



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en sciences

Filière : Génie civil

Option : Matériaux

Présenté par

Ziregue Ahmed

THEME

**Comportement physico-mécanique et thermique d'un
béton à base de sable calcaire allégé par des granulats de
liège: Etude expérimentale et modélisation du
comportement mécanique du composite**

Soutenu le: 21/04/2018

devant le jury:

Mr. GUEDDOUDA M^{ed} Kamal

Professeur à l'université de Laghouat

Président

Mr. BEDERINA Madani

Professeur à l'université de Laghouat

Examinateur

Mr. GUETTALA Salim

M.C.A. à L'université de Djelfa

Examinateur

Mr. BENCHEIKH Boubakeur

M.C.A. à l'université de Djelfa

Examinateur

Mr. HADJOUJJA Mourad

M.C.A. de l'université de Laghouat

Examinateur

Mme. QUENEUDEC T'KINT Michelle

Professeur de l'université d'Amiens

Invitée

Mr. KHENFER Mohamed Mouldi

Professeur à l'université de Laghouat

Directeur de thèse

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche de Génie Civil de l'Université de Laghouat et à l'unité de recherche **EPROAD** de l'université de Picardie Jules Vernes à Amiens en France.

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance et mes remerciements à mon directeur de thèse; Monsieur **KHENFER Mohamed Mouldi**, Professeur à l'Université de Laghouat d'avoir proposer et diriger ce sujet. Je lui suis très reconnaissant pour tous ces conseils et ces directives durant toute la période de préparation de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont également à Madame **QUENEUDEC T'KINT Michelle**, professeur à l'université de Picardie Jules Vernes, chef d'équipe **IMAP** de l'unité de recherche **EPROAD** de m'avoir accueilli dans son laboratoire. Son soutien durant mes stages de courte durée, ainsi que son assistance et ses conseils objectifs, sa disponibilité et son assistance par des conseils toujours objectifs et éclairés; m'ont été grandement profitables.

Je tiens à remercier vivement monsieur **GUEDDOUDA Mohamed Kamal**, Professeur à l'université de Laghouat de m'honorer en acceptant de présider l'examen de cette thèse.

J'exprime également ma reconnaissance à monsieur **BEDERINA Madani**, Professeur à l'Université de Laghouat, à monsieur **GUETTALA Salim**, maître conférence à l'université de Djelfa, à monsieur **BENCHEIKH Boubakeur**, maître conférence à l'université de Djelfa et à monsieur **HADJOUJJA Mourad**, maître de conférence à l'université de Laghouat d'avoir accepter d'examiner ce travail.

Je n'oublierais pas de remercier madame **Rose Marie DHELLY**, monsieur **Justin HOUESSO** et monsieur **Nicolas MONTRELAY** de l'unité de recherche **EPROAD** qui m'ont beaucoup aidé à réaliser une bonne partie de mes essais.

Je tiens à remercier Monsieur **FERHAT Ahmida** pour sa contribution à la réalisation des essais thermiques.

Je tiens à remercier Monsieur **KROBBA Benharzallah** et Monsieur **MERRAH Ahmed** pour leurs encouragements et leur soutien.

Mes sincères reconnaissances à tous les enseignants du département de génie civil en particulier ceux qui ont contribué de près ou de loin par leurs conseils et leurs encouragements. Je tiens en fin à remercier les membres du laboratoire de génie civil en particulier messieurs **BIGAA**, **MEKDAL**, et **BENSAFIDINE**.

A.Ziregue

Dédicaces

A mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de ma vie.

A ma très chère épouse qui est la source de mon courage et de ma motivation.

A mes aimables enfants : Belkacem, Safouane, Fatima-Zohra et Khalil.

A mon frère Bachir et mes sœurs.

A tous mes amis fidèles qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

A mes proches.

Je dédie ce travail

ملخص:

يندرج هذا العمل ضمن المحور الرئيس المتمثل في ترميم النفايات الصناعية الصلبة بهدف تطوير مواد بناء ذات خواص عزل حرارية عالية. النفايات المثمنة تتمثل في الرمل الكلسي الناتج عن بقايا تكسير الأحجار الكلسية في مقالع تصنيع الحصى و حبيبات الفلين الممدد الناتج عن نفايات تصنيع ألواح الفلين. في حالة بقاء الخواص الميكانيكية ضمن حدود مقبولة، فإن فكرة إدماج نسب معينة من حبيبات الفلين في مصفوفة إسمنتية بالرمل الكلسي تعتبر جد هامة، ليس من حيث تطوير الخواص الحرارية للمواد المشكلة فحسب، بل أيضا من حيث تخفيض الحمولات الشاقولية المنقولة عبر الأعمدة إلى الأساسات. هذه الميزات أدت إلى تطوير الخرسانة الكلسية الخفيفة.

النتائج الأولية المتحصل عليها بينت القدرة على تطوير مواد بناء خفيفة ذات مميزات عزل حرارية عالية باستعمال حبيبات الفلين . بالمقابل فإنه تبين انخفاض محسوس في المقاومة الميكانيكية للخرسانة الكلسية الخفيفة مع ازدياد نسبة الحبيبات. معامل النقل الحراري الضعيف المقرون بمعامل تخزين حراري عال يشهد على الجودة العالية لخواص العزل الحراري للخرسانة الكلسية الخفيفة المشكلة. دراسة تأثير ابعاد حبيبات الفلين سمحت بملاحظة أن على عكس الخرسانات العادية فإن مقاومة الضغط تتغير باتجاه عكسي لأبعاد الحبيبات و هو نفس الحال بالنسبة للخصائص الحرارية. ان الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية والحرارية للمواد المطورة والتي تم الحصول عليها تشجع على تطوير هذه المواد وتوفر إمكانيات كبيرة لاستخدامها كعناصر عازلة، سواء على مستوى عناصر التعبئة أو العناصر الجاهزة.

كلمات البحث: الخرسانة الخفيفة الحبيبات، معامل العزل الحراري، الفلين، الرمل الكلسي، ترميم العزل الحراري.

Résumé

Ce travail a pour objectif, la valorisation de déchets industriels solides dans la perspective de développement de matériaux de construction thermiquement isolants. Ces déchets sont : la fraction sableuse des résidus de concassage de roches calcaires et les granulats de liège expansé issus de l'industrie des panneaux de liège aggloméré. Dans la mesure où les caractéristiques mécaniques restent suffisantes, l'idée d'incorporation de granulats de liège dans une matrice cimentaire à base de sable de calcaire s'avère très intéressante, non seulement dans l'amélioration des performances thermiques des matériaux élaborés, mais également dans la réduction des charges verticales transmises aux fondations. Ces impératifs ont conduit à l'élaboration de Bétons Calcaires Légers (BCL). Les résultats obtenus révèlent l'intérêt remarquable du caractère d'allégement des granulats de liège, notamment, dans l'amélioration des performances thermiques des bétons élaborés. Par contre, on enregistre une chute considérable de la résistance mécanique en fonction du dosage en granulats légers. Les faibles conductivités thermiques liées à des capacités calorifiques élevées des bétons élaborés en témoignent sur leurs qualités d'isolation et leurs capacités de stockage d'énergie malgré leurs masses volumiques assez faibles. Une étude sur l'effet de taille des granulats de liège a permis de remarquer que contrairement aux bétons traditionnels la résistance à la compression est inversement proportionnelle à la taille des granulats. Il en est de même pour les propriétés thermiques. Les propriétés physico-mécaniques et thermique obtenues pour les matériaux développés, encouragent le développement de ces matériaux et ouvrent de grandes possibilités de les utiliser comme éléments isolants, que ce soit au niveau des éléments de remplissage ou des éléments préfabriqués.

Mot clés: Béton de granulats légers, conductivité thermique, liège, sable calcaire, valorisation, isolation thermique.

Abstract

This work has for objective, the valorisation of industrial wastes in the perspective of development of thermally insulating building materials. These wastes consist of: the sand fractions of residual crushing calcareous rock and an expanded cork aggregates from the agglomerated cork industry. Insofar as the mechanical characteristics remain sufficient, the idea of incorporating cork aggregates into a cementitious matrix based on limestone sand, proves very advantageous not only in improving the thermal performance of the materials produced, but also in reduction of vertical loads transmitted to foundations. These requirements led to the development of light limestone concretes (BCL). The results obtained reveal the remarkable interest of the lightening character of cork aggregates, in particular, in improving the thermal performance of elaborated concrete. On the other hand, a considerable drop in strength is recorded as a function of the light aggregate dosage. The feeble thermal conductivities linked to the high calorific values of the elaborated concretes testify on their qualities of insulation and their capacities of energy storage in spite of their relatively low densities. A study on the size effect of cork aggregates pointed out that, contrary to traditional concretes, the compressive strength is inversely proportional to the size of the aggregates. The same is true for the thermal properties. The physico-mechanical and thermal properties obtained encourage the development of these materials and offer great possibilities for their use as insulating elements, whether at the level of filling elements or prefabricated elements.

Keywords: Lightweight; aggregate; thermal conductivity; cork; calcareous sand; valorization; insulation

Table des matières

Introduction générale.....	1
Partie I: Aspect théorique et revue bibliographique	
Chapitre I: Bétons et Granulats Légers	
I.1. Les granulats légers.....	5
I.1.1. Introduction.....	5
I.1.2. Types de granulats légers.....	5
I.1.3. Classification des granulats.....	5
I.1.4. Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers.....	6
I.2. Etat d'art sur les sables calcaires.....	10
I.2.1. Introduction.....	10
I.2.2. Historique.....	10
I.2.3. Les bétons et mortiers à base de sable calcaire.....	10
I.2.4. influence du taux de fine sur les propriétés des bétons.....	11
I.2.4.1. Ouvrabilité.....	11
I.2.4.2. Densité et porosité.....	11
I.2.4.3. Réactivité des fines calcaires.....	14
I.2.5. Conclusion.....	15
I.3. Etat d'art sur le liège.....	15
I.3.1. Introduction.....	15
I.3.2. Origine et historique du liège.....	15
I.3.3. Structure et anatomie du liège.....	16
I.3.4. Composition chimique.....	18
I.3.5. Production du liège.....	19
I.3.6. Propriétés du liège.....	20
I.3.6.1. Densité du liège.....	20
I.3.6.2. Propriétés mécaniques du liège.....	20
I.3.6.3. Propriétés thermiques.....	21
I.4. Les bétons légers.....	21
I.4.1. Introduction.....	21
I.4.2. Définitions et classification.....	22
I.4.3. Différence entre bétons classiques et bétons légers.....	23
I.4.4. Propriétés physiques des bétons légers.....	24
I.4.4.1. Masse volumique.....	24
I.4.4.2. Porosité.....	25
I.4.4.3. Absorption d'eau et sensibilité à l'humidité.....	26

I.4.5. Propriétés mécaniques des bétons légers	27
I.4.5.1. Résistance à la compression des bétons légers	28
I.4.5.2. Résistance à la flexion des bétons de granulats légers.....	31
I.4.5.3. Mode de rupture des bétons de granulats légers	32
I.5. les bétons de granulats de liège.....	33
I.5.1. Propriétés physico-chimiques des bétons de granulats de liège	33
I.5.1.1. Compatibilité du liège avec les matrices cimentaires	33
I.5.1.2. Densité des bétons de liège	34
I.5.2. Propriétés Thermomécanique des bétons de granulats de liège.....	35
I.5.2.1 Influence de l'effet de taille sur les caractéristiques thermo-mécaniques	35
I.5.2.2. influence de la nature du liège	38
I.5.2.3 Influence du facteur d'allègement	38

Chapitre II: Transfert de chaleur et méthodes de mesure

II.1 Modes de Transfert de chaleur.....	41
II. 2 Transfert thermique dans un milieu poreux.....	43
II.2.1 Différents paramètres de transfert de chaleur.....	43
II.2.2 Différentes techniques de mesure des paramètres thermiques	44
II.2.2.1 Méthode de la plaque chaude gardée.....	45
II.2.2.2 Méthode du fil chaud.....	47
II.2.2.3 Méthode de Hot-disk	47
Synthèse bibliographique.....	51

Partie II Chapitre III: Matériaux et méthodes expérimentales:

III.1 les matières premières.....	53
III.1.1 Le Sable.....	53
III.1.2 Le ciment.....	55
III.1.3 Les granulats de liège	55
III.1.3.1 Granulométrie.....	55
III.1.3.2 La masse volumique.....	56
III.1.3.3 Absorption d'eau et porosité	59
III.1.3.4 Observation au microscope	60
III. 1.3.5. Analyse chimique	61
III.1.3.6 Caractérisation mécanique	62
III.1.4 Les adjuvants.....	63
III.2. Formulation et élaboration des bétons calcaires légers.....	64
III.2.1 Formulation des bétons calcaires	64
III.2.1.1 Formulation du mortier témoin	64
III.2.1.2 Formulation des bétons élaborés	65
III.2.2 Techniques de fabrication	67

III.2.2.1 Préparation des matériaux	67
III.3 Techniques expérimentales.....	69
III.3.1. Essais réalisés sur le béton frais	69
III.3.2 Caractérisation physico-mécanique des bétons élaborés	69
III.3.2.1. Masse volumique apparente	69
III.3.2.2 Variations dimensionnelles	69
III.3.2.3 Mesure de Porosité accessible à l'eau	70
III.3.2.4 Résistances mécaniques	70
III.3.2.5 Méthode de détermination des paramètres thermiques	73

Partie III: Résultats et discussion

Chapitre IV: Etude de la faisabilité du béton de liège

IV.1 Caractéristiques du béton frais.....	76
IV.1.1 Etude de la maniabilité.....	76
IV.1.2 Masse volumique à l'état frais	76
IV.2 Caractéristiques du béton durci.....	77
IV.2.1 Caractéristiques physiques	77
IV.2.1.1 Masse volumique	77
IV.2.1.2 Variations dimensionnelles	78
IV.2.1.3 Porosité accessible à l'eau.....	79
IV.2.2 Etude microstructurale	80
IV.2.3 Analyse chimique.....	84
IV.2.4 Caractéristiques mécaniques	85
IV.2.4.1 Résistance à la compression.....	85
IV.2.4.2 Résistance à la flexion.....	86
IV.2.4.3 Mode de rupture	87
IV.2.4.4 Module d'élasticité en compression	88
IV.2.4.5 Evolution de la flèche en fonction de la charge	91
IV.2.5 Modélisation du comportement mécanique	92
IV.2.5.1 Modèles de prédiction de la résistance à la compression.....	92
IV.2.5.1 Modèles de prédiction du module de Young	95
IV.2.6 Comportement thermique	97
IV.2.6.1 conductivité thermique.....	98
IV.2.6.2 Diffusivité thermique	100
IV.2.6.3 Capacité calorifique	101
IV.3 Synthèse de l'étude de Faisabilité.....	102

Chapitre V: Etude de l'effet de taille sur les propriétés du béton de liège

V.1. Introduction.....	104
V.2. Dosages et différentes compositions des bétons de liège.....	104

V.3. Interprétation des résultats.....	104
V.3.1. Caractérisation du Béton à l'état frais	104
V.3.1.1 Maniabilité.....	104
V.3.1.2 Densité des BCLL à l'état frais	106
V.3.2. Caractérisation du béton durci.....	106
V.3.2.1 Répartition et liaison matrice- granulats	106
V.3.2.2 Caractéristiques physiques et thermiques.....	108
V.3.2.3 Caractéristiques mécaniques	115
V.3.2.3 Analyse thermomécanique	119
Conclusion générale et perspectives.....	122
Références bibliographiques.....	125

Liste des figures

Figure I.1: Etalement et temps d'écoulements du mortier en fonction du taux des fines calcaires.....	11
Figure I.2: Evolution de la densité en fonction du taux de fillers.....	12
Figure I.3: Evolution de la porosité de mortier en fonction du taux de fillers.....	12
Figure I.4: Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers.....	12
Figure I.5: Résistance à la compression (3, 7 et 28 jours) du mortier composé avec différents taux de fines calcaires	13
Figure I.6: Influence du taux de remplacement des fillers calcaires sur la résistance à la traction du béton.....	14
Figure I.7: Le chêne liège et son écorce.....	16
Figure I.8: Répartition mondiale des subéraies.....	16
Figure I.9: Représentation schématique d'une coupe axiale d'un tronc de chêne liège <i>Quercus suber</i>	17
Figure I.10: Représentation schématique des cellules du liège dans les trois directions.....	18
Figure I.11: Représentation schématique des cellules du liège : a radial, b tangentiell.....	18
Figure I.12: Structure cellulaire du liège dans les deux plans a radial, b tangentiell.....	18
Figure I.13: Représentation schématique d'une cellule de liège.....	18
Figure I.14: Courbe contrainte-déformation suite à une compression uni-axiale d'un échantillon de liège.....	21
Figure I.15: Représentation des différents types de béton légers.....	23
Figure I.16: Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats	24
Figure I.17: Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R-87	25
Figure I. 18: Porosité du béton.....	26
Figure I.19: Évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du dosage en ciment de bétons ayant un affaissement de 50mm et confectionnés avec différents types de granulats légers.....	29
Figure I.20: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de faible résistance.....	30
Figure I.21: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de grande résistance.....	30

