la flexion de ces quatre compositions est entre 0.56 et 1.37 MPa, elle est plus élevée à celle des panneaux de liège expansé pur.

ii) Utilisation et emploi du matériau composite

Le matériau composite à base du ciment et de granulats du liège peut être utilisé dans plusieurs applications suivant le volume de liège. Il peut être utilisé pour la réalisation de cloison, la réalisation des panneaux de façade et des travaux divers d'isolation thermique.

L'épaisseur de ce matériau composite peut être évalué en fonction du coefficient de conductivité thermique et la zone climatique.

Connaissant les valeurs de coefficient de transmission thermique K et les coefficients d'échange superficiel ($1/h_e + 1/h_i$), on peut calculer l'épaisseur de notre matériau composite Ciment/Liège. A titre exemple, on peut déterminer l'épaisseur de ce matériau composite si ce dernier est utilisé comme un plancher sur cave ou un mur extérieur (figure 5.34 et 5.35).

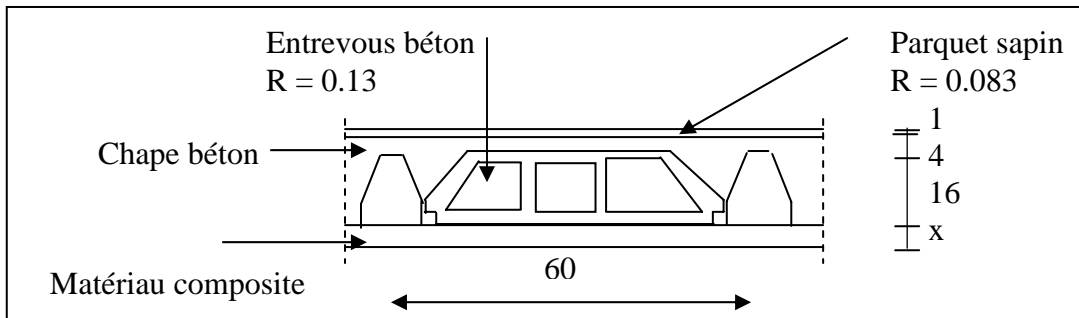


Figure 5.34 : Schéma d'un plancher sur cave

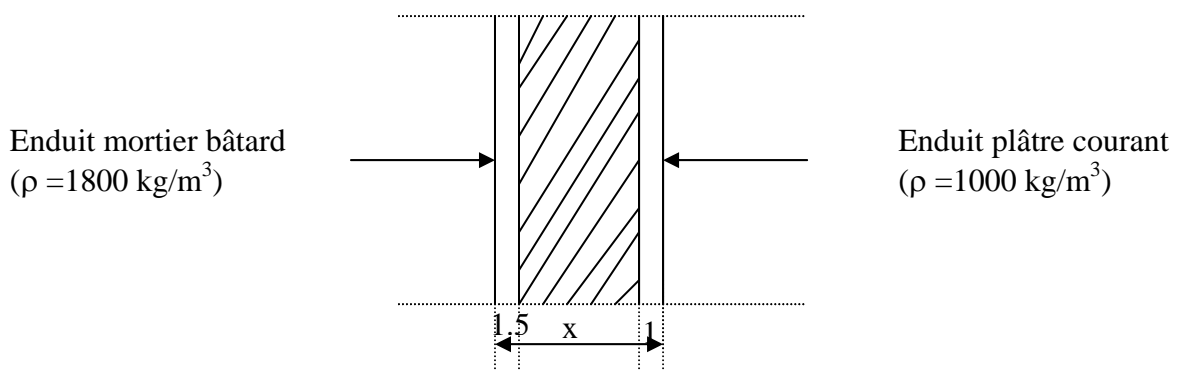


Figure 5.35 : Schéma d'un mur extérieur

Après tout calcul fait, on a abouti à des épaisseurs différentes selon la zone et la valeur de la conductivité thermique (λ) de chaque composition. Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12 : Les épaisseurs trouvées pour chaque composition

zones	Epaisseur du matériau composite (cm) Plancher sur cave				Epaisseur du matériau composite (cm) Mur extérieur			
	A ₁₀	A ₁₅	B ₁₀	B ₁₅	A ₁₀	A ₁₅	B ₁₀	B ₁₅
	A	4.6	2.7	3.7	2.5	17.0	10.0	13.5	9.5
B, B/et C	4.6	2.7	3.7	2.5	21.1	12.4	16.7	11.7
D et D'	8.8	5.2	6.9	4.9	17.0	10.0	13.5	9.5