Figure I.22: Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains.....	31
Figure I.23: Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction.....	32
Figure I.24: Transfert des efforts dans un béton de granulats légers.....	33
Figure I.25: Effet de l'ajout de granulés de liège (20% en poids) sur le taux de chaleur d'hydratation du ciment.....	34
Figure I.26: Variation de la masse volumique du béton conservé à l'air libre.....	35
Figure I.27: Corrélation entre la résistance à la compression et la densité.....	35
Figure I.28: Influence de la taille des granulats de liège sur la résistance à la compression des mortiers de liège.....	36
Figure I.29: Influence de l'incorporation du liège dans la résistance à la compression des bétons.....	37
Figure I.30: Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège	38
Figure I.31: Variation de la résistance relative en fonction du dosage en granulats.....	39
Figure I.32: Variation de la porosité des mortiers en fonction du dosage en granulats	40
Figure I.33: Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité.....	40
Figure II.1: Schéma de principe de la plaque chaude gardée.....	46
Figure II.2: Schéma du montage de la méthode du fil chaud.....	47
Figure II.3 : Principe expérimental du Hot Disk.....	49
Figure II.4: Montage standard du Hot Disk	49
Figure III.1: Courbe granulométrique du sable calcaire.....	54
Figure III.2: Diffractogramme du sable calcaire.....	54
Figure III.3: Courbe granulométrique des granulats de liège.....	56
Figure III.4: Schémas de principe de mesure des masses volumiques réelles.....	57
Figure III.5: Mesure de la masse volumique réelle et absolue.....	58
Figure III.6: Courbe d'absorption des granulats.....	60
Figure III.7: Courbe de désorption des granulats.....	60
Figure III.8: Microscope optique.....	61
Figure III.9: Photo d'un granulats de liège X40.....	61
Figure III.10: Spectre infrarouge du liège.....	62
Figure III.11: Photo de la presse universelle traction compression Modèle AG-X.....	63
Figure III.12: Dispositif de traction au fil.....	63
Figure III.13: Evolution de la résistance en compression en fonction de la déformation.....	63
Figure III.14 : Evolution de la contrainte en flexion en fonction de la déformation.....	63

Figure III.15: Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C.....	65
Figure III.16: Egouttage des granulats de liège.....	68
Figure III.17 Confection des éprouvettes de béton de liège.....	68
Figure III.18: Photo d'éprouvettes de béton de liège.....	69
Figure III.19: Rétractomètre.....	70
Figure III.20: Photo de l'appareil de mesure de la porosité.....	70
Figure III.21: Schémas de l'essai de flexion.....	71
Figure III.22: Essai de compression.....	72
Figure III.23: Essai de flexion trois points.....	72
Figure III.24: Dispositif de mesure du module d'élasticité.....	73
Figure III. 25: Dispositif de l'analyseur thermique Hot Disk TPS.....	74
Figure III.26: Photo de La sonde TPS	74
Figure III.27: Photo de la sonde TPS entre deux échantillons	74
Figure IV.1: Evolution de l'affaissement du béton de liège en fonction du dosage en granulats.....	76
Figure IV.2: Variation de la masse volumique du béton de liège à l'état frais en fonction du dosage en granulats.....	77
Figure IV.3: Variation de la masse volumique du béton de liège à l'état durci en fonction du dosage en granulats.....	78
Figure IV.4: Variation du retrait en fonction de l'âge.....	78
Figure IV.5: Variation du retrait en fonction du dosage en granulats.....	79
Figure IV.6: Variation de la porosité en fonction du dosage en granulats.....	80
Figure IV.7: Répartition des granulats dans la matrice.....	80
Figure IV.8: Liaison granulat- matrice.....	81
Figure IV.9: Microstructure du BCLL0.....	82
Figure IV.10: Microstructure du BCLL 20%	83
Figure IV.11: Microstructure du BCLL 50%.....	84
Figure IV.12: Spectre infrarouge des BCLL.....	85
Figure IV.13: Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats.....	86
Figure IV.14: Résistance à la compression en fonction de la densité.....	86
Figure IV.15 : Résistance à la compression en fonction de la porosité.....	86
Figure IV.16: Résistance à la flexion en fonction du dosage en granulats.....	87
Figure IV.17: Résistance à la flexion en fonction de la densité.....	87
Figure IV.18: Mode de rupture du composite.....	88

Figure IV.19: Graphe contrainte déformation des BCLL.....	89
Figure IV.20 Variation de la résistance à la compression en fonction de la déformation des BCLL.....	90
Figure IV.21: Variation du module d'élasticité en fonction du dosage en granulats.....	91
Figure IV.22: Evolution de la charge en fonction de la flèche.....	92
Figure IV.23: Résultats expérimentaux et modèles théoriques de la résistance en compression à 28 jours du BCLL 3/8 pour les deux modes de conservation.....	94
Figure IV.24: Variation du module d'élasticité des BCLL en fonction de leur densité.....	95
Figure IV.25: Variation du module d'élasticité des BCLL en fonction de leur résistance.....	95
Figure IV.26: Confrontation des modules d'Young de bétons légers obtenus par les formules empiriques et les résultats expérimentaux.....	96
Figure IV.27: Confrontation des modules d'Young de bétons légers obtenus par les formules empiriques modifiées et les résultats expérimentaux.....	97
Figure IV.28: Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en granulats.....	98
Figure IV.29: Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité.....	99
Figure IV.30: Variation de la conductivité thermique en fonction de la porosité.....	99
Figure IV.31: Variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression.....	100
Figure IV.32 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage en granulats.....	100
Figure IV.33: Variation de la diffusivité thermique en fonction de la porosité	101
Figure IV.34: Variation de la capacité calorifique en fonction du dosage en granulats.....	101
Figure IV.35: Variation de la capacité calorifique en fonction de la densité.....	101
Figure V.1: Variation de l'affaissement des bétons frais en fonction du dosage en granulats..	105
Figure V.2: Variation de la masse volumique des BCLL en fonction du dosage en granulats de liège.....	106
Figure V.3: Photos des coupes des échantillons de BCLL.....	107
Figure V.4: photos des vues des échantillons de BCLL au microscope X40.....	108
Figure V.5: Variation de la densité des BCLL en fonction du dosage.....	109
Figure V.6: Variation de la conductivité des BCLL0/3 en fonction du dosage.....	110
Figure V.7: Variation de la conductivité des BCLL3/8 en fonction du dosage.....	111
Figure V.8: Variation de la conductivité des BCLL8/15 en fonction du dosage.....	111
Figure V.9: Variation des conductivités thermiques des BCLL en fonction du dosage.....	112
Figure V.10: Variation de la conductivité thermique des BCLL en fonction de leurs masses volumiques.....	112
Figure V.11: Variation de la capacité calorifique en fonction du dosage.....	114

Figure V.12: Variation de la diffusivité thermique des BCLL en fonction du dosage.....	115
Figure V.13 : Variation de la résistance à la compression des BCLL 0/3 en fonction du dosage.....	116
Figure V.14: Variation de la résistance à la compression des BCLL 3/8 en fonction du dosage.....	116
Figure V.15: Variation de la résistance à la compression des BCLL 8/15 en fonction du dosage.....	117
Figure V.16: Variation de la résistance à la compression des BCLL en fonction du dosage....	117
Figure V.17: Variation de la résistance à la compression des BCLL en fonction de la masse volumique.....	118
Figure V.18: Variation de la résistance à la flexion des BCLL.....	119
FigureV19: Variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique.....	121

Liste des tableaux

Tableau I.1: Choix des granulats en fonction des classes de béton.....	7
Tableau I.2: Caractéristiques des granulats légers.....	9
Tableau I.3: Densité et conductivité thermique de différents isolants dont le liège.....	21
Tableau I.4: Classification fonctionnelle des bétons légers selon la RILEM 1970	22
Tableau I.5: Classification des bétons légers selon la norme ACI 21 213R-87	22
Tableau I.6: Valeurs de la conductivité thermique des composites.....	38
Tableau III.1: Propriétés physiques du sable calcaire.....	53
Tableau III.2: Caractéristiques chimiques du ciment.....	55
Tableau III.3: Caractéristiques physico-mécaniques du ciment.....	55
Tableau III.4: Résultats de mesure des masses volumiques des granulats de liège.....	59
Tableau III.5: Valeurs du coefficient d'absorption et du gain massique.....	60
Tableau III.6: Affectations des bandes d'absorption et du groupement fonctionnel aux principaux composés de liège.....	62
Tableau III.7: Valeurs de la résistance en compression en fonction du rapport E/C.....	64
Tableau III.8: Compositions des bétons allégés avec des granulats de liège 3/8.....	66
Tableau III.9: Compositions des bétons allégés par les granulats de liège de classe 0/3.....	66
Tableau III.10: Compositions des bétons allégés par les granulats de liège de classe 3/18.....	67
Tableau III.11: Formulation des bétons allégés par les granulats de liège de classe 8/15.....	67
Tableau IV.1: Valeurs des coefficients utilisés dans les modèles théoriques.....	94
Tableau IV.2: Valeur des caractéristiques thermiques.....	98
Tableau V.1: Valeurs de l'affaissement et du temps d'écoulement des BCLL.....	105
Tableau V.2: Valeur des densités des BCLL.....	109
Tableau V.3: Valeurs des conductivités thermiques des BCLL.....	110
Tableau V.4: Valeurs des capacités calorifiques des BCLL.....	113
Tableau V.5: Valeurs des diffusivités thermiques des BCLL.....	114
Tableau V.6: Valeurs des résistances à la compression des BCLL.....	115
Tableau V.7: Valeurs des résistances à la flexion des BCLL.....	118
Tableau V.8: Classification fonctionnelle des bétons légers selon la Rilem.....	120
Tableau V.9: Caractéristiques des BCLL.....	120

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Le béton traditionnel est par excellence le matériau le plus employé dans le domaine de Génie civil. Il demeure avec la charpente métallique les matériaux les plus employés dans la construction des ossatures et des ouvrages de Génie Civil en raison des performances mécaniques qu'ils offrent. Par ailleurs, utilisé dans la construction des éléments de remplissage, le béton traditionnel n'est plus le matériau idéal pour l'assurasson du confort (isolation thermique et phonique). En effet, sa résistance élevée dépasse de loin les sollicitations que supportent ces éléments. De plus, leur masse volumique importante comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ implique des forces d'inertie importantes lors des secousses sismiques et des charges verticales élevées. Ce qui conduit à des dimensions importantes pour les éléments de structure et pour le système de fondation. A ces inconvénients s'ajoute le coût de transport et le problème d'isolation thermique et phonique qui sont fonction de la masse volumique du matériau. En conséquence, construire des murs avec un matériau dense influe considérablement sur le côté économique, notamment, la consommation énergétique des locaux et le confort thermique des habitations.

De part son importance dans la composition des bétons et des mortiers, le sable naturel, notamment le sable alluvionnaire est l'un des composants principaux constituant des bétons. Les dépôts de sable naturel, surtout ceux qui sont situés près des grands centres urbains, risquent de s'épuiser ou d'entraîner des frais pour la protection de l'environnement. Plusieurs types de résidus et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Parmi ces résidus, on trouve ceux provenant de l'industrie des granulats en particulier des stations de concassage. Ceux-ci génèrent dans certaines régions des quantités importantes de résidus actuellement non exploités et qui constituent à la fois une gêne environnementale et une perte de matière première. L'importance de gisement que constituent ces déchets, de nature souvent calcaire, a conduit vers une valorisation susceptible de répondre aux besoins socioéconomiques, écologiques et de satisfaire les objectifs d'économie d'énergie notamment dans les pays en développement.

L'évolution du monde actuel est contraint à repenser sur les modes de construction. En effet, aujourd'hui, le secteur de la construction consomme de l'énergie en quantité importante. Il est responsable d'environ d'un quart des émissions de dioxyde de carbone, sans oublier l'épuisement des ressources non renouvelables. Ce secteur doit donc s'innover pour limiter ses impacts sur l'environnement tout en garantissant un confort aux usagers.

Dans ce contexte, les agro-matériaux, matériaux issus en partie de la biomasse, sont de plus en plus développés et commercialisés sur le marché des matériaux de construction. Ces agro-matériaux, de par leur caractère écologique, ils permettent d'améliorer le bilan environnemental de la construction et en particulier du bâtiment. Parmi les agro-matériaux destinés à être utilisés dans le secteur du bâtiment on trouve les bétons végétaux. Dans l'objectif d'exploiter leurs propriétés thermiques, acoustiques et hygroscopiques, des études scientifiques ont contribué au développement de ces bétons végétaux. Elles visent à étudier et à comprendre le comportement de ces matériaux face à différentes sollicitations. Ainsi, les propriétés thermiques, mécaniques, hydriques et acoustiques ont été explorées. Cependant, certains besoins scientifiques et difficultés techniques limitent la généralisation de leur utilisation.

L'objectif de ce travail est la valorisation de déchets calcaires par leur transformation en matériaux isolants de construction et isolants par incorporation de granulats de liège dans une matrice cimentaire. Les techniques de fabrication utilisées doivent être simples, peu consommatrices d'énergie et non polluantes. L'idée d'une réduction de la masse volumique, entraînant une augmentation des performances thermiques de ces matériaux, peut donc se révéler intéressante

La voie envisagée dans ce travail est la substitution d'une partie de la matrice calcaire-cimentaire par des granulats de liège. L'idée d'incorporer des déchets industriels, tels que les déchets de fabrication des panneaux de liège naturel et après expansion, s'avère très prometteuse non seulement pour l'allègement du béton calcaire, mais également pour la protection de l'environnement.

Le premier objectif de ce travail est de contribuer à l'amélioration de nos connaissances sur ce béton léger à base des granulats de liège et de dévoiler ses caractéristiques physico-mécaniques et thermiques.

Le second objectif consiste à la valorisation des matériaux locaux qui permet de susciter un intérêt de par ses avantages réels qu'ils offrent.

Afin d'atteindre ces objectifs cités supra, notre travail est subdivisé en trois parties étroitement liés :

- La première est consacrée à une revue sur la documentation accentuée sur les bétons légers en général et notamment sur les bétons de liège, elle comporte deux chapitres.
 - Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les bétons et granulats légers, il sera beaucoup plus axé sur le liège et les composites à base de liège, ainsi que le sable calcaire et son utilisation.

- Le deuxième chapitre fait l'objet d'un aspect théorique sur les milieux poreux et le transfert thermique.
- La deuxième partie sera réservée à la caractérisation des matériaux et à la présentation des méthodes expérimentales
- La troisième partie, englobant les résultats expérimentaux, est divisée en deux chapitres
 - Le premier chapitre est consacré à une étude de faisabilité des bétons calcaires à base de granulats de liège.
 - Le deuxième chapitre sera réservé à l'étude de l'effet de taille des granulats de liège sur les caractéristiques physicomécaniques et thermiques des bétons élaborés

Enfin, sur la base des résultats obtenus, on termine notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Partie I:

Aspect théorique et revue

bibliographique

Cette partie présente le contexte général de l'étude ainsi que les bases scientifiques du comportement thermique et mécanique des bétons de granulats légers. Dans un premier chapitre, des généralités sur les bétons et granulats légers seront présentées en général puis les bétons de granulats de liège en particulier. Un état d'art sur le liège sera explicité dans l'objectif de connaître les propriétés de ce matériau

Une attention particulière sera donnée au sable calcaire, de son utilisation dans les bétons et mortiers et de l'influence des fines qu'il comporte. Des résultats expérimentaux publiés par des auteurs sur les bétons de granulat de liège seront exposés. L'objectif est de synthétiser l'influence positive ou négative des différents facteurs sur le comportement thermique (conductivité thermique) et mécaniques (résistance en compression et module d'élasticité) des bétons de liège. Cette synthèse constitue une bonne base pour définir la campagne expérimentale permettant l'étude du comportement des bétons de granulats de liège et les différentes méthodes de mesure des propriétés thermiques ainsi que les paramètres extrinsèques affectant ces propriétés seront considérés.

Dans un second chapitre nous explicitons l'aspect théorique relatif au transfert de chaleur dans les milieux poreux et les différentes méthodes utilisées dans la mesure des caractéristiques thermiques seront détaillées.

Chapitre I:

Bétons et Granulats Légers

I.1. Les granulats légers

I.1.1. Introduction

Le granulat léger est défini par sa masse volumique inférieure ou égale à 2000 kg/m^3 (**Eurocode 2–1992**). Selon l'origine des granulats, ils sont classifiés en granulats naturels et granulats artificiels. Les caractéristiques de ces granulats sont décrites dans les ouvrages d'Arnould et Virlogeux (**Arnould et al. 1986**), de Neville (**Neville, 2000**) et de Chandra (**Chandra et Berntsson, 2002**). Les descriptions et les caractéristiques des granulats sont également fournies par les fabricants.

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, ce qui explique leur légèreté. Ils peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et ayant subi ou non des transformations. Leur utilisation dans le béton a pour but de diminuer de façon plus ou moins importante, selon le granulat léger choisi, la masse volumique. Par contre, cette réduction de la masse volumique a pour conséquence de diminuer la résistance à la compression.

I.1.2. Types de granulats légers

on dénombre trois catégories de granulats légers : ceux destinés aux bétons Légers structuraux, ceux pour les bétons légers isolants et ceux pour les bétons Légers de remplissage

- **Les granulats légers pour bétons structuraux**

Les bétons légers structuraux sont fabriqués à partir de granulats de source naturelle, tels que les pierres ponce, les scories ou le tuf. Plusieurs granulats légers de type expansé ou fritté sont couramment utilisés: argile expansée, schiste expansé, cendres volantes frittées, laitier expansé, perlite, vermiculite. Le procédé d'expansion de ce type de granulat consiste principalement à chauffer la matière première homogénéisée sous forme de pâte, préalablement extrudée à des températures comprises entre **1000** et **1500 °C**. Cette chaleur intense a pour effet de produire la formation d'un gaz ou de vapeur d'eau au sein de la matière provoquant ainsi son gonflement. Il en découle un matériau poreux et plus léger.

- **Les granulats légers pour bétons isolants ou de remplissage**

Les billes de polystyrène expansé, la perlite, la vermiculite ou tout simplement des agents moussants sont couramment utilisés pour la confection de bétons légers isolants ou de remplissage.

I.1.3. Classification des granulats

Les granulats légers peuvent être classés selon leur nature comme suit :

- **Matériaux minéraux naturels non préparés** : Par définition, ce sont des matériaux qui n'ont subi que des traitements mécaniques tels que: lavage, broyage et tamisage. Les granulats

les plus connus dans cette catégorie sont: la ponce, les pouzzolanes, roches d'origines volcanique et les tufs calcaires ou volcaniques (**Cormon, 1972; Arnould et al., 1986**).

- **Matériaux minéraux naturels préparés:** Ce sont des matériaux spécialement traités en usine en vue de leur emplois dans les bétons légers, cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier: l'argile, le schiste et l'ardoise (expansées ou frittées), la perlite expansée et la vermiculite exfoliée (**Contant 2001; Ke 2008**).