Les épaisseurs trouvées sur matériau composite Ciment/Liège de différentes concentrations en liège sont réalisables et les épaisseurs varient de 2.5 à 9 cm pour le plancher et de 9.5 à 21 cm pour un mur l'extérieur selon la zone.

Le même calcul a été effectué sur un mur extérieur en remplaçant le matériau composite par la brique rouge, cette dernière a un coefficient de conductivité thermique égal à 0.7 W/m°C [36]. Les épaisseurs obtenues sont de 35 cm pour les zones A, D et D' et de 43.4 cm pour les zones B, B' et C. Avec les épaisseurs trouvées, il semble que l'utilisation du matériau composite Ciment/Liège est meilleure que la brique rouge.

5.5.6. Essai d'absorption acoustique

Le tableau 5.13 nous donne les résultats obtenus de l'essai acoustique effectué sur les quatre compositions du matériau composite Ciment/Liège.

Tableau 5.13 : Coefficient d'absorption acoustique (α) en fonction de la fréquence de l'onde sonore

Fréquence Compositions	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)
A ₁₀	0,05	0,05	0,12	0,23	0,27	0,45
A ₁₅	0,06	0,08	0,23	0,21	0,19	0,26
B ₁₀	0,04	0,04	0,12	0,21	0,16	0,15
B ₁₅	0,06	0,07	0,26	0,32	0,40	0,45

D'après le tableau 5.13, on constate que la composition à base du liège cru B₁₅ (C/L=2) nous donne un meilleur coefficient d'absorption acoustique pour toutes les fréquences (graves, médiums et aigues) que celles des compositions A₁₀, A₁₅ et B₁₀. Il semble que l'ajout du liège cru a un effet positif sur le coefficient d'absorption acoustique (α), et un effet négatif est observé avec l'ajout du liège expansé. On remarque d'après les résultats trouvés que le matériau composite Ciment /Liège absorbe les fréquences moyennes et aigues mieux que les fréquences graves.

La figure 5.36 nous donne les valeurs de coefficient d'absorption acoustique de quelque matériau classique en fonction des fréquences selon le DTR [64]. Une comparaison du coefficient d'absorption acoustique du matériau composite Ciment /Liège avec quelque matériaux classiques est donnée par le tableau 5.14.

D'après le tableau 5.14 et la figure 5.36, on remarque que les quatre compositions à base du liège (expansé et cru) possèdent un pouvoir isolation acoustique plus élevée que le béton lisse et peint, le plâtre nu et le contreplaqué. Cependant, les fibres de bois compressées et les panneaux de laine de verre donne une meilleure isolation acoustique que le matériau composite Ciment/Liège.