- **Déchets industriels non préparés:** Ce sont des déchets de l'industrie qui ne subissent pas de traitement particulier à part, dans certains cas un traitement mécanique de tri.

Le principal granulat dans ce type est le mâchefer; résidu de la combustion des charbons gras du coke ou des ordures ménagères (**Dreux et Festa, 1998; Cormon, 1972**)

- **Déchets industriels préparés:** Ce sont en général des sous produits de l'industrie qui doivent subir divers traitements en vue de leur transformation en granulats légers. Les granulats de ce type les plus répandus sont: le laitier expansé ou granulé, les cendres volantes frittées ou expansés et le verre expansé

- **Matériaux organiques:** dans cette catégorie on classe des produits qui sont soit des polymères solides de synthèse, soit des matériaux d'origine végétale, on peut ranger dans cette catégorie les granulats de polystyrène expansé qui sont assez répandus les granulats de Bois (copeaux ou sciure).

Les deux derniers types de granulats ont fait l'objet de plusieurs études puisque leur utilisation rentre dans le cadre de la valorisation des déchets qui est une politique suivie dans presque tous les pays visant le coté économique de ces types de granulat, ainsi que l'aspect environnemental (**Idrissi, 2012; Ledhem et al., 2000**). En effet plusieurs travaux ont été réalisés où la matrice est composée essentiellement de déchets industriels ou de matières locales (**Amoroso et Bacatselos, 1979; Berra et Ferrara, 1984; Kellati et al., 2010; Magniont et al., 2011; Aziz et al., 1979**). L'allègement de la matrice a été réalisé par différents procédés à savoir, l'utilisation de granulats légers, notamment, les granulats de bois et de caoutchouc, ou la création d'une structure cellulaire, soit par réaction chimique, ou par entraînement d'air. Tous ces travaux ont montré l'intérêt de l'allègement des matériaux élaborés dans l'amélioration des performances thermiques, tout en conservant une résistance mécanique suffisante.

I.1.4. Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers

Chaque propriété des granulats légers peut avoir une influence sur les caractéristiques du béton frais ou du béton durci. Le choix du type de granulats légers doit prendre en considération chaque propriété du granulat. Les propriétés spécifiques des granulats pouvant avoir une influence sur les caractéristiques du béton sont:

➤ **Forme des grains et aspect de surface**

La forme et en particulier l'aspect de surface influent sur l'adhérence matrice-ciment. Les granulats légers peuvent présenter des différences considérables quant à la forme et l'aspect des grains, suivant l'origine et les procédés de fabrication, la forme peut être cubique et assez régulière, en majorité arrondie ou anguleuse et irrégulière. Les aspects de surface peuvent aller depuis l'aspect relativement lisse avec des alvéoles fins jusqu'à l'aspect irrégulier avec des alvéoles petites ou grosses.

➤ **Taille des granulats**

La taille des granulats légers a une influence très importante sur presque toutes les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons. Selon leurs grosseurs, les granulats légers sont classés en deux classes:

▪ **Les granulats légers fins**

Ils sont principalement composés de matériaux cellulaires d'origine minérale, conforme aux prescriptions suivantes :

- a) Ils conviennent à la fabrication de bétons légers.
- b) Ils ont une granulométrie inférieure à 5 mm.
- c) Ils ont une densité sèche inférieure à 1100 kg/m³.

▪ **Les gros granulats légers**

- a) Ils conviennent à la fabrication de béton léger de structure.
- b) Ils ont une granulométrie de 5 à 19mm.
- c) Ils ont une densité sèche inférieure à 880 kg/m³.

➤ **Masse volumique**

Grâce à leur structure cellulaire, les granulats légers ont une masse volumique plus faible que celle des granulats normaux. Elle est fortement liée à la porosité du granulat et à la densité de la matière d'origine du granulat. **Le tableau I.1** fixe le choix des granulats en fonction de la classe du béton.

Tableau I.1: Choix des granulats en fonction des classes de béton (Arnould et al., 1986).

Dénomination	Classe du béton	Masse volumique apparente des granulats (kg/m ³)		
		<350	de 350 à 550	>550
Isolant thermique	I	(+)	+	0
Isolant thermique	II	(+)	+	0
Isolant thermique et /ou porteur	III	+	(+)	+
De structure	IV	0	(+)	+
De structure de haute résistance	V	0	+	(+)

(+) utilisation recommandée + utilisation possible 0 utilisation impossible

➤ **Résistance des granulats**

La résistance des granulats varie selon leur type et leur origine. Les granulats de béton de structure, généralement durs et résistants, contribuent en conséquence dans la résistance du béton. Pour les bétons destinés à la fabrication d'éléments de construction isolants et isolants porteurs, la résistance des granulats n'est pas d'une grande importance, puisqu'en général ces granulats sont friables et peu solides et ne contribuent en aucun cas à la résistance, bien évident, ils sont à l'origine des faibles résistances de ces bétons. Il n'y a pas de corrélation nette entre la résistance des granulats légers et celle du béton.

La caractérisation de la résistance des granulats pose un problème; en effet, les essais mécaniques de base (compression et traction) leur sont donc inapplicables vu leur forme géométrique irrégulière et la différence entre leur structure interne et externe. Il en est de même des essais routiers classiques (Los Angeles, fragmentation dynamique, micro-deval) sont imprécis et peu représentatifs.

Au cours des dernières années, trois essais ont donné lieu à des études précises en vue d'une meilleure compréhension du rôle des divers paramètres de la résistance mécanique des granulats légers. L'essai le plus classique est l'essai "au pot", dérivé directement de la norme soviétique **GOST9758** (Arnould et al., 1986). Il se réalise par mesure de la pression nécessaire pour enfoncer de 20 mm un piston dans un récipient rempli de granules.

En 1976, selon (Arnould et al., 1986) le **CTBB de France** a mis au point un nouvel essai dit de "compression isostatique" qui consiste à mesurer la pression hydrostatique nécessaire à l'écrasement d'un granule entouré d'une gaine souple et plongé dans un bain d'huile mis sous pression. D'après (Arnould et al., 1986), **Armines** a également mis au point un autre essai nouveau dit de "rupture au fil" qui consiste à rompre le granulat par serrage dans une boucle d'un fil. Chaque granulat est caractérisé par une résistance au fil f_{tg} , rapport de la force de traction F exercée sur le fil lors de la rupture à l'aire S de la surface de rupture: $f_{tg}=F/S$.

➤ **Porosité et absorption**

Les Granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% (Arnould et al., 1986; Shink, 2003). La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption. Par ailleurs, la porosité des granulats varie proportionnellement à la taille des grains.

En raison de leur structure poreuse, les granulats légers ont tendance à absorber plus d'eau que les granulats normaux. Un essai d'absorption de 24 heures montre que les granulats légers absorbent généralement 5 à 20% en poids du granulat sec (Cormon, 1972; Neville, 2000). Cette absorption dépend de la structure des pores du granulat (porosité ouverte ; porosité fermée), de leur taille et de la morphologie interne des granulats.

La grande capacité d'absorption des granulats légers a une grande importance dans l'étape du malaxage. Lorsqu'une certaine quantité d'eau est mélangée, la quantité disponible pour humidifier le ciment et permettre la réaction d'hydratation dépend de la quantité d'eau absorbée par les granulats légers. Cette quantité peut être nulle lorsque les granulats légers ont été préalablement immergés pendant une longue période, alors qu'elle peut être très importante, selon le type de granulat léger, lorsqu'ils ont été préalablement séchés au four. Entre ces deux cas extrêmes, la quantité d'eau absorbée par les granulats séchés à l'air peut varier entre 70 et 100 kg par m³ de béton après leur introduction dans le malaxeur (Cormon, 1972; Neville et al., 2000).

Après 24 heures, l'absorption des granulats légers se situe entre 5 à 20 % de leur masse à l'état sec, mais ne dépasse habituellement pas les 156 % dans le cas des granulats de bonne qualité utilisés dans les bétons structuraux.

➤ **Caractéristiques thermiques des granulats légers**

En général, les propriétés thermiques des bétons légers sont directement liées à celles des granulats, ainsi qu'au degré de saturation du matériau, les granulats légers manufacturés, obtenus à partir de procédés à très haute température, sont généralement caractérisés par une meilleure stabilité thermique que les granulats rigides naturels. Le **tableau I.2** donne certaines caractéristiques de granulats légers regroupées de différentes littératures :

Tableau I.2: Caractéristiques des granulats légers

Granulats	Masse volumique (kg/m ³)			Porosité (%)	Taux d'absorption à 28 jours	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
	Masse volu de la matière (kg/m ³)	Masse volu des grains (kg/m ³)	Masse volu appar (kg/m ³)			
Bois résineux légers	450/550	255	120	72	150/300	0.12
Bois résineux mi lourds	300/450	300	/	58	100/250	0.15
Polystyrène expansé	1100	20/80	10	90/97	1.37 / 4.63	0.027/0.037
Argile expansé	2660	848/1212	518 / 656	68	30	0.14
Schiste expansé	2710	1193	698	56	11.3	/
Laitier expansé	2900	1550	700 / 850	50	11	/
Perlite	/	30 /180	/	/	/	0.06
Vermiculite	/	50 / 125	/	/	/	0.07
Pouzzolane	/	1865	780 / 910	55	21	/

I.2. Etat d'art sur les sables calcaires

I.2.1. Introduction

Le développement dans la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil a provoqué durant ces deux dernières décennies un accroissement considérable dans la consommation de granulats. La demande en sable est estimée à 25.1 millions de tonnes, dont 16 millions de tonnes pour la construction et 9.1 millions de tonnes pour la réalisation des routes. En Algérie, plus de mille unités produisent annuellement 68 millions de tonnes de granulats, pour l'essentiel de nature calcaire. Malheureusement, plus de 20% des sables fabriqués sont impropres à l'utilisation comme sable de construction du fait de leur teneur en fines supérieure à 12% (limite normative actuelle) (**Sadhouri et al., 2009**). De même, les fillers calcaires, qui résultent aussi du processus de concassage et de broyage des roches calcaires, sont considérés comme des résidus inutilisables et donc inexploités. Les sables de concassage issus des carrières calcaires sont plus adaptés pour remplacer positivement le sable naturel. De nombreuses études ont déjà été réalisées ou sont en cours sur cette problématique.

I.2.2. Historique

Les premières études réalisées sur l'utilisation des sables calcaires remontent à mille neuf cent quatre vingt. Certaines études françaises (**Coquillat et al., 1984**) ont tout d'abord montré que les calcaires de dureté moyenne à faible, permettent de confectionner des bétons de caractéristiques très satisfaisantes, comparables à celles des bétons de granulats silico-calcaires ou siliceux. Mais ces bétons nécessitent souvent plus d'eau, notamment lorsque la teneur en éléments fins augmente, entraînant alors une baisse de résistance mécanique. Toutefois, au jeune âge (< 48 heures), les résistances des bétons calcaires sont généralement supérieures à celles des bétons silico-calcaires ou siliceux. Les écarts de résistance trouvés semblent plus liés à la nature et au dosage en ciment qu'à la résistance propre des granulats (**Coquillat et al., 1984**).

I.2.3. Les bétons et mortiers à base de sable calcaire

Makhloufi et al., (2013), ont fait une étude aboutissant à la conclusion suivante: Les bétons fabriqués à partir des granulats calcaires concassés du Turonien de l'Atlas Saharien Central, ont un comportement mécanique qui se rapproche de celui des bétons fabriqués par des granulats alluvionnaires siliceux et silico-calcaires, puisque pour des maniabilités plastiques du béton frais, et après 28 jours de conservation dans un environnement ambiant, la résistance à la compression peut atteindre 25 MPA.

Ltifi et al., (2005), ont étudié l'effet de la substitution partielle ou totale du sable alluvionnaire par le sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton. Ils ont constaté que l'ouvrabilité du béton diminue lorsque le rapport E/C diminue et que la quantité de l'eau de gâchage augmente en

passant du sable siliceux à celui concassé. Cela est dû à la présence d'un important pourcentage de fines dans les sables de concassage. Cependant, le mélange de deux sables roulé et concassé enregistre une ouvrabilité intermédiaire.

I.2.4. influence du taux de fine sur les propriétés des bétons

I.2.4.1. Ouvrabilité

L'augmentation de la demande en eau des mélanges des bétons et des mortiers à base de sable de concassage est l'un des problèmes qui se posent pour l'obtention d'une ouvrabilité adéquate. Cet effet nocif est dû principalement à la présence d'un pourcentage élevé de fines, à la forme et à la texture du sable de concassage. Cette augmentation de la demande en eau peut être réduite par l'utilisation des super-plastifiants.

Benabed et al., (2012), ont trouvé que l'incorporation de 10% à 15% de fines calcaires, au mélange du mortier, améliore l'aptitude d'ouvrabilité. Cependant, quand le taux dépasse 15%; une diminution considérable de la valeur d'étalement du mortier et une augmentation de temps d'écoulement ont été enregistrées comme c'est montré sur la **figure I.1**. Ils ont attribué cet effet à la finesse et à la surface spécifique de particules fines qui nécessite plus d'eau pour se mouiller.

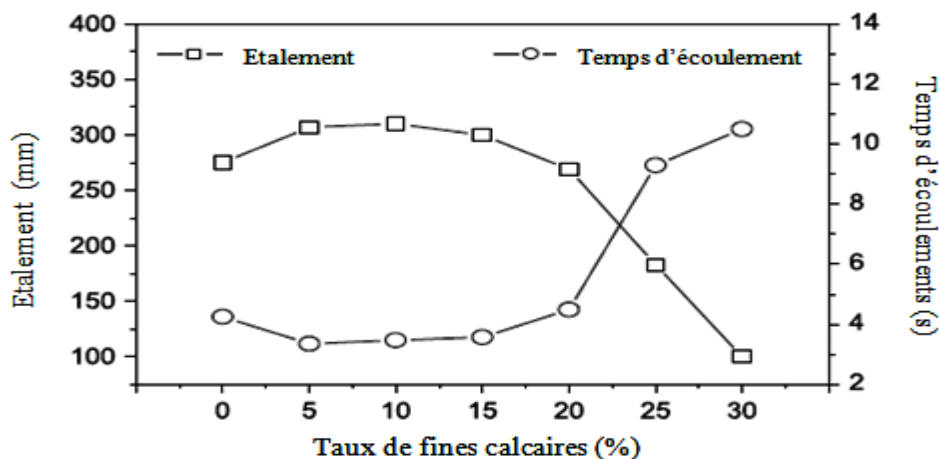


Figure I.1: Etalement et temps d'écoulements du mortier en fonction du taux des fines calcaires (Benabed et al., 2012)

I.2.4.2. Densité et porosité

D'après les travaux de Benachour (Benachour, 2017), la densité du mortier arrive à son maximum pour un taux de fillers calcaires de 15%, alors que la porosité est au minimum pour le même taux d'ajout de fillers calcaires (figures I.2 et I.3). Cependant, pour un taux supérieur à 15%, on a observé une chute progressive de la densité par palier de 2.7 à 2.9% et une augmentation de la porosité jusqu'à une valeur double. Pour les taux de fillers élevés et vu que leur surface spécifique est importante, de nouveaux pores sont créés en engendrant une augmentation de la porosité et une diminution de la densité. Les explications données confirment que les fillers commencent en premier lieu par remplir les vides autour des grains de sable,

jusqu'à l'optimum. Par contre, pour une grande quantité de fillers, les vides étant complètement remplis d'additions et les fillers occupent la place des grains de sable, d'où une diminution de la proportion de sable, et par conséquent de la densité du mélange.

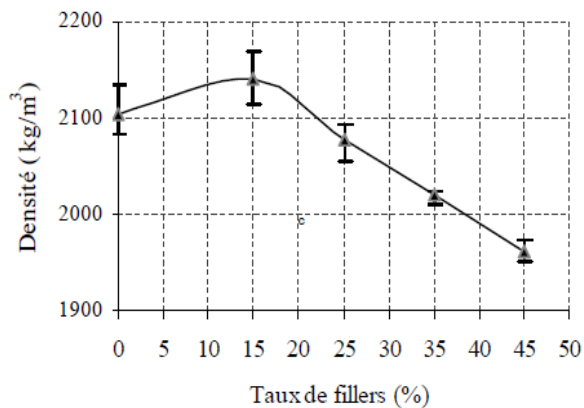


Figure I.2: Evolution de la densité en fonction du taux de fillers (Benachour, 2017)

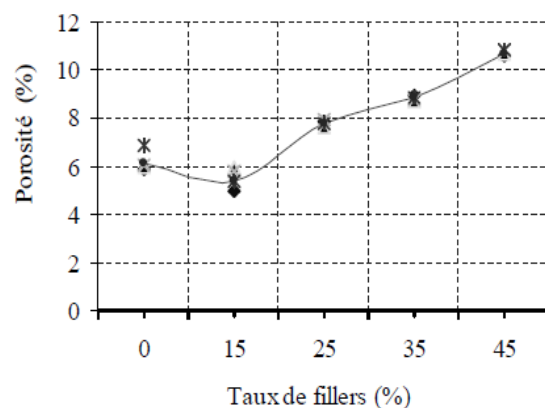


Figure I.3: Evolution de la porosité de mortier en fonction du taux de fillers (Benachour, 2017)

Sadhouari et al., (2009), ont conclu que la présence des fines en proportion modérée (entre 5 et 15 %) dans un sable est une nécessité. Les résultats obtenus avec différents pourcentages de fines, ont mis en évidence l'intérêt de l'ajout des fillers calcaires pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers et bétons (figure I.4). Donc, le sable de concassage constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement à condition qu'il soit corrigé en fines ou combiné avec un sable de mer.