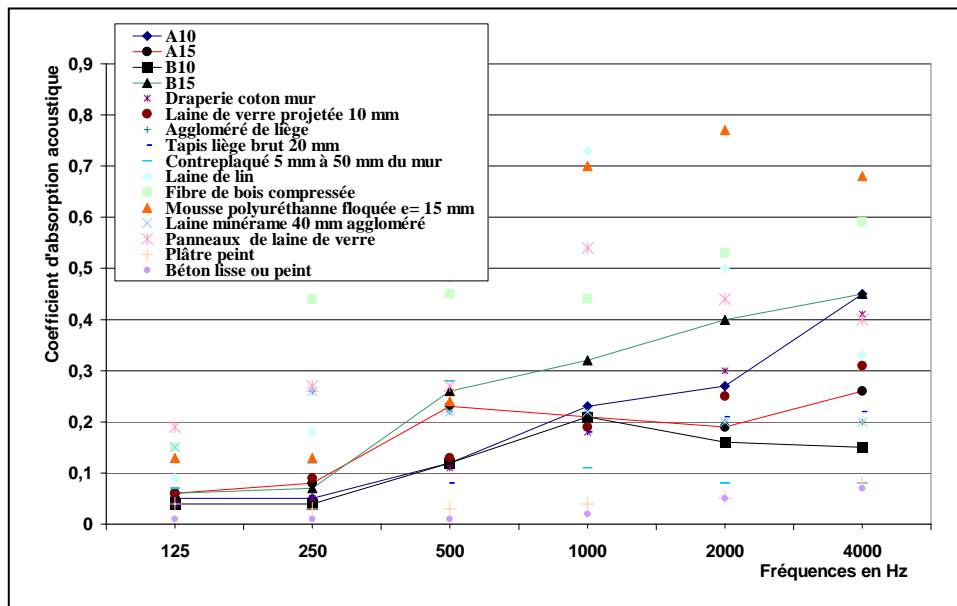


Figure 5.36 : L'évolution du coefficient d'absorption acoustique α en fonction de fréquence de quelques matériaux

Tableau 5.14 : Comparaison du coefficient d'absorption acoustique (α) des quatre compositions du matériau composite avec les matériaux classiques

Matériaux	Matériaux composites (C/L)			
	A ₁₀	A ₁₅	B ₁₀	B ₁₅
Béton lisse ou peint	<	<	<	<
Plâtre peint	<	<	<	<
Draperie coton mur	<	<	<	<
Laine de verre projetée (10 mm)	<	>	<	<
Aggloméré de liège	<	<	>	<
Tapis liège brut (20mm)	<	<	<	<
Contreplaqué (5 mm à 50mm du mur)	<	<	<	<
Laine de lin	<	>	>	<
Fibre de bois compressée ($\rho = 230 \text{ kg/m}^3$ e = 20 mm)	>	>	>	>
Mousse polyuréthane floquée (e =15mm)	>	>	>	<
Laine minérale 40 mm aggloméré	<	<	>	<
Panneaux de laine de verre	>	>	>	>

5.6. Confection des blocs en matériau composite

Pour la confection des blocs, nous avons choisi les compositions qui ont une concentration en liège 75 % de volume du ciment. Ces dernières sont les plus défavorables car ce matériau composite est très poreux et a une faible résistance à la compression. Ces blocs sont conservés pendant 14 jours dans l'eau et le reste à l'air libre du laboratoire. Les masses volumiques apparentes après 24 heures et à l'âge de 28 jours sont données dans le tableau 5.15.

Tableau 5.15 : Les masses volumiques des blocs Ciment- Liège

	Masse volumique apparente après démoulage (kg/m ³)	Masse volumique apparente à 28 jours (kg/m ³)
Blocs en liège expansé	669	827
Blocs en cru	596	740

D'après les résultats trouvés, on remarque que la masse volumique apparente augmente avec l'âge. L'augmentation de la masse volumique apparente jusqu'à 28 jours des blocs confectionnés avec des deux granulats est environ du 11 %. La masse volumique apparente à 28 jours des blocs à base des granulats du liège expansé est plus élevée d'environ 19 % que celle des blocs à base du liège cru.

Pour empêcher la pénétration de l'eau dans ces blocs, nous avons couvert les blocs par un enduit de ciment. Afin de vérifier l'adhérence de ce dernier aux blocs, un essai d'arrachement a été réalisé sur ces blocs à l'âge de 28 jours.

Trois carottages traversant toute l'épaisseur de l'enduit sont réalisés en des points choisis au hasard. Cette expérience est réalisée selon la norme NF P 15-201-1 (DTU 26.1) [65].

Une contrainte d'adhérence de 0.25 MPa a été trouvée, cette contrainte est inférieure de 16 % de la contrainte d'adhérence appliquée sur les briques en terre cuite, béton ordinaire et béton caverneux [64]. Un traitement plus approprié de la surface et où un choix plus approprié de l'enduit de ciment peut probablement améliorer l'adhérence.