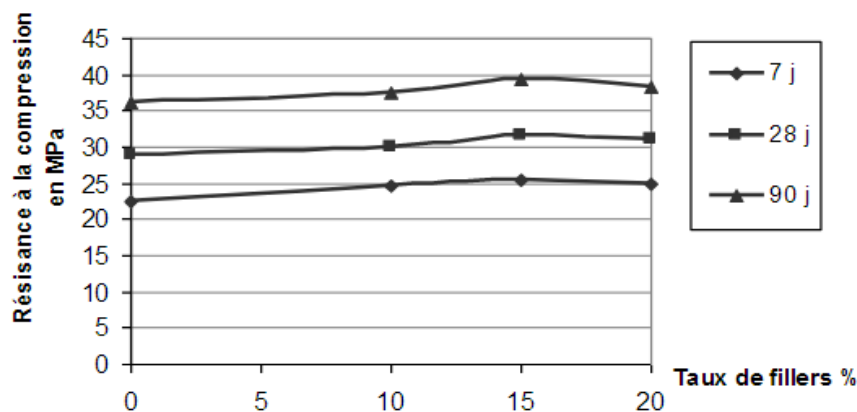


Figure I.4: Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Sadhouari et al., 2009)

Bonaveti et al (1994) ont montré que L'incorporation des fines a amélioré la résistance à la traction par flexion pour tous les âges. Cette résistance a une tendance semblable à celle observée pour la résistance à la compression des mortiers correspondants.

Plusieurs travaux ont mis l'accent sur l'effet des fines calcaires sur la résistance à la compression du mortier et du béton. D'après l'étude menée par (Benabed et al., 2012), la résistance à la

compression à l'âge de 3, 7 et 28 jours du mortier a augmenté jusqu'à un maximum pour les mélanges contenant des fines calcaires comprises entre 10% et 15%. Cependant, elle diminue rapidement lorsque le pourcentage de fines dépasse 15% (**figure I.5**). Ceci est probablement en raison d'insuffisance de la pâte de ciment pour enrober toutes les particules des agrégats fins, ce qui conduit par conséquent à une diminution de la résistance à la compression. En plus, pour les échantillons sans ou avec seulement 5% de fines calcaires, il n'y a pas suffisamment de particules fines pour combler tous les vides entre la pâte de ciment et les particules fines des granulats, ce qui engendre des valeurs de résistance à la compression plus faibles par rapport aux mélanges avec 10 et 15% en taux de fines calcaires. Par contre, **Bederina et al (2011)** ont constaté que la résistance à la compression du béton avec un taux de fillers d'environ 5% enregistre une valeur maximale à l'âge de 28 jours. Par ailleurs, elle diminue progressivement au-delà de ce taux.

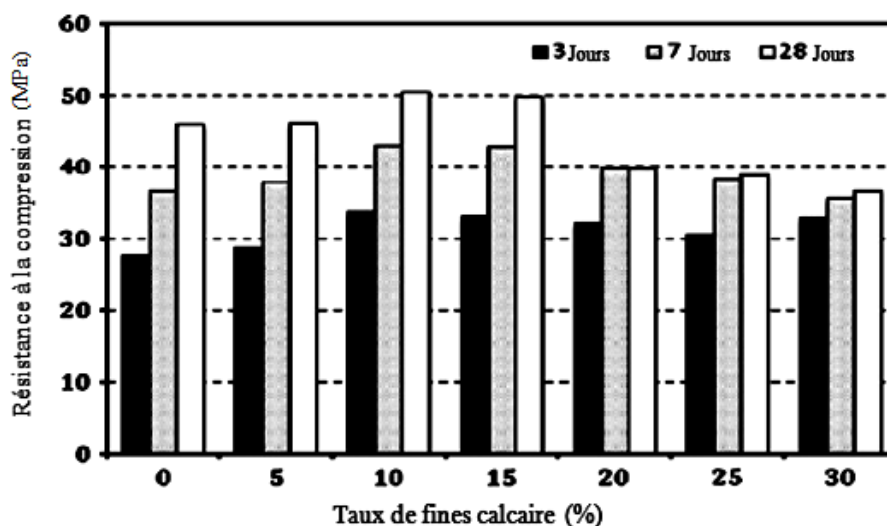


Figure I.5: Résistance à la compression (3, 7 et 28 jours) du mortier composé avec différents taux de fines calcaires (**Benabed et al., 2012**)

Alshahwany, (2011) a étudié l'influence des fines calcaires dans le sable sur la résistance à la traction du béton. Les taux des fillers calcaires substitués au sable utilisé dans cette étude étaient de 0, 10, 20, 30, 40 et 50% avec un rapport eau/ciment de 0.57 (**figure I.6**). Il a conclu que la résistance à la traction du béton peut être améliorée au remplacement partiel du sable par des fillers calcaires. La résistance des bétons commence à augmenter de façon linéaire pour atteindre un optimum correspondant à 20% de fines. Au-delà de ce pourcentage, on enregistre une chute progressive de résistance.

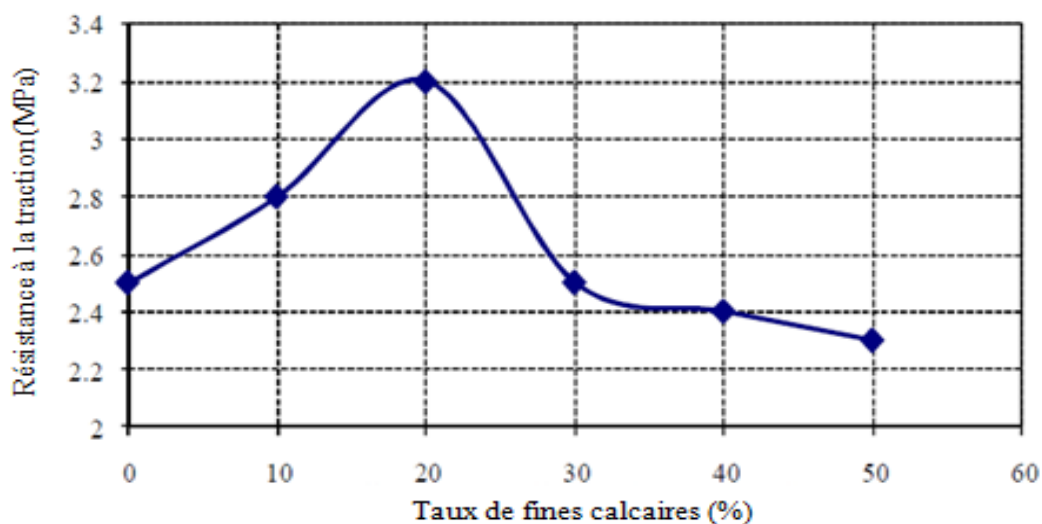


Figure I.6: Influence de taux de remplacement des fillers calcaires sur la résistance à la traction du béton (Alshahwany, 2011)

Après une recherche expérimentale sur, l'influence des fillers calcaires comme substitution partielle au sable sur les propriétés du béton à base d'agrégats de rivière, il a conclu que l'affaissement décroît avec l'augmentation du taux de filler calcaire, alors que le besoin en eau croît légèrement avec l'augmentation de ce taux de fines, tandis que la résistance à la compression du béton croît avec l'augmentation du taux de substitution de filler dans le sable; ainsi le béton constitué avec 20 % de substitution a donné la valeur élevée de résistance de compression. De plus, le remplacement partiel du sable par le filler calcaire à un taux de 20 % fait augmenter la résistance à la traction par fendage.

I.2.4.3. Réactivité des fines calcaires

Les fillers calcaires ont été longtemps considérés comme inertes chimiquement au sens des normes « béton » (Courard et al, 2008). Pourtant, de nombreuses études ont montré qu'une certaine activité « liante » pouvait leur être attribuée. Au sujet de la réactivité des fillers calcaires toutes les études s'accordent sur les points suivants :

- * La précipitation de carboaluminates lors de l'hydratation mise en évidence par de nombreux auteurs (Bachiorrini et Cussino, 1986; Bushnell-Watson et Sharp, 1985; machandran, 988).
- * La substitution partielle de l'ion sulfate par l'ion carbonate lors de la formation de l'ettringite. Un nouvel hydrate peut se former et les séquences réactionnelles de l'hydratation ne sont pas modifiées. Il serait possible de substituer en partie le gypse par du filler calcaire Negro et al., 1986; Bensted, 1983)
- * L'interaction entre les silicates calciques et le filler. Les principaux résultats sur ces interactions ont été obtenus par R.Ramachandran (Ramachandran et Chun-Mei, 1986) Le carbonate de calcium accélère l'hydratation du silicate tricalcique et modifie le rapport Ca/Si des hydrates silicatés (CSH).

1.2.4. Conclusion

En conclusion nous pouvons dire que le sable concassé constitue une bonne alternative afin de palier au problème de la surexploitation des sables alluvionnaires. Les résultats obtenus par plusieurs chercheurs sur les bétons et les mortiers à base de sable de carrière, apparaissent prometteurs. Mais des études approfondies sur les propriétés de ces matériaux s'imposent d'avantage en vue d'une meilleure utilisation du sable de concassage dans les bétons et les mortiers.

I.3. Etat d'art sur le liège

I.3.1. Introduction

Parmi les matériaux poreux utilisés dans l'isolation thermique et acoustique des bâtiments, le liège, un produit 100 % naturel et écologique. Il provient de l'écorce d'une espèce particulière de chêne vert qui ne s'épanouit que dans des régions spécifiques de la Méditerranée occidentale (Portugal, Espagne, sud de la France, une partie de l'Italie, l'Afrique du Nord) et la Chine (**Hernández-Olivares et al., 1999; Gil, 2009**). Le liège est l'écorce du chêne (*Quercus suber* L.) qui est périodiquement récolté de l'arbre, généralement tous les 9 à 12 ans, en fonction de la région de culture. Travaillé par l'homme, le liège s'est adapté aux procédés modernes de construction, tout en maintenant ses qualités naturelles. Sa structure est formée de juxtaposition de cellules microscopiques isolées les unes aux autres et remplies à 95 % par de l'air immobile. Celle-ci lui assure à la fois une grande souplesse et un important pouvoir isolant. Le liège, seul matériau naturellement isolant possédant à la fois un tel pouvoir et une telle résistance mécanique, ajoute à ses qualités d'isolant thermique une caractéristique qui contribue au confort du cadre de vie : l'isolation phonique.

I.3.2. Origine et historique du liège

Le liège est un matériau présent dans l'écorce de quelques arbres, et notamment celle du chêne-liège. Ce dernier dont le nom scientifique est "*Quercus Suber*" est une espèce extrêmement polymorphe comme la plupart des chênes. Cette espèce d'arbre est caractérisée par la formation subéreuse de son écorce qui donne le liège. Le chêne liège est un arbre généralement de taille moyenne pouvant atteindre 7 à 10 m de hauteur lorsqu'il est en peuplement et 20 à 25 m de hauteur à l'état isolé. Le tronc de l'arbre ainsi que les rameaux sont recouverts d'une écorce crevassée, épaisse et spongieuse appelée "liège". Les feuilles de forme assez ovale sont dentées sur les bords, elles sont vertes, luisantes sur la face supérieure, alors que la face inférieure est blanchâtre et tomenteuse (**Figure I.7**) (**Quelenis, 2008**).

La première utilisation du liège en tant qu'isotherme remonte très tôt dans l'Antiquité dans la fabrication de ruchers. En ce qui concerne sa place dans la construction, on retrouve quelques

traces des premiers emplois comme isolant thermique, parmi elles les populations primitives d'Afrique du Nord qui l'utilisaient en plaque et mélangé avec de l'argile pour la construction des murs de leurs habitations. L'habitat naturel du chêne-liège est le pourtour du bassin méditerranéen occidental (présent depuis plus de 60 millions d'années). L'aire naturelle de la subéraie mondiale est d'environ 2687000 hectares repartis principalement sur sept pays (**figure I.8**). Les principales subéraies algériennes sont situées essentiellement en zone sub-humide au nord, et entre l'Algérois et la frontière Tunisienne, ou elles s'étendent de la mer jusqu'à 1200 m d'altitude.



Figure I.7 Le chêne liège et son écorce (Quelenis, 2008)

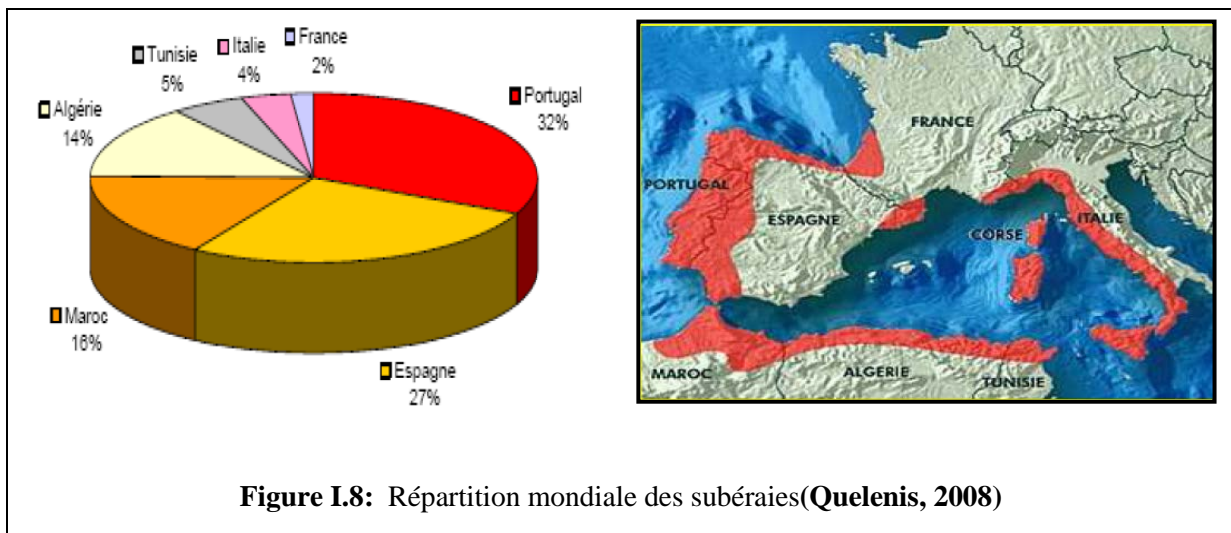


Figure I.8: Répartition mondiale des subéraies(Quelenis, 2008)

I.3.3. Structure et anatomie du liège

Le liège représente la partie externe de l'écorce du chêne liège "*Quercus suber*". Elle est constituée de cellules mortes subérisées produites par le phellogène (**Figure I.9**) (Silva et al., 2005). Ce tissu constitue une barrière protectrice entre les cellules vivantes de l'arbre et le milieu environnant, contre les agressions extérieures telles que les incendies (Pereira, 2011). Le liège naturel présente aussi des canaux cylindriques, appelés lenticelles, qui permettent de favoriser les

échanges gazeux avec l'intérieur de l'arbre et assurer ainsi la survie et le renouvellement des cellules (Gil et Moiteiro, 2000).

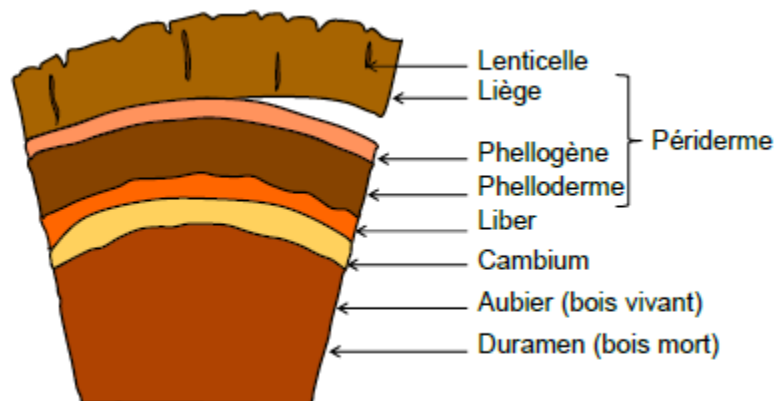


Figure I.9: Représentation schématique d'une coupe axiale d'un tronc de chêne liège *Quercus suber* L. (Lagorce-Tachon, 2015)

Un des critères d'évaluation de la qualité du liège est la présence de lenticelles qui constituent la macroporosité du matériau. Moins elles sont nombreuses en surface et plus le liège est considéré comme de bonne qualité. Sur l'arbre, les lenticelles permettent les échanges de gaz de l'extérieur vers l'intérieur de l'arbre.

le liège est constitué de cellules mortes dépourvues de cytoplasme ou d'autres organites contenus habituellement dans les cellules vivantes. Leur structure a été observée pour la première fois au microscope dans les années 1660 par Robert Hooke, qui a donné par la suite le nom de « cellule » à l'unité biologique de tous les êtres vivants. (Hooke, 1664; Gibson, et al., 1981) ont ensuite décrit la forme de ces cellules dans les trois axes du liège : axial, radial et tangentiel (Figure I.10). Les premières images au microscope électronique furent réalisées

par Pereira, Rosa et Fortes en 1987 et ont montré que les cellules de liège ont une forme hexagonale et sont organisées selon une structure en nid d'abeille dans le plan radial Figure I.12(a). En revanche, dans les plans axial et tangentiel, elles présentent une forme plutôt parallélépipédique (forme de briques) Figure I.12 (b), avec la présence d'ondulations sur la longueur dans la direction tangentielle. Ces deux structures cellulaires étant similaires, le liège est considéré comme un matériau isotrope, c'est-à-dire possédant des propriétés physiques très proches dans ces deux directions.

L'observation du liège au MEB a montré que, dans un rayon, Les cellules de liège apparaissent comme des polygones de 4 à 9 côtés (Figure I.12a) (cellules heptagonales, hexagonales et pentagonales. Les dimensions d'une cellule sont proches de celles décrites par Gibson et al. (1981) (Figure I.13) avec une hauteur de cellule d'environ 40 μm , une épaisseur de paroi d'environ 1 μm .