5.7. Conclusion

L'étude expérimentale du matériau composite à base de liège a montré que la résistance à la compression et à la flexion diminue avec l'ajout de liège. Les caractéristiques mécaniques de ce composite et son pouvoir d'isolation lui permettent de trouver plusieurs utilisations dans les constructions. Cependant, le problème majeur de ce matériau est sa grande variation dimensionnelle.

CONCLUSION

Les quantités des déchets de liège dégagés sont considérables, et si on laisse ces déchets s'accumulés sans avoir recours au recyclage ou valorisation de ces déchets, on assistera à un problème de stockage et à une pollution de l'environnement. L'objectif principal de cette étude est l'étude de la possibilité de l'utilisation de ces déchets dans la fabrication d'un matériau composite isolant à base de ciment.

Notre étude expérimentale a porté sur trois types de déchets de liège expansé, cru et poudre de liège, ces derniers sont mélangés avec du ciment pour donner naissance un matériau composite isolant. Ce matériau composite est destiné à l'isolation dans les bâtiments afin de réduire la consommation d'énergie.

L'étude expérimentale nous a conduit aux conclusions suivantes :

- La conservation des éprouvettes dans l'eau pendant 14 jours ensuite à l'air du laboratoire nous donne une résistance à la compression la plus élevée.
- La masse volumique apparente diminue avec l'ajout du liège dans la composition ; et elle varie de 614 à 1581 kg/m³ pour les différentes compositions.
- La résistance à la compression et à la flexion est fonction de l'augmentation de la quantité de liège dans le matériau.
- La résistance à la compression des compositions A₁₀ (C/L=1/2), A₁₅ (C/L=1/3), B₁₀ (C/L=1/2) et B₁₅ (C/L=1/3) est entre 2 et 5 MPa. Par contre, la résistance à la flexion de ces compositions est entre 0.56 et 1.37 MPa.
- Quatre compositions optimales ont été obtenues pour le matériau composite à base du liège, deux pour le liège expansé (C/L=1/2 et C/L=1/3) et deux autres pour le liège cru (C/L=1/2 et C/L=1/3).
- Le retrait du matériau composite est considérable, il est plus élevé que celui du béton léger. La composition à base de liège cru B₁₅ (C/L=1/3) nous donne un retrait de 4650 µm/m à 90 jours.
- Le gonflement du matériau composite à base de liège cru est 2530 µm/m à 90 jours, il est plus important que le matériau composite à base de liège expansé.

-La perte de masse du matériau composite est importante, elle est inversement proportionnelle aux ajouts du liège dans la composition. La composition B₀₅ (C/L=1) présente la plus grande perte de masse environ de 13%.

-Le gain de masse du matériau composite à base de liège cru est environ de 25 %, ce gain de masse est presque le double de la perte de masse. Le gain et la perte de masse sont élevés dues à la nature poreuse du matériau composite.

-Les compositions moins poreuses absorbent une quantité d'eau plus élevée à 90 minutes du à la qualité poreuse du matériau composite, l'eau absorbée s'égoutte facilement à travers les pores.

-L'absorption d'eau par immersion est très élevée pour les deux matériaux (expansé, cru). Les compositions poreuses absorbent une quantité plus élevée, elle est d'environ de 22.5 % pour la composition B₁₅ (C/L=1/3) à base de liège cru et 22 % pour la composition A₁₅ (C/L=1/3), cette absorption est comparable à celle du béton léger.

-La conductivité thermique du matériau élaboré varie entre 0.19 à 0.34 W/m°C selon le dosage de liège.

-La plus faible conductivité thermique est celle de la composition B₁₅ (C/L=1/3), elle est de 0.19 W/m°C.

-Les conductivités thermiques des compositions A₁₀, A₁₅, B₁₀ et B₁₅ sont meilleures que le béton de mousse, le béton autoclave et le plâtre.

-Le coefficient d'absorption acoustique (α) du matériau composite Ciment/Liège est plus élevé que le béton lisse et peint, le plâtre nu et le contreplaqué.

-L'application de l'enduit du ciment sur les blocs donne une contrainte d'adhérence inférieure a celle préconisée par le DTU (26-1). Par conséquent, la vérification de l'adhérence de ces blocs avec d'autres enduits est recommandée.

-Le matériau composite à base de liège peut être utilisé dans plusieurs applications tels que la réalisation de cloison, la réalisation de panneaux de façade et les travaux divers d'isolation.

RECOMMANDATION

Nous recommandons de compléter ce travail par :

- L'utilisation des granulats de liège de dimension plus faible pour diminuer la perméabilité et l'absorption du matériau composite.
- La caractérisation chimique du matériau composite Ciment/Liège.
- Compléter ce travail par des études de durabilité.
- La réalisation d'autres essais de faisabilité sur le matériau composite.
- Etudes technico-économiques sur le recyclage du liège.
- Élargissement de cette étude par l'utilisation d'un autre liant comme le plâtre.

REFERENCES

1. Sidi Mohamed Karim EL HASSAR et Madjid AMIRAT « Economie d'énergie dans l'habitat ancien en Algérie » Physique du bâtiment et environnement du bâtiment- Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2004, pp. 16-22.
2. MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT « Projet de loi relative à la protection dans le cadre du développement durable » mai 2003, Alger, Algérie.
3. JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE « Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement » n°6, 5 février 1983.
4. JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE « Loi du 15 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets », n°77, 15 décembre 2001.
5. JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE « Loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie » n°51, 2 août 1999, Alger, Algérie.
6. JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE « Décret exécutif n° 2000-90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs » n°25, 30 avril 2000, Alger, Algérie.
7. MINISTERE DE L'HABITAT ET DE L'URBANISME « Commission Technique Permanente-Réglementation thermique des bâtiments d'habitation et Règles de calcul des pertitions calorifiques- Document Technique Réglementaire » CNERIB, décembre 1997, Alger, Algérie.
8. MINISTERE DE L'HABITAT ET DE L'URBANISME « Commission Technique Permanente-Règles de calcul des apports calorifiques- Document Technique Réglementaire » CNERIB, août 1998, Alger, Algérie.
9. Agopyan. V, Savastano Jr. H, John. VM, Cincotto. M.A, « Developments of vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brésil: an overview », Cement & Concrete Composites, 2004, pp. 1-10.
10. Idriss Yalaoui, « l'industrie du liège en difficulté », [http:// www.algerie-dz.com/article 1144.html](http://www.algerie-dz.com/article1144.html), 27 décembre 2004.
11. Astrand. L, Bessadi. E, Johansson. S, Laid. H, Teggour et Toumi. N, « Matériaux thermiquement isolants- Béton de mousse, panneau en laine de bois », Centre National d'Etudes et de Recherches intégrées au Bâtiment (Algérie) et Centre d'Etude de l'Habitat LUND (Suède), Edition Lund offset AB 1993.
12. Dreux. G et Festa. J, « Le nouveau guide du béton et ses constituants », huitième édition, Paris, 1998. pp. 332 à 343.