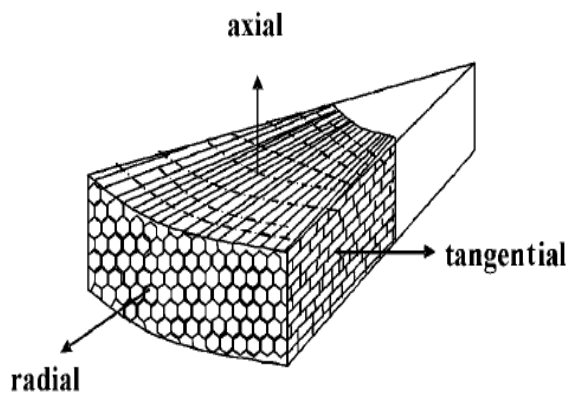


Figure I.10 Représentation schématique des cellules du liège dans les trois directions

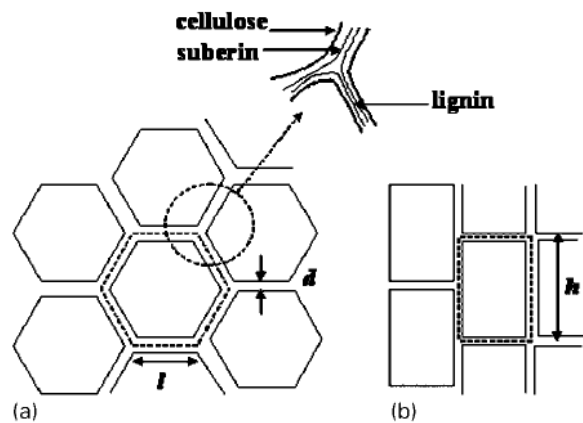


Figure I.11 Représentation schématique des cellules du liège : a radial, b tangentielle

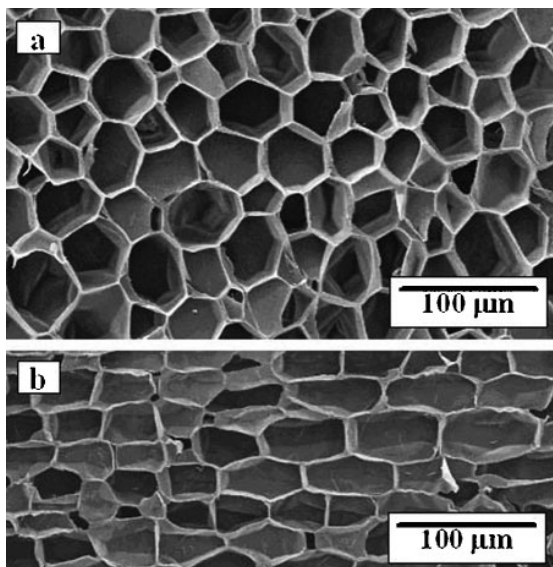


Figure I.12 Structure cellulaire du liège dans les deux plans a radial, b tangentielle

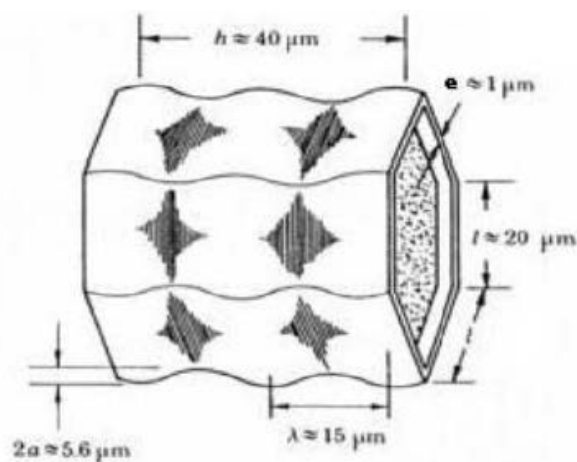


Figure I.13 Représentation schématique d'une cellule de liège (Gibson et al., 1981)

I.3.4. Composition chimique

Le liège est un matériau alvéolaire peu dense, densité entre 120 et 240 kg/m³ (en fonction de la qualité), qui comprend près de 80 % d'air (Pintor et al., 2012; Silva et al., 2005). Les parois cellulaires dont la densité est estimée à 1200 kg/m³ (Gibson et al. 1981), sont principalement composées de subérine, de lignine et de cellulose, ainsi que de cires et de tanins. La quantité de ces constituants varie en fonction de nombreux paramètres tels que l'âge de l'arbre, la zone de production ou encore le climat.

La composition chimique du liège comprend plusieurs types de composés qui sont traditionnellement Divisés en cinq groupes (Gil, 2007) :

- a) **Subérine** (45 % - Responsable de la compressibilité et de l'élasticité du liège);
- b) **Lignin** (27 % - Structure des parois cellulaires);
- c) **Polysaccharides** (12 % - généralement liés à la structure du liège);

d) Cire (6 % - Repousse l'eau et contribue à son imperméabilité);

e) Tanins (polyphénols) (6 % - Couleur et protection / conservation du matériau);

f) Cendres (4 %).

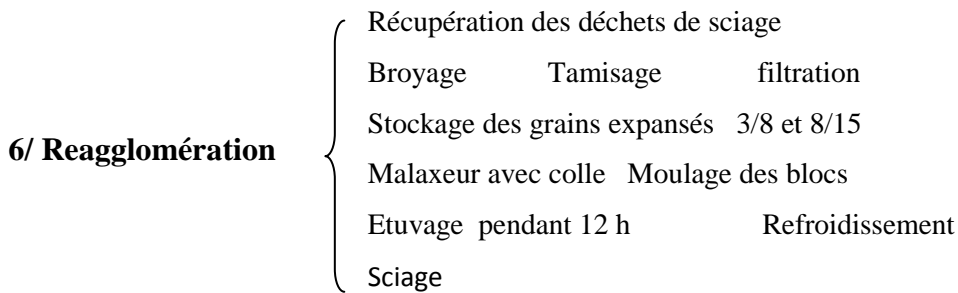
Ainsi, le liège est composé à la fois de composants structuraux, d'un polymère complexe, de forme complexe, ainsi que des composants non structurels. Ces dernières sont classées par catégorie : Extractive et non extractive. Les composants extractifs sont divisés en cire, ce qui influence Les caractéristiques imperméables du liège et des composés phénoliques, qui semblent jouer un rôle protecteur contre les attaques des organismes biologiques.

I.3.5. Production du liège

Le liège peut provenir directement de la levée, ou recyclé ou peut être récupérer sur les branches et les arbres morts. Il est broyé puis stocké sous forme de granulés. Les granulés sont injectés dans des blocs. Ils sont passés au four à 380°C et cuit à haute température. Le liège se dilate et s'agglomère avec sa propre résine (la subérine) pour donner le liège expansé pur. A leur sortie du four, de l'eau est injectée dans les blocs pour permettre leur stabilisation et éviter la surcuisson. Les blocs sont stockés pendant une quinzaine de jours pour assurer leur stabilisation. Les blocs sont ensuite découpés et dimensionnés comme voulu en plaques de largeur 50 cm et longueur 100 cm et d'épaisseur variant de 2 à 30 cm.

La fabrication des plaques en liège expansé se déroule selon les étapes suivantes : **(D'après le document de l'usine de liège de Jijel)**

1/Approvisionnement	{	Matière première lièges (Mâle, rebut, ramassage, bandes perforées (récupération)).												
2/ Meunerie	{	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 150px;">Concassage 0 à 50 mm</td> <td style="width: 100px;">filtration</td> </tr> <tr> <td>Broyage 0 à 22 mm</td> <td>filtration</td> </tr> <tr> <td>Tamisage 3 à 22 mm</td> <td>stockage</td> </tr> <tr> <td>> à 22 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Broyage 2^{ème} passe</td> <td>filtration</td> </tr> <tr> <td>Tamisage 2^{ème} passe</td> <td>stockage</td> </tr> </table>	Concassage 0 à 50 mm	filtration	Broyage 0 à 22 mm	filtration	Tamisage 3 à 22 mm	stockage	> à 22 mm		Broyage 2 ^{ème} passe	filtration	Tamisage 2 ^{ème} passe	stockage
Concassage 0 à 50 mm	filtration													
Broyage 0 à 22 mm	filtration													
Tamisage 3 à 22 mm	stockage													
> à 22 mm														
Broyage 2 ^{ème} passe	filtration													
Tamisage 2 ^{ème} passe	stockage													
3/ Séchage	{	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 150px;">Grain humide</td> <td style="width: 100px;">séchage</td> <td style="width: 100px;">filtration</td> </tr> <tr> <td>Grain sec</td> <td colspan="2">(taux humidité <= 8 %)</td> </tr> </table>	Grain humide	séchage	filtration	Grain sec	(taux humidité <= 8 %)							
Grain humide	séchage	filtration												
Grain sec	(taux humidité <= 8 %)													
4/ Agglomération	{	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 150px;">Cuisson à la vapeur surchauffée</td> <td style="width: 100px;">T° = 380 °C</td> </tr> <tr> <td>Capacité 260 blocs / 8 h</td> <td>chaque bloc (p = 21 à 22 kg , v = 0,17 m³)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Stockage des blocs</td> </tr> </table>	Cuisson à la vapeur surchauffée	T° = 380 °C	Capacité 260 blocs / 8 h	chaque bloc (p = 21 à 22 kg , v = 0,17 m ³)	Stockage des blocs							
Cuisson à la vapeur surchauffée	T° = 380 °C													
Capacité 260 blocs / 8 h	chaque bloc (p = 21 à 22 kg , v = 0,17 m ³)													
Stockage des blocs														
5/ Sciage	{	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 150px;">Équarrissage</td> <td style="width: 100px;">(longitudinale - transversale)</td> </tr> <tr> <td>Sciage des plaques</td> <td>(2,3,4,5,6.....30 cm)</td> </tr> </table>	Équarrissage	(longitudinale - transversale)	Sciage des plaques	(2,3,4,5,6.....30 cm)								
Équarrissage	(longitudinale - transversale)													
Sciage des plaques	(2,3,4,5,6.....30 cm)													



I.3.6. Propriétés du liège

Le liège est apprécié pour son origine entièrement naturelle et ses qualités physiques : faible poids (densité), grande résistance mécanique, élasticité, imperméabilité (à l'eau), imputrescible, antistatique, isotherme, résiste relativement bien au feu, bon isolant thermique, acoustique et vibratoire, et résistant à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Il est difficilement inflammable, souple et se décompose lentement. Il est résistant à la compression et indéformable. Il résiste très bien au temps. Le liège expansé est un aggloméré élaboré selon une méthode traditionnelle respectueuse de l'environnement (éco-conception) à partir de l'écorce du chêne liège. En effet, la cuisson à haute température de cette écorce induit une expansion et une agglomération du liège (Quelenis, 2008; Şen et al., 2012)

I.3.6.1. Densité du liège

(Gil et Moiteiro, 2000; Pereira, 2011; Silva et al., 2005) ont trouvé que la densité du liège peut varier entre 110 et 300 Kg/m³ selon l'âge, les traitements subis par le liège et la proportion de lenticelles. Cette variation serait liée également aux dimensions des cellules.

En effet, une densité élevée correspondrait à des parois épaisses et lourdes, d'après (Gibson et al., 1981) et à des cellules de petite hauteur (15 µm). D'après (Pereira et al., 2013), cette densité peut atteindre 1250 Kg/m³ sous l'effet d'une forte compression (55 MPa). Cette faible densité fait du liège un bon isolant thermique et acoustique. Cela permet également au liège de pouvoir être utilisé pour amortir les vibrations (chocs).

I.3.6.2. Propriétés mécaniques du liège

Les propriétés mécaniques d'un matériau sont liées à la résistance de ce dernier lorsqu'il est soumis à une force extérieure. Beaucoup d'essais de compression uni axiale ont été réalisés sur le liège et de nombreux articles y font référence(Gibson et al., 1981; Pereira et al., 2013; Prades et al., 2012; Silva et al., 2005). La courbe de compression (contrainte-déformation), (Figure I.14) présente trois régions liées aux trois mécanismes responsables pour les propriétés des matériaux alvéolaires flexibles.

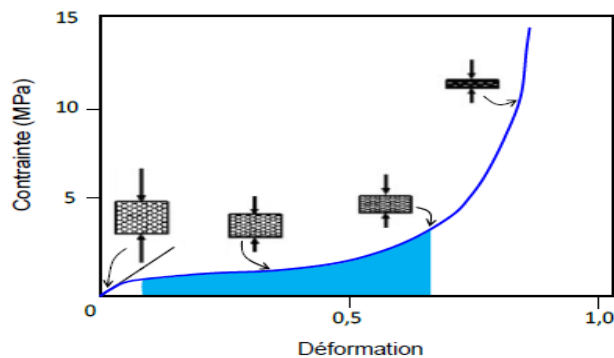


Figure I.14: Courbe contrainte-déformation suite à une compression uni-axiale d'un échantillon de liège (Lorna et al.,1999)

I.3.6.3. Propriétés thermiques

Malgré leurs importances certaines dans de nombreux domaines d'application, les propriétés physiques du liège autres que les propriétés mécaniques n'ont été que très peu étudiées. Sa structure cellulaire, comparable à celle des mousses cellulaires, lui permet ainsi d'être un bon isolant thermique. Le liège est un matériau alvéolaire contenant 80 % d'air et dont les dimensions cellulaires permettent d'éviter les phénomènes de convection (Castro et al., 2010; Silva et al., 2005; Lagorce-Tachon, 2015). La conductivité thermique du liège est semblable à celles de certains isolants alors que sa densité est bien plus importante (Tableau I.3).

Tableau I.3: Densité et conductivité thermique de différents isolants dont le liège (Silva et al., 2005; Pereira, 2007)

	Densité $kg.m^{-3}$	Conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$
Liège	120 – 240	0,040 – 0,045
Liège aggloméré expansé	100 – 120	0,035 – 0,070
Mousse de polyuréthane	20	0,025
Mousse de polystyrène	25	0,040
Laine de verre	25 – 30	0,030 – 0,045
Air	1,17 (25°C, HR = 50%)	0,025

I.4. Les bétons légers

I.4.1. Introduction

Bien que connus depuis plus d'un demi-siècle, les bétons légers ont été relativement peu employés. Toutefois, la crise du logement liée au manque considérable en matériaux de construction, ainsi que la consommation d'énergie de chauffage et de rafraîchissement des locaux qui ne cessent d'augmenter, ont provoqué un regain d'intérêt pour l'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels. Leur transformation en bétons légers demeure l'une des solutions les plus économiques afin d'y pallier à ces problèmes.

I.4.2. Définitions et classification

Les Bétons Légers sont des bétons constitués de granulats de faible densité (billes de polystyrène, argile, schiste, particules de bois...etc.) ou éventuellement de mousse cellulaire. Ils sont utilisés dans la rénovation sur plancher bois, pour les travaux de remise à niveau, de ravaillage de sols, et dans l'allègement des structures. L'utilisation des bétons légers en construction signifie par delà une amélioration des performances thermiques, une manutention plus aisée, un gain de temps et de matériel et donc un positionnement plus intéressant par rapport à la compétitivité économique.

La commission **RILEM, 1970** des bétons légers propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 kg/m^3 . D'autres institutions adoptent des définitions un peu différentes, la commission **American Concrete Institute(ACI), 1970** limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours. En Allemagne, la norme **DIN 1042, 1972** limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 kg/m^3 . Par ailleurs, et dans l'objectif d'aider à déterminer la nature des essais à effectuer ainsi qu'à évaluer et interpréter les résultats et programmer la recherche, **J.L Kass** et **D Compbell, 1972** de l'institut de génie civil de l'université de Sydney en Australie ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leurs utilisations dans la construction (**Tableau.I.4**). Cette classification a été recommandée par la suite par la commission **RILEM 1970**.

Tableau I.4: Classification fonctionnelle des bétons légers selon la **RILEM 1970**.

Classe	I	II	III
Type de béton léger	Béton léger de construction	Béton léger de construction et d'isolation	Béton léger d'isolation
Masse volumique (kg/m^3)	< 1800	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	--	< 0.75	< 0.30

Une autre classification des bétons légers est celle de la norme **ACI 21 213R-87**. Celle-ci classe les bétons légers en fonction de la masse volumique en trois catégories. Tableau I.5:

Tableau I.5: Classification des bétons légers selon la norme **ACI 21 213R-87**.

Classe du béton	Masse volumique (kg/m^3)	Résistance à la compression (MPa)
Béton de granulats légers de structure	1350 à 1900	≥ 17
Le béton de résistance moyenne	800 à 1350	7 à 17
Le béton léger de faible masse volumique	300 à 800	--

I.4.3. Différence entre bétons classiques et bétons légers

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

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

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

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

On diminue la masse volumique du béton en remplaçant une certaine quantité de matériau solide par de l'air. Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton sont : dans la matrice (béton cellulaire), entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c.à.d sans sable) et dans les granulats (bétons de granulats légers) (De Larrard, 2000; Magniont et al., 2011; Mohellebi, 2014).