13. Neville.AM, « Propriétés des bétons », Edition Eyrolles, Paris, 2000.
14. Cormon. P, « Bétons légers d'aujourd'hui », Edition Eyrolles, Paris, 1973.
15. Mamillan. M, Bouineau. A, « Recherche sur les matériaux isolés et porteurs pour maisons individuelles », Centre de Recherches et l'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, 13 septembre 1983.
16. Arnould. M, Virlogeux. M, « Granulats et bétons légers », Edition Eyrolles, Paris, 1986.
17. Kazmierczak. C.S, «Permeability evaluation of lightweight concrete», Proceeding of the International Conference held in João Pessoa, Brazil,(2-5) november, 2000. pp. 552-558.
18. Adam. Michel « Béton hydraulique », in technique d'ingénieur, 1984, C2210, pp 3-12.
19. Société de Composants industrialisés-filiale BATICOMPOS du Groupe BATIMETAL « Unité panneaux sandwichs de Beni Mançour », BP, 75 Beni Mançour 06261 W. de Bejaïa.
20. Astrand. J, « Etude préliminaire des panneaux alfa », Lund comittee Habitat and Development Studies (LCHS), Lund University, 29 Août 1986
21. Le liège « Plaques d'aggloméré de liège - granulés de liège », [http:// www. Bienetremateriaux.com / isoler / liege.htm](http://www.Bienetremateriaux.com/isoler/liege.htm).
22. Georges. F : « Le liège aggloméré », Edition Dunod, Paris, 1937.
23. Comité Français de l'Isolation (CFI) « Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments », Commission technique du COMAPI, Edition Eyrolles, Paris, 1977.
24. HOLDING PUBLIC, Industries manufacturières -Entreprise Nationale du Liège et des Produits d'Isolation et d'Etanchéité, « Le chêne liège au service de l'industrie et du bâtiment ».
25. Mémento CATED, « Les bétons de granulats légers en France», Paris, Edition Eyrolles, Septembre 1980.
26. Alviset Lucien, « Matériaux de terre cuite », in, technique de l'ingénieur, C905, pp. 5-20, 1987.
27. Cormon. P, « Améliorations des bétons mousses », Le bâtiment bâtir, Novembre 1982
28. Chretien. G, « Matériau composites à matrice organique », Edition Eyrolles, Paris, 1986.

29 . ماهر بدر – م أفتاب احمد – م شفيق الرحمن م – بسام عفيش « الأداء الحراري لأنواع مختلفة من طوب البناء المستخدمة في المملكة العربية السعودية », مجلة معمارية ، تقنية البناء السعودية، سبتمبر 2003، ص 64-69

30. أسامة محمد محمد « انتاج انواع من الطوب ثلاثم البناء في ظروف البيئة الصحراوي » نداوية التنمية العمرانية في المناطق الصحراوية و مشكلات البناء فيها، وزارة الأشغال العامة و الإسكان المملكة العربية السعودية، 4-2 نوفمبر 2002 ص 821-830.
31. سعيد حميد أعبور ، د حميد نشات« استخدام صفات القصب في انتاج الواح عازلة حراريا » العمرانية في المناطق الصحراوية و مشكلات البناء فيها، وزارة الأشغال العامة و الإسكان المملكة العربية السعودية، 4-2 نوفمبر 2002 ص 809-818.
32. Mokhtari. F « Contribution à l'étude des composites à base de liants pouzzolaniques et de bambou », Thèse de doctorat, INAS de Lyon, France, 1991.
33. Joseph khedari, Pornnapa Watsanasathaporn, Jongjit Hirunlabh, « Development of Fibre-Based Soil-Cement Block with Low Thermal Conductivity », Cement and Concrete Composites, vol 27, 2005, pp. 1-12.
34. Joseph Khedari, Borisut Suttisonk, Naris Pratinthong, Jongjit Hirunlabh, « New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity », Cement and Concrete Composites, vol 23, 2001, pp. 65-70.
35. KRIKER Abdelouhed, « Caractérisation des fibres de Palmier Dattier et Propriétés des Bétons et Mortiers Renforcés par ces fibres en climat chaud et sec », Thèse de doctorat, ENP, Alger, 2005.
36. Benchikou Mohamed, « Elaboration et étude de matériau composite à base des fibres cellulosiques- application à l'isolation thermique », thèse de magister, centre universitaire de Médéa, 2000
37. Ledhem. A, Dheilily. R.M, Benmalek. M.L, Queneudec.M, « Properties of wood based composites formulated with aggregate industry waste», Construction and Building Materials, Vol 14, 22 Mai 2000, pp. 341-350.
38. Guimaraes SS, « Vegetable fiber-cement composites », Building Materials, London, 1990, pp. 98-107.
39. Soroushian, P. Shah Z, Won J.P, «Aging effects on the structure and properties of recycled waste paper fiber cement composites», Materials and structures, vol 29, 1996, pp. 312-317.
40. John VM, Agopyan V, Derolle A, « Durability of blast furnace-slag-based cement mortar reinforced with coir fibres», Building Materials. London, 1990, pp. 87-97
41. Paul R. Blankenhorn, Michael R. Silsbee, Brad D. Blankenhorn, Maria DicCola, Kevin Kessler « Temperture and moisture effects on delected properties of wood fiber-cement composites », Cement and Concrete Research,vol 29, 1999, pp. 737-741.
42. Jennifer L. Pehanicha, Paul R. Blankenhorna, Michael R. Silsbee « Wood fiber treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber-cement composites », Cement and Concrete Research,vol 34 , 2003, pp. 59-65.