La figure I.15 montre une représentation schématique des différents types de bétons légers

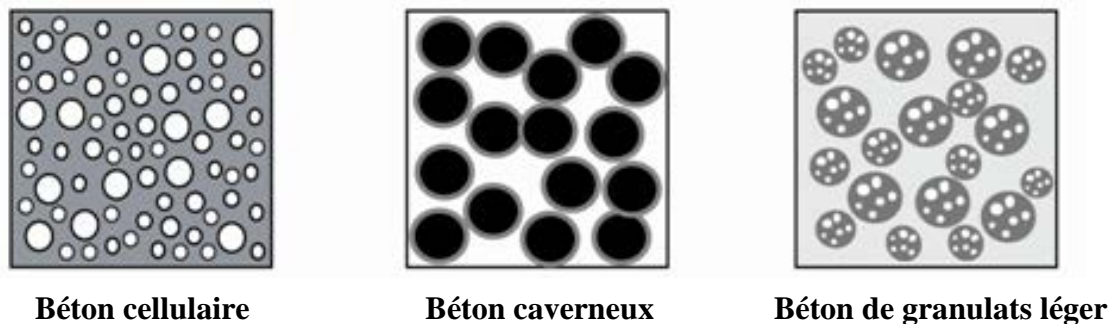


Figure I.15: Représentation des différents types de bétons légers.(Short et Kinniburgh, 1963)

La figure I.16 présente une classification proposée par Lafarge Béton Granulats

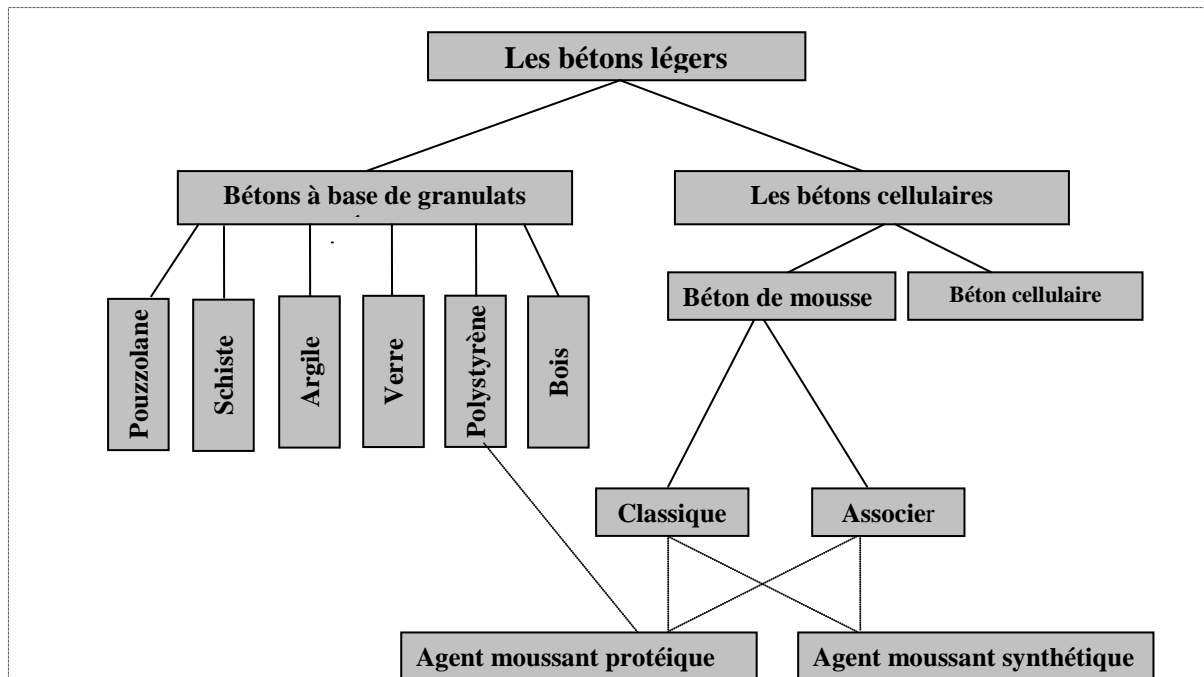


Figure I.16: Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats (Pimienta et al., 1994)

I.4.4. Propriétés physiques des bétons légers

I.4.4.1. Masse volumique

La masse volumique est une caractéristique fondamentale du béton léger. Elle dépend principalement de la masse volumique des granulats et de la composition du béton léger, en particulier du rapport G/S, du volume absolu de granulats légers au volume absolu de sable. Mais la définition d'une masse volumique de référence n'est pas sans difficulté, du fait de l'importance de la quantité d'eau contenue dans le béton léger frais et de ces variations l'hors du durcissement.

On définit la masse volumique sèche, noté ρ_s , comme étant la masse volumique qu'aurait le béton léger une fois toute l'eau ne servant pas à l'hydratation du ciment s'évaporerait. Elle doit être mesurée à 28 jours après séchage à l'étuve à 100°C (Arnould et al., 1986; Cormon, 1972).

Le diagramme suivant montre les différentes gammes de masse volumique pour les différents types de bétons légers.

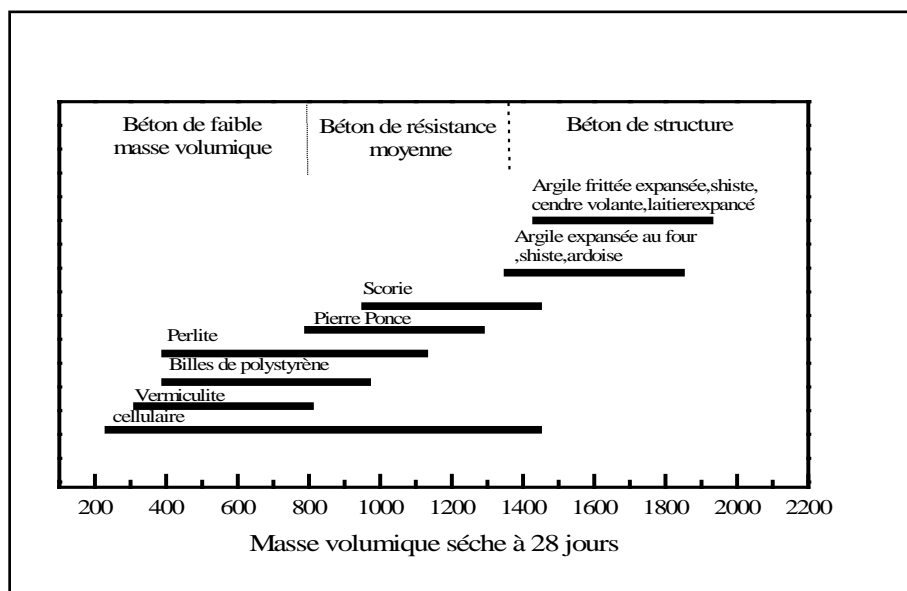


Figure I.17: Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme **ACI213R-87 (Arnould et al., 1986)**

Les granulats allégés par expansion ou frittage, très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les USA, aussi bien dans la France. Ils ont des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressantes. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé (norme **NF P18-309**) et le laitier expansé (**NF P18-307**); d'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³, selon le type et la granularité. Ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique avec des pertes de poids intéressantes puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

Les granulats très légers sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers, de masse volumique variable entre 20 et 100 kg/m³; ils permettent de réaliser des bétons de 300 à 600 kg/m³. On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles ou rechargement sur planchers peu résistants.

I.4.4.2. Porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

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

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité

intrinsèque du liant La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H, varie entre $0,01 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre $5 \mu\text{m}$ et 1mm (Gagné, 2000). L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique (figure I.18).

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

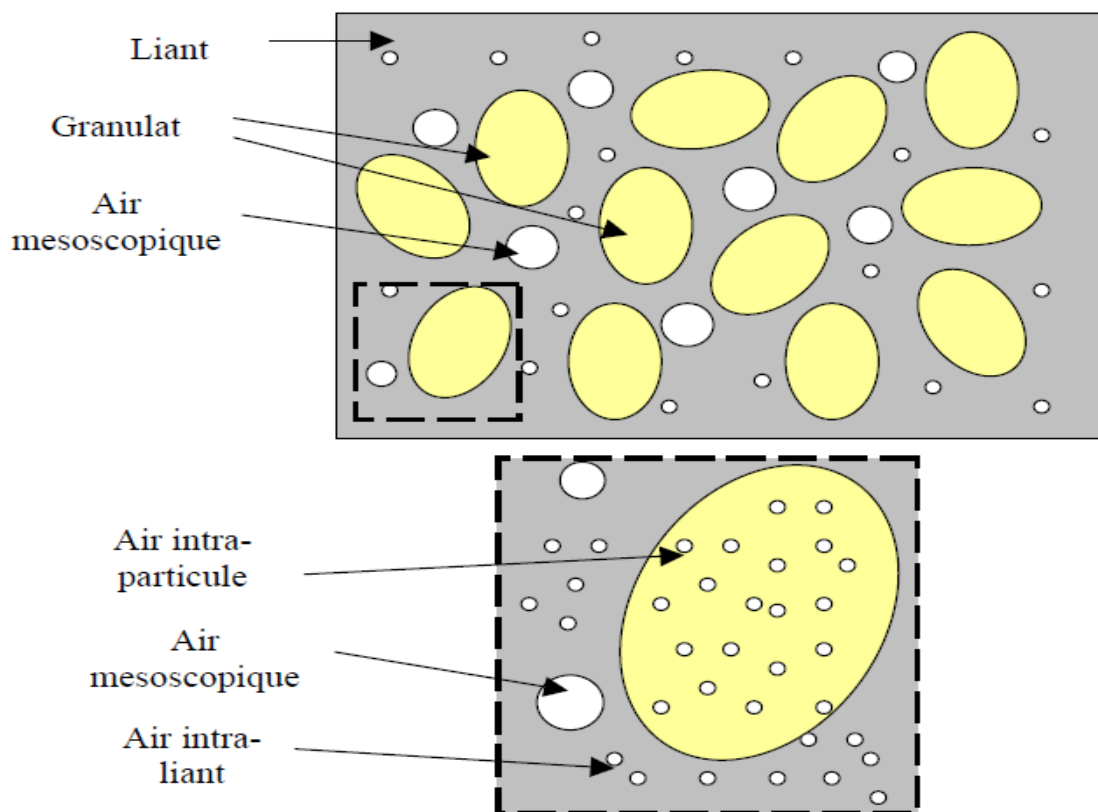


Figure I.18: Porosité du béton (Cérézo, 2005)

I.4.4.3. Absorption d'eau et sensibilité à l'humidité

Dans le béton, l'eau intervient dès la fabrication pour d'une part contribuer à la réaction chimique, et d'autre part apporter une consistance adéquate au béton frais. Après le durcissement, l'eau devient un constituant du béton. Elle continue à contribuer à la réaction pouzzolanique et joue un rôle important dans le comportement mécanique et thermique du béton.

Dans le béton durci, l'eau se présente sous trois états différents :

- **L'eau chimiquement liée** contribue à l'hydratation du liant et fait partie de la structure des hydrates sous forme d'eau hydroxylique.

- **L'eau adsorbée** est physiquement liée à la surface des pores solides sous l'action de forces intermoléculaires et de forces électrostatiques. Il en existe deux formes : l'eau adsorbée à la surface des particules CSH (inter-lamellaire) et l'eau fixée entre les feuillets des particules CSH (inter-feuillet).
- **L'eau libre** elle est liée au solide par des forces de tension superficielles. L'eau libre existe aussi sous forme condensée dans les espaces intergranulaires et dans le volume poreux au-delà de la couche adsorbée des molécules (DU, 2001; Diederich, 2010).

➤ **Absorption de l'eau**

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber ou de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé et s'exprime en pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique) d'un matériau sec.

$$\omega_m = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \dots \dots \dots (1.1)$$

et l'absorption volumique, en kg/m³, d'après la formule

$$\omega_v = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 100 \dots \dots \dots (1.2)$$

Où M_2 est la masse du matériau saturé d'eau, en kg ; M_1 la masse du matériau sec, en kg ; V le volume du matériau à l'état naturel. La capacité d'absorption est toujours inférieure à la porosité réelle (totale), car une partie des pores est fermée, sans communication avec le milieu ambiant et inaccessible à l'eau.

➤ **Adsorption et désorption**

L'hygroscopicité se manifeste expérimentalement par l'adsorption d'humidité par les matériaux poreux placés dans une atmosphère donnée. Ce phénomène est dû aux forces agissantes au voisinage de l'interface solide-fluide dont le potentiel ne dépasse pas le millier d'atmosphère (Forces de **Van Der Waals**). La masse d'humidité adsorbée croît avec l'humidité relative de l'air ambiant et se stabilise pour une température et une humidité relative donnée. Ce phénomène est étudié par le tracé des courbes de sorption. La courbe d'isotherme d'adsorption est obtenue par des mesures sur des échantillons secs et la courbe d'isotherme de désorption sur des échantillons saturés. Le principe de la mesure consiste à déterminer la teneur en eau des échantillons, en les disposant dans des ambiances de différentes humidités relatives (HR) et de température fixée. Pour chaque valeur de HR, l'équilibre thermodynamique du matériau doit être atteint pour la mesure de la teneur en eau.

I.4.5. Propriétés mécaniques des bétons légers

Nous nous proposons maintenant de décrire les propriétés mécaniques des bétons de granulats légers, plus spécifiquement leur résistance à la compression , leur module d'Young et

d'examiner les facteurs influençant ces propriétés à partir des travaux expérimentaux de la littérature. Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides (**Cormon, 1972; Lo et al., 2007**).

I.4.5.1. Résistance à la compression des bétons légers

En général presque tous les bétons légers présentent des résistances à la compression inférieurs à celles des bétons ordinaires ; cependant quelques types de bétons légers, évidemment par ajout de produits, peuvent atteindre des résistances similaires à celles du béton classique; c'est le cas des bétons légers de haute performance BLHP (**Arnould et al., 1986; Cormon, 1972; Flynn, 1999**). Comme pour les bétons classiques, la résistance à la compression des bétons de granulats légers est influée par les paramètres suivants:

➤ **Le dosage en ciment**

Il est bien évident que, pour tous les bétons, la résistance en compression est proportionnelle au dosage en ciment. Cette loi est vraie aussi pour les bétons légers, mais il faut noter qu'à partir d'un certain seuil, une augmentation du dosage en ciment n'aurait pas d'influence sur la résistance. Cette notion se justifierait par le fait que la rupture du béton léger se produit par cassure des granulats légers, qui sont moins résistants que le mortier. De ce fait, la résistance du béton léger serait "plafonnée" par celle des grains, et à partir d'une certaine valeur, l'augmentation de la résistance du mortier n'aurait plus d'incidence sur celle du béton (**Neville, 2000**). **La figure I.19** montre les variations de la résistance en compression de différents bétons légers en fonction du dosage en ciment, et on peut bien voir que la résistance augmente en fonction du dosage en ciment et qu'il existe un seuil de dosage au-delà duquel la résistance reste constante. Bien que l'augmentation de la résistance en compression due à l'augmentation du dosage en ciment dépende également du type de granulats et du ciment, en général, dans le béton de granulats légers, 10% d'addition de ciment produit environ 5% d'augmentation de résistance en compression. Selon yang Ke (**Ke, 2008**), une augmentation de 8% du dosage en ciment (diminution du rapport E/C de 0,45 à 0,35) conduit à une amélioration de 13 à 35% des résistances des bétons, selon la nature du granulat. Ce résultat correspond à une fraction volumique de gravillon léger de 45%. La résistance augmente plus vite si le volume de granulat léger dans le béton diminue. Ke a aussi relevé un ralentissement de l'augmentation des résistances des bétons de granulats légers avec l'augmentation du dosage en ciment..

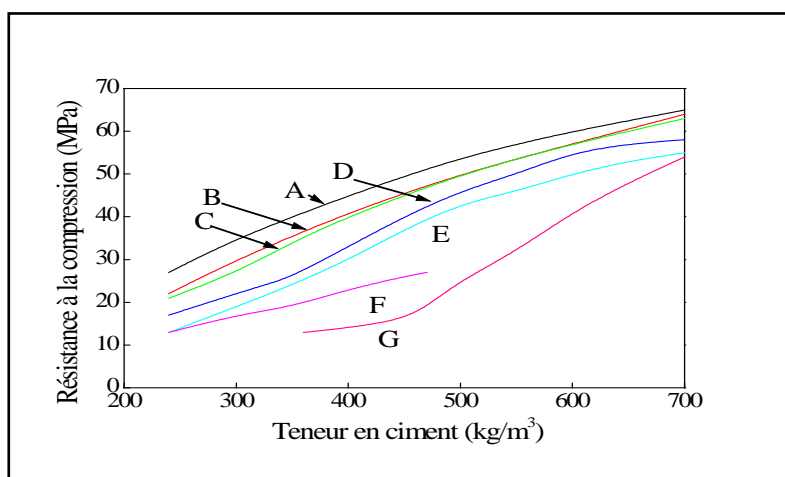


Figure I.19: Évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du dosage en ciment de bétons ayant un affaissement de 5cm et confectionnés avec différents types de granulats légers. (A) cendres volantes frittées et granulat fin ordinaire ; (B) laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire ; (C) cendres volantes frittées ; (D) schiste fritté; (E) ardoise expansée ;(F) argile expansée et sable ; (G) laitier expansé (Neville, 2000)

➤ Influence du rapport E/C et l'absorption d'eau des granulats

Il est bien évident que la résistance du béton est d'autant plus élevée que la quantité d'eau de gâchage est plus faible. Dans le cas des bétons de granulats légers il se produit des phénomènes, parfois mal expliqués : dû à l'absorption d'eau par les granulats lorsqu'on fait varier la quantité absorbée par ces granulats.

En principe, si les granulats sont secs et très absorbants, l'absorption d'eau par les granulats, avant prise risque de dessécher le mortier situé à la périphérie du granulat et dans cette zone, le ciment risque de ne pas pouvoir s'hydrater complètement. Ce qui peut conduire à une chute de la résistance du béton. Dans le cas de granulats saturés, le départ d'eau des granulats vers le mortier risque de délayer le mortier situé à la périphérie des grains et surtout le sens de migration de l'eau risque d'empêcher la pénétration du mortier dans les pores des granulats légers et de réduire les liaisons entre le mortier et les granulats et par suite la résistance du béton. Le comportement du béton léger n'apparaît quand même pas facile à comprendre. En pratique, au souci de la recherche d'une résistance élevée s'ajoutent les impératives de la mise en œuvre : le béton léger doit avoir une maniabilité correcte pendant 1 à 2 heures après sa fabrication (Arnould et al., 1986; Cormon, 1972). Cela conduit à l'emploi quasi systématique d'un plastifiant réducteur d'eau.

➤ Le dosage en granulats (rapport G/S)

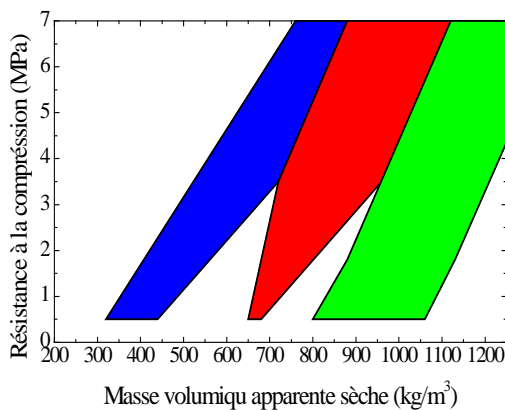
Bien entendu, le rapport du volume de granulat G, au volume absolu de Sable S, joue un rôle considérable dans la résistance du Béton léger, plus il augmente plus la proportion des granulats légers (point faible du Béton) augmente et plus la résistance diminue, mais la masse

volumique du béton est d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé. Il faut donc trouver un compromis entre les deux besoins contradictoires : Faible masse volumique et forte résistance exige en pratique un apport G/S compris entre 1.5 et 1.8, il peut atteindre 1.90 mais cela conduit à des bétons assez fragiles (Neville, 2000; Short et Kinniburgh, 1963).

➤ **Influence des propriétés des granulats légers**

○ **Masse volumique des grains**

La caractéristique des granulats légers qui a le plus d'influence sur la résistance du béton est la masse volumique des grains. Plusieurs études ont montré que la résistance à la compression des bétons légers est proportionnelle à la masse volumique des grains et du faite que la masse volumique sèche du béton est étroitement liée à celle des granulats, il est possible d'exprimer la résistance du béton en fonction de sa masse volumique. **Les figures I.20 et I.121** montrent les variations de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique sèche du béton pour les bétons de structure et celle des bétons de faibles résistances. On voit bien que cette résistance augmente lorsque la masse volumique du béton augmente.



- Perlite , vermiculite
- ponce
- scorie expansée, schiste expansé

Figure I.20: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de faible résistance (Steiger et Hurd, 1978).

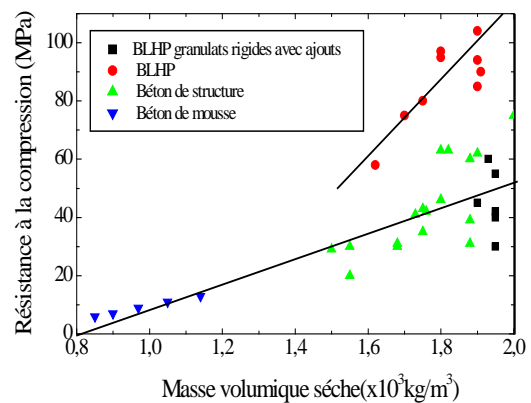


Figure I.21: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de grande résistance (Shink, 2003)

○ **Résistance des granulats :**

Bien entendue, la résistance des granulats légers a une influence sur la résistance du béton, il faut noter que pour une masse volumique sèche donnée du béton légers, la résistance à la compression du béton croît avec la résistance des grains, l'analyse est évidemment compliquée par le fait que la résistance des granulats légers dépend de leur masse volumique (Arnould et al., 1986). Une faible masse volumique traduit une forte expansion des grains et donc, la présence de nombreuses alvéoles dans les granulats. La présence de ces alvéoles se traduit par une chute de

la résistance des grains. On pouvait donc s'attendre à ce qu'il existe une relation assez directe entre la résistance du béton et celle des granulats. La **figure I.22** montre une corrélation entre la résistance du béton léger et celle des granulats.

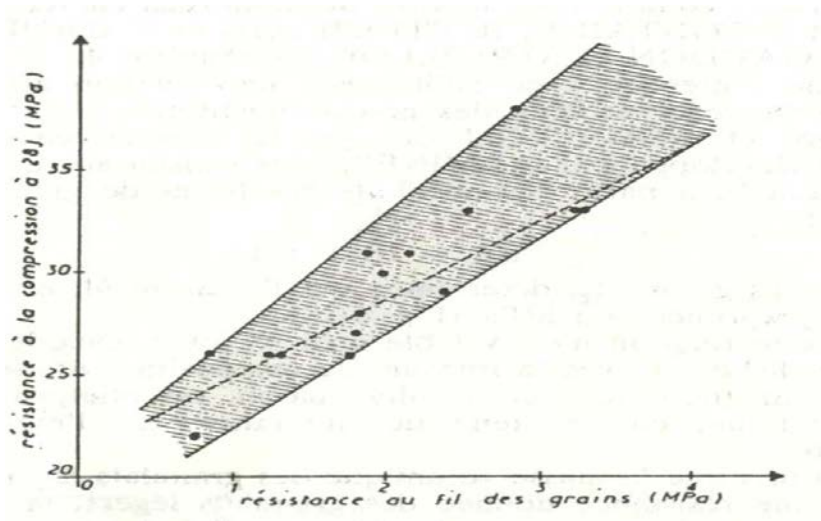


Figure I.22 : Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains (Arnould et al., 1986).

o **Taille des granulats :**

Pour les granulats légers rigides utilisés généralement dans les bétons de structure, il est vrai qu'on obtient des résistances meilleures avec les gros granulats qu'avec des petits granulats. Mais pour les granulats légers utilisés dans les bétons de construction et d'isolation, le phénomène est inversé, puisque les gros granulats sont relativement faibles et leur résistance peut constituer une limite pour celle du béton (Neville, 2000).

I.4.5.2. Résistance à la flexion des bétons de granulats légers

Dans la plupart des bétons légers, la résistance à la flexion suit la résistance à la compression. Cette résistance est relativement faible, d'autant que la propagation des fissures s'effectue au travers des granulats légers et non au niveau des interfaces. Les résistances en traction peuvent atteindre des valeurs maximales de **5.0 à 7.6 MPa** pour des bétons d'une masse volumique moyenne de 1940 kg/m^3 (Cormon, 1972; Shink, 2003).

Pour les granulats légers à caractère fibreux, leur action dans les bétons légers est similaire à celle observée dans les granulats rigides, c'est-à-dire qu'ils permettent essentiellement d'augmenter la ductilité du matériau. Les bétons légers présentent à peu près le même rapport R_t/R_c que les bétons ordinaires (Bouguerra, 1997). Ce rapport est influencé par : La grosseur des granulats, L'âge de l'échantillon et L'environnement de mûrissement

La **figure I.23** montre la relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction. On constate bien qu'il y a une bonne corrélation entre les deux résistances.

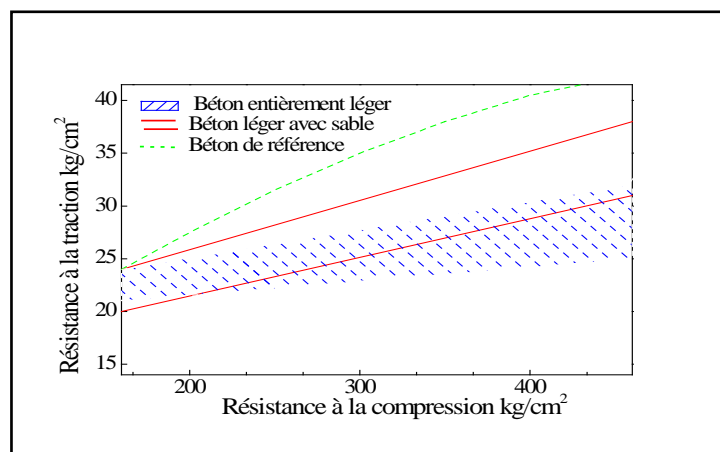


Figure I.23: Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction (Arnould et al., 1986)

I.4.5.3. Mode de rupture des bétons de granulats légers

A la différence du béton traditionnel, la rupture en compression d'un béton léger se produit en général par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent le plus grand nombre possible de granulats légers. La rupture des éprouvettes est ainsi caractérisée par un ou plusieurs plans parallèles au chargement et par le fendage des granulats (Arnould et al., 1986; Ke 2008; Le Hung Nguyen 2013; Nóvoa et al. 2004). Les principaux facteurs ayant une influence sur la résistance en compression des bétons de granulats légers sont les caractéristiques des granulats et la composition du béton.

Si le béton contient des granulats rigides plus résistants que le mortier, ceux-ci constituent les points durs du système. Les contraintes imposées au matériau entraînent des déformations notables dans le liant et négligeables dans le granulat. Des zones de concentrations de contraintes naissent donc dans le mortier, qui fissure. L'adhérence entre les granulats et le mortier étant insuffisante pour supporter les niveaux de sollicitation imposés, la fissuration du mortier se produit autour des grains qui se décollent de la pâte de ciment. La résistance du béton est donc pilotée par la résistance de la zone servant d'interface entre le mortier et le granulat rigide (Biarez et Hicher 1997; Bonnet 2003; Aquino, Li, et Shah 1995).

A l'inverse, dans le cas du béton léger contenant des granulats de faible résistance, les contraintes cheminent à travers la pâte, contournant les « points faibles » du matériau **figure I.24**. Le mortier subit des niveaux de sollicitation élevés et les déformations de la pâte et des granulats sont importantes. Une fois les granulats écrasés, ils ne participent plus vraiment à la résistance du matériau et le mortier finit par céder. La résistance en traction des granulats pilote donc la résistance en compression du béton léger. Ce mode de rupture est possible car les granulats légers possèdent une surface poreuse importante qui crée une excellente adhérence

entre la pâte et le grain. Ce n'est donc pas la liaison au niveau de la surface de contact qui est détruite comme dans le cas de granulats rigides mais c'est le granulat qui cède.

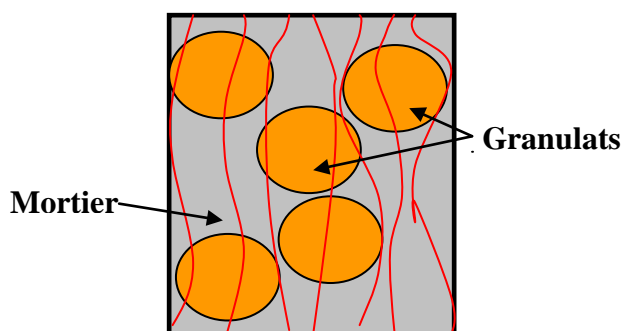


Figure I.24: Transfert des efforts dans un béton de granulats légers (CEB-FIB 77)

Une nuance existe cependant dans le cas de granulats très déformables même si leur résistance reste modérée. En effet, sous l'effet des contraintes, le mortier va se déformer et le granulat va faire de même par contact granulat-mortier. Comme le granulat peut supporter des niveaux de déformation supérieurs à ceux du mortier, c'est ce dernier qui va se fissurer sous l'effet des contraintes et le granulat n'ayant pas atteint son seuil de rupture, ne sera pas détruit. La rupture du béton se fait dans ce cas précis par rupture du mortier et non par rupture des granulats. Ainsi, les caractéristiques des granulats sont déterminantes dans les performances des bétons légers (Arnould et al., 1986).

I.5. les bétons de granulats de liège

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des travaux expérimentaux menés par différents auteurs de la littérature sur les propriétés et le comportement mécanique des bétons de granulats de liège. Cette synthèse met en avant les spécificités de ces bétons, en particulier leurs différences avec les bétons traditionnels au niveau de l'interface matrice/granulat, des masses volumiques et des propriétés mécaniques des bétons. Les caractéristiques élastiques et de rupture sont reliées aux propriétés des granulats, à la composition du béton et aux conditions de conservation.

I.5.1. Propriétés physico-chimiques des bétons de granulats de liège

I.5.1.1. Compatibilité du liège avec les matrices cimentaire

S. R. Karade · M.Irle · K. Maher (Karade,et al., 2006) ont utilisé des granulats de liège naturel issus des déchets de l'industrie du bouchon de bouteille. L'objectif de leur étude est d'étudier l'influence de l'incorporation du liège dans une matrice cimentaire pure sur trois aspect la granulométrie des granulats, la densité du liège, et la proportion du liège utilisé.

A cet effet cinq compositions ont été utilisées : **MDMS** = Medium Density (106-171kg/m³), Medium Size (0.6-1mm), **MDLS** = Medium Density, Large Size (2-3mm), **LDMS** = Low

Density (90-104 kg/m³), Medium Size, **LDLS**=Low Density, Large Size, **HDSS** = High Density (280 kg/m³), Small Size (0.04-0.2mm). Avec des pourcentages d'incorporation du liège de 10,20 et 30% de la masse du ciment. Les résultats obtenus montrent que les mélanges ciment-liège élaborés avec les granulats de grande densité et de petites dimensions (HDSS) présentent une compatibilité faible par rapport à celle des autres mélanges. Cela montre que plus la taille des granulats est petite plus la compatibilité avec le ciment est faible et plus on travail avec du liège de grande densité plus la compatibilité est moins bonne. Les résultats montrent aussi que les mélanges avec des granulats de moyenne densité et de grandes dimensions présentent les meilleures compatibilités. D'autre part la compatibilité est de plus en plus moins bonne que le dosage en granulats de liège est grand. A titre indicatif la **figure I.25** présente l'effet de la taille des granulats et leur densité pour un dosage en granulats constant.

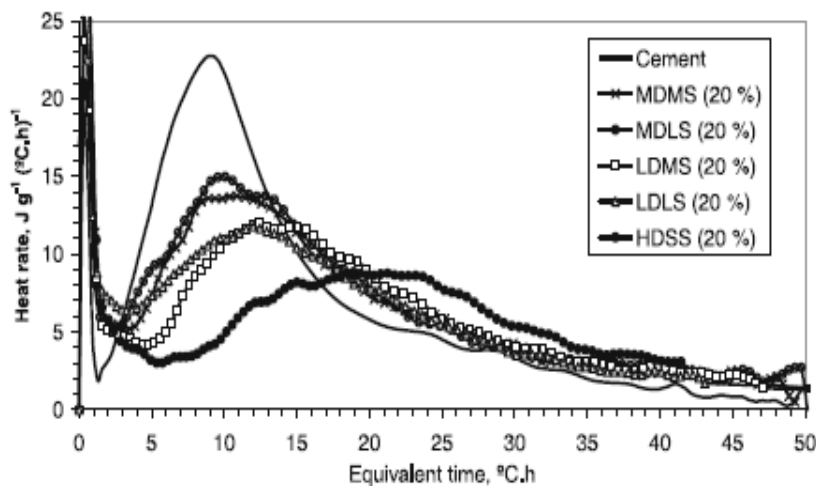


Figure I.25: Effet de l'ajout de granulés de liège (20% en poids) sur le taux de chaleur d'hydratation du ciment (Karade et al., 2006)

I.5.1.2. Densité des bétons de liège

Laoud.B, 2012 a élaboré un béton léger à base de granulats de liège incorporé dans un matrice ciment-sable calcaire. Les granulats de liège utilisés ont deux dimensions 3/8 et 8/15. Dans son travail Laoud a substitué un volume de sable par le même volume en granulats de liège à des pourcentages en volume liège/sable de 0, 1, 1.5, 2, avec un dosage en poids Ciment/Sable égale à 1/3 et un rapport Eau /Ciment égal à 0.6. Les résultats obtenus (**figure I.26**) révèlent l'intérêt remarquable de l'incorporation des granulats de liège sur l'allègement du composite élaboré.

En effet la masse volumique du composite décroît en fonction de l'augmentation du volume de granulats de liège. Elle passe de **1949 kg/m³** pour le béton de référence correspondant à 0% de liège à **980 kg/m³** pour le composite correspondant à un maximum de substitution, avec un taux de réduction de 50%. D'autre part l'effet de taille des granulats et peut significatif mais les granulats 3/8 allège mieux que les granulats 8/15.

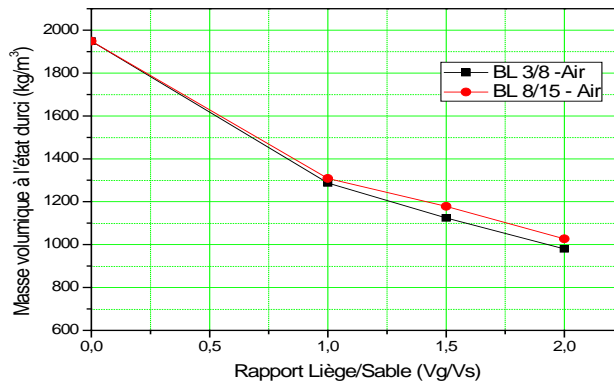


Figure I.26: Variation de la masse volumique du béton conservé à l'air libre (Laoud, 2012)

I.5.2. Propriétés Thermomécanique des bétons de granulats de liège

I.5.2.1 Influence de l'effet de taille sur les caractéristiques thermo-mécaniques

- D.K. Panesar et B. Shindman (Panesar D.K. et Shindman B, 2012)** ont étudié l'effet de taille des granulats de liège sur les caractéristiques thermo-mécaniques des mortiers et des bétons à base de ciment. Le dosage du ciment/sable en masse est pris égale à 1/2 pour les mortiers et 400kg/m³ de ciment pour les bétons. Les gammes de dimensions des granulats de liège utilisés sont (0,5–1), (2–3), (3–5), (3–8) and (6–14) mm. Les pourcentages de substitution du sable ou/et du gravier sont 0, 10, 20%. Trois modes de substitution sont réalisés; il s'agit de substituer le sable par le liège dans les mortiers puis le gravier par le liège dans les bétons puis le sable et le gravier par le liège. le liège est aussi utilisé avec une seul dimension et avec la combinaison de deux granulométrie. Ils ont réalisé alors dix compositions de mortier notés de M1 à M10 (M1 et le mortier de référence : sans granulats de liège) et neuf bétons notés de C1 à C10 (C1 est le béton de référence : sans granulats de liège). Les résultats des résistances sont illustrés dans les **figures I.27 et I.28**. La figure I.27 montre une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la densité du composite.