43. Douglas C. Stahl, P.E, Asce .M, Skoraczewski. G, Arena. P and Stempski. B, « Lightweight concrete Masonry with Recycled Wood Aggregate », journal of materials in civil engineering, March/ April 2002, pp. 116-121.
44. Khan. M.I., « Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models », Building and Environnement, vol 37, 2001, pp. 608-614
45. Gery. M, «Transfert de la chaleur », Equipement de l'habitat, département de Génie Civil et Urbanisme, I.N.S.A, Lyon.
46. Brizard. CH, Renaud. H, « Métier du bâtiment – isolation thermique », Edition Foucher, Paris, 1995.
47. KooK-Han Kim, Sang-Eun, Jin-Keun Kim, Sungchul Yang « An experimental study on thermal conductivity of concrete », Cement Conctre Research, vol 33, 2003, pp. 363-371.
48. NF X10-012, « Matériaux faiblement conducteurs -Détermination de la conductivité thermique », Méthode de la plaque chaude gardée avec un échantillon symétrique, Décembre, 1972.
49. Mourtada. A, Bloch. A, Menguy. G et Laurent. M, « Conductivité thermique », N° 267, mars 1984.
50. Rabiey Ladan, Duquenoy Albert « Mesure de la Conductivité thermique avec les sondes en forme anneau », www.enitiaa-nantes.fr/agoral/IMG/pdf/poster_72.pdf
51. NF P15-471 ; « Méthode d'essai des ciments - Détermination des résistances mécaniques », AFNOR, Paris, 1990.
52. NF P15-301 ; « Liant hydraulique – Détermination, classification et spécifications des ciments », AFNOR, Paris, 1994.
53. NF B57-011; « Liège – Granulés cru de liège – Analyse granulométrique », AFNOR, Paris, 1973.
54. NF B 57-010 ; « Liège – Granulés cru et poudre – Spécifications », AFNOR, Paris, 1973.
55. NF B57-0.12; « Liège – Granulés cru de liège – Détermination de la masse volumique », AFNOR, Paris, 1973.
56. NF B57- 014 ; « Liège – Granulés cru de liège – Echantillonnage », AFNOR, Paris, 1973
57. NF B 57-013 ; « Liège – Granulés cru de liège –Détermination de l'humidité », AFNOR, Paris, 1973.
58. NF B 51-002 ; « Bois - caractéristiques physiques et mécaniques des bois », AFNOR, Paris, 1973.

59. Norme française ; « Technique des essais – Malaxeur (E) », AFNOR, Paris, 1960.
60. NF P15-412 ; « Technique des essais – Appareil à choc (E) », AFNOR, Paris, 1960.
61. EN 196-1 ; « Détermination des résistances mécaniques », AFNOR, Paris, 1999.
62. NF P15-433 ; « Technique des essais – Essai de retrait et de gonflement », AFNOR, Paris, 1963.
63. EN 480-5 ; « Méthode des essais- Détermination de l'absorption capillaire », AFNOR, Paris, 1995.
64. Document technique Réglementaire (D.T.R. C 3.1.1) « Isolation acoustique des paroi aux bruits aériens –Règle de calcul », CNERIB, Alger, 2004.
65. Document Technique Unifié (DTU 26.1) « Travaux de bâtiment - Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne » AFNOR, Paris, 1999.
66. Aziz, Murphy, Ramaswamy « Lightweight concrete using cork granules », The International Journal of Lightweight Concrete , Vol 1, N° 1, 1979, pp. 29-33.
67. Document Technique Unifié (D.T.U) « Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction », Paris, 1987.