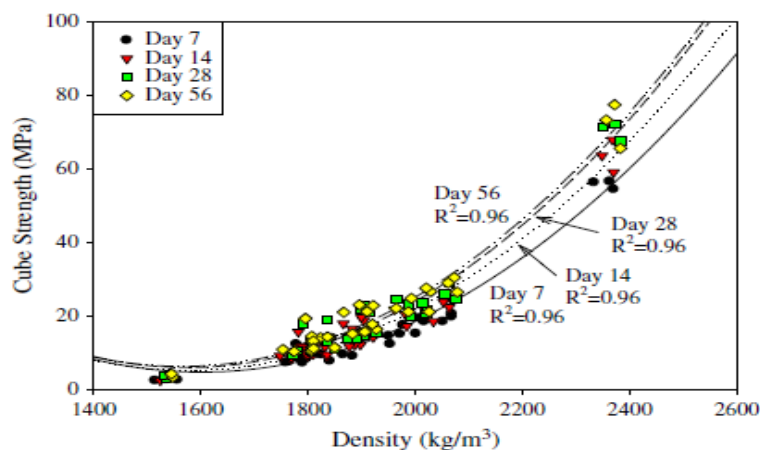


Figure I.27: Corrélation entre la résistance à la compression et la densité (Panesar et Shindman, 2012)

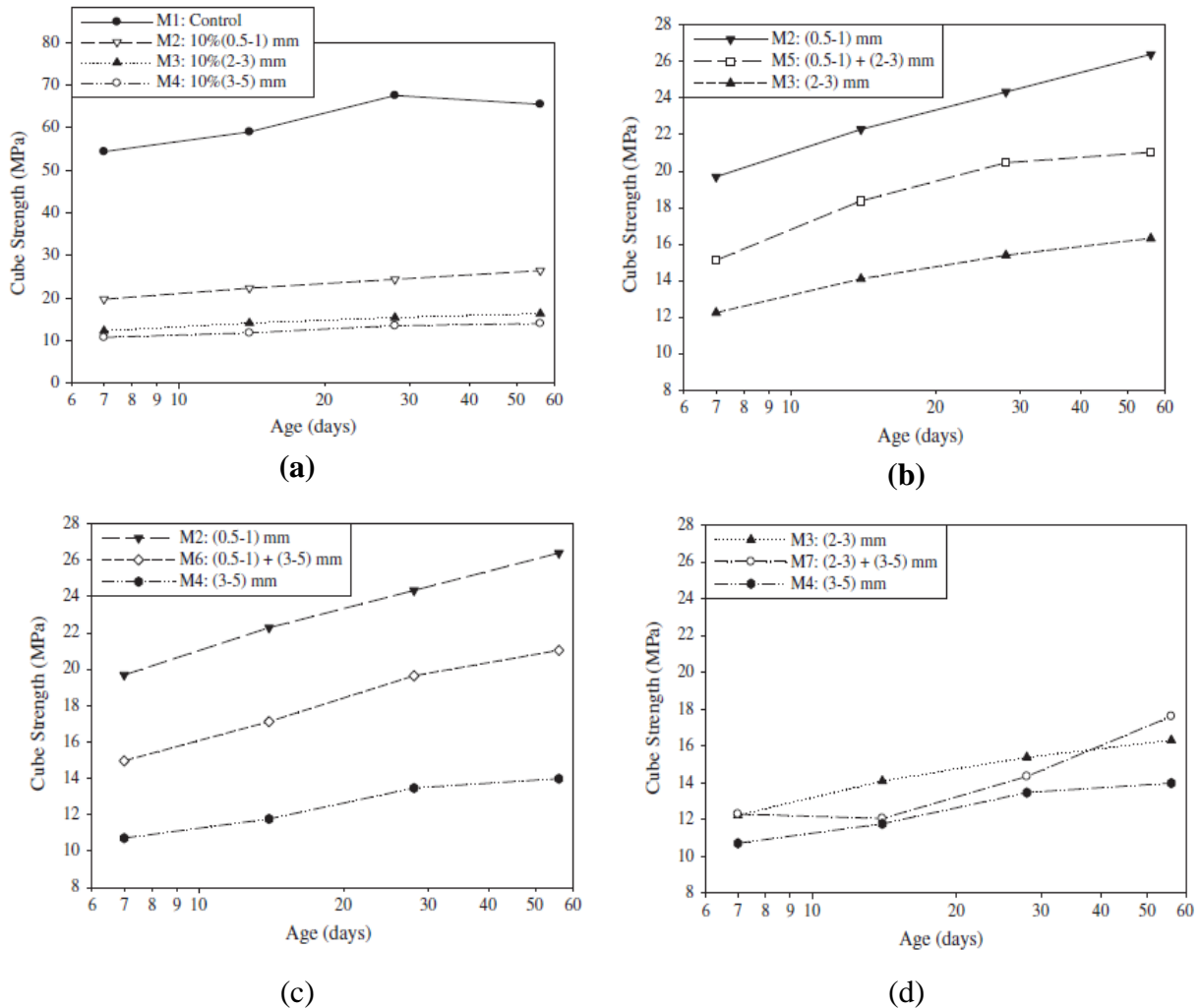


Figure I.28: Influence de la taille des granulats de liège sur la résistance à la compression des mortiers de liège (Panesar et Shindman, 2012)

Les figures I.28 a,b,c et d montrent que la résistance des mortiers élaborés chute lorsqu'on passe du béton témoin au béton allégé. Elle passe de **67.5 MPa** pour le mortier témoin à **24.3MPa** pour le mortier **M2(0.5-1)** et **15.4MPa** pour le mortier **M3(2-3)** et **13.5MPa** pour le mortier **M4(3-5)** correspondant au dosage de **10%** de liège. Pour le dosage **20%** elle atteint la valeur de **10.7MPa** pour le mortier **M8(0.5-1)** et enfin atteindre sa valeur minimale de **9.2MPa** correspondant au mortier **M10(0.5-1+3-5)** avec un dosage de **20%**.

L'étude de l'effet de taille des granulats montre que plus la taille des granulats de liège augmentent plus la résistance diminue. La combinaison de deux granulométries et qui correspond aux mortiers M5, M6 et M7 (Figure I.28b et 28c et 28d), montre que les mortiers avec combinaison de deux granulométrie donne des résistances plus petites que celle avec le mortier avec la petite granulométrie et plus grande que celle avec la grande granulométrie.

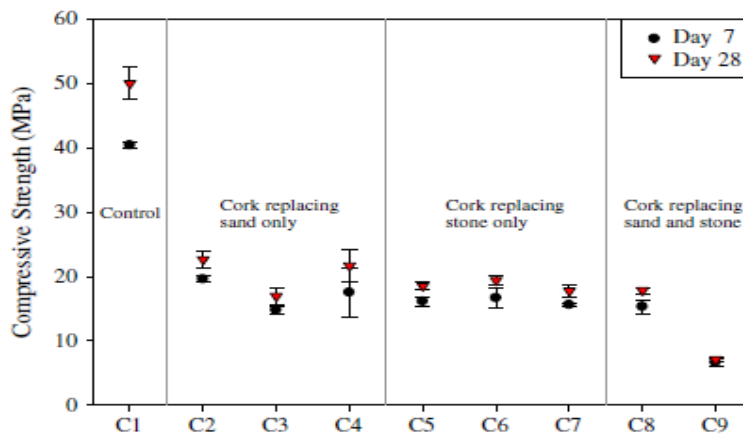


Figure I.29: Influence de l'incorporation du liège dans la résistance à la compression des bétons (Panesar et Shindman 2012)

Pour les bétons à base de liège; la **figure I.29** montre les variations de résistance à la compression selon le mode de substitution. Les remarques sont les mêmes que pour les mortiers. L'incorporation des granulats de liège fait chuter la résistance à la compression. Elle passe de **50MPa** pour le béton de référence C1 à **22.6 MPa** pour le béton C2 correspondant à 10% de liège et avec la granulométrie (0.5-1). On remarque aussi que la résistance chute lorsque la taille des granulats de liège augmente. À même dosage en liège, les bétons avec du liège substitué au sable présentent des résistances meilleures que celles avec les bétons avec du liège substitué au gravier et qui est pratiquement la même qu'avec les bétons dont le sable et le gravier sont substitués à des proportions égales par le liège. Enfin la valeur minimale de la résistance est **7.2 MPa** correspondant au béton C9 avec 20% de substitution du sable et du gravier par le liège.

A. Moreira , J. António, A. Tadeu (Moreira, et al., 2014) ont élaboré un mortier de granulats de liège incorporés dans une matrice cimentaire à base de sable de rivière. Le ciment utilisé est un ciment (CEM II/B-L 32.5 N). Les granulats utilisés sont une combinaison à proportions égales de deux granulométries 3/5 et 5/10mm. Les mélanges sont réalisés à trois dosages de ciment 150, 250, 400kg/m³. La substitution du sable par les granulats de liège est effectuée à une proportion volumique de 80%. Six(06) mélanges sont alors réalisés, trois sans granulats notés R150, R250 et R400 correspondant aux mortiers de référence et trois mélanges avec des granulats de liège notés M150, M250 et M400. Les résultats obtenus révèlent l'impact des granulats de liège sur les caractéristiques thermiques des composites réalisés.

Tableau I.6: Valeurs de la conductivité thermique des composites

Sample	λ [mW/m °C]
M150	194.7 ± 5.2
M250	214.5 ± 5.6
M400	318.1 ± 7.9
R150	677.0 ± 12.2
R250	698.7 ± 12.7
R400	782.5 ± 14.7

Les valeurs de la conductivité montrent que la substitution du sable par les granulats de liège a permis d'améliorer le pouvoir isolant du composite de 75%. D'autre part plus le dosage en ciment augmente plus la conductivité augmente.

I.5.2.2. influence de la nature du liège

Branco, Tadeu, et de Lurdes Belgas CREis (Branco et al, 2007) ont étudié l'influence du type de liège (Naturel ou expansé) et du mode de substitution des granulats de gravier ou du sable par des granulats de liège à des pourcentage 0, 10, 20, 25, 30%. Le béton de référence est noté BR, celui avec le liège naturel est noté NCG et celui avec le liège expansé ECG

La **figure I-30** montre la variation de la résistance moyenne à la compression avec la quantité de liège dans le mélange. Une perte de Résistance peut être observée avec l'augmentation du pourcentage de liège. Les deux types de liège étudié conduisent à des baisses similaires dans la résistance à la compression. Cependant le liège nature donne des résistances plus meilleures que le liège expansé

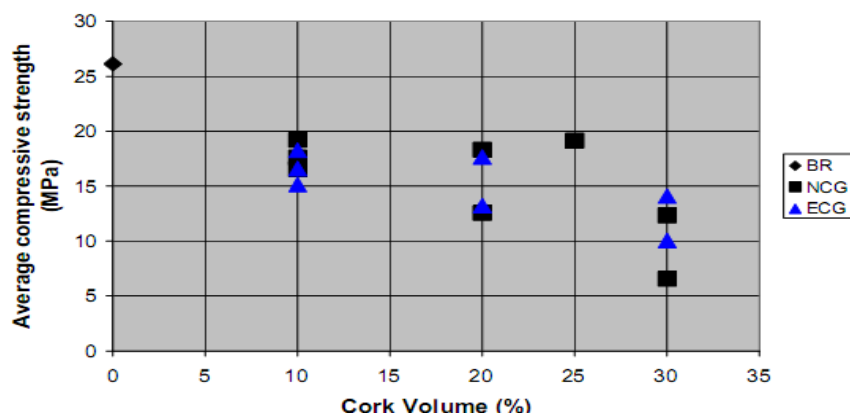


Figure I.30: Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège (Branco et al., 2007).

BR (béton de référence), NCG (granulat naturel de liège), ECG (granulat expansé de liège).

I.5.2.3 Influence du facteur d'allègement

Un certain nombre d'auteurs ont fait des études de comparaison entre l'utilisation des granulats de liège et autre granulats légers tels que les granulats de polystyrène ou les granulats de caoutchouc. **Ana Brás, Márcio Leal, et Paulina Faria (Brás et al., 2013)** ont réalisé une étude

de comparaison entre un mortier à base de granulats de liège de dimension (0.5/2mm) et un mortier à base de billes de polystyrène de diamètre 2mm. Le sable utilisé est un sable fin (0/1). La substitution du sable par les granulats de liège ou les billes de polystyrène se fait à des pourcentages croissant de 10, 20, 40, 50, 70 et 80% en volume. Tous les mortiers sont réalisés avec un dosage en ciment 1/3 (i.e 1 part de ciment et 3 part de granulats (sable+granulats)). Un superplastiant est utilisé. Le mortier de référence est noté CB, les mortiers de liège sont notés CC et les mortiers de polystyrène sont notés CE.

Les résultats de la résistance à la compression sont représentés dans la **figure I.31** qui illustre les variations de la résistance relative (R/R_0) en fonction du dosage en granulats de liège et en billes de polystyrène.

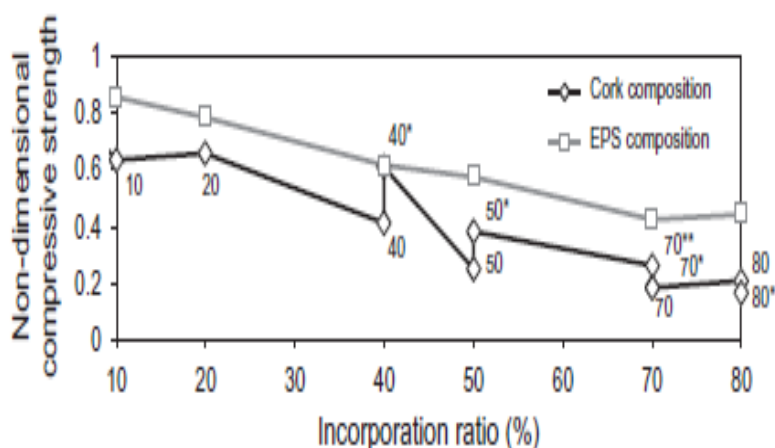


Figure I.31: Variation de la résistance relative en fonction du dosage en granulats (Brás et al.,2013)

Les résultats montrent que les mortiers à base de polystyrène présentent des résistances à la compression meilleurs que celles des mortiers de granulats de liège. Ceci est expliqué par les auteurs par le faite de la légèreté des billes de polystyrène par rapport aux granulats de liège et d'un autre coté de la porosité des mortiers de liège par rapport aux mortiers de polystyrène qu'on peut voir sur la **figure I.32**.

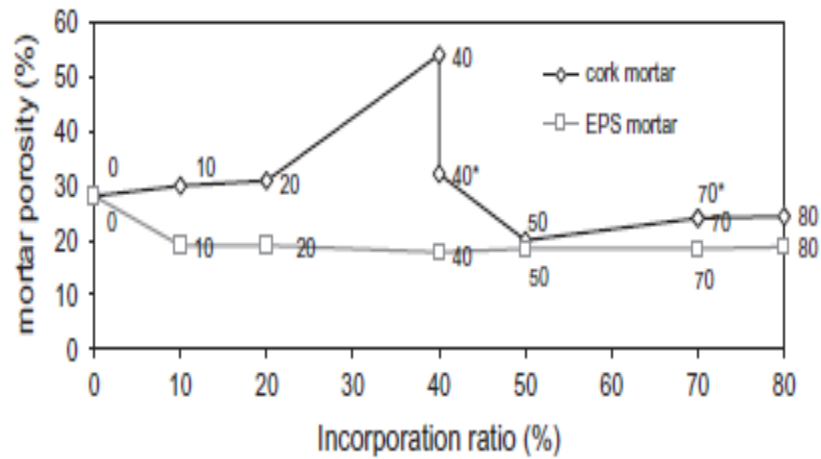


Figure I.32: Variation de la porosité des mortiers en fonction du dosage en granulats (Brás et al.,2013)

Les résultats de la mesure de la conductivité thermique des deux types de mortier sont illustrés par la **figure I.33** qui montre les variations de la conductivité thermique en fonction de la densité. Du point de vue isolation thermique le mortier de liège semble plus bénéfique que le mortier de polystyrène.

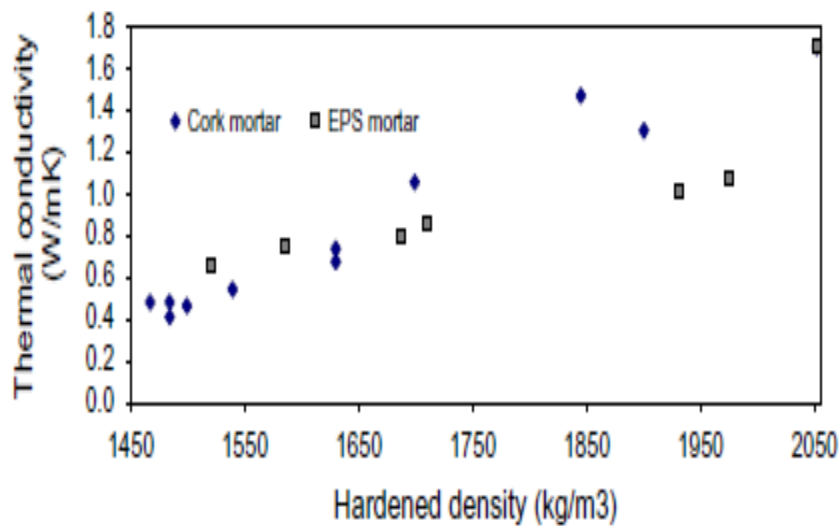


Figure I.33: Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité (Brás et al.,2013)

Chapitre II:
Transfert de chaleur et
méthodes de mesure

La diffusivité thermique commande la vitesse de transmission d'une variation de température à travers une paroi. La température du matériau s'élève d'autant plus rapidement que la chaleur peut plus facilement l'atteindre (= conductivité élevée): **a** évolue donc dans le même sens que la conductivité thermique.

Mais sous l'effet d'une puissance thermique, sa température s'élève d'autant plus lentement qu'il faut beaucoup plus de chaleur pour l'élever (chaleur volumique élevée): **a** évolue dans le sens inverse de la chaleur volumique.

La diffusivité **a** évolue donc dans le même sens que le rapport de la conductivité thermique et de la chaleur volumique. La diffusivité thermique est très liée au phénomène de déphasage à travers les parois. Ce déphasage est inversement proportionnel à la diffusivité thermique.

❖ **L'effusivité thermique **b** ($\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$)** exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou restituer) une puissance thermique.

$$b = (\lambda.\rho c)^{1/2} \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

L'effusivité thermique rend compte de la capacité de stockage thermique d'une paroi : un matériau absorbe d'autant plus la puissance thermique que la chaleur peut plus facilement l'atteindre: **b** évolue dans le même sens que la conductivité thermique λ .

Mais il absorbe d'autant plus facilement la puissance thermique que sa température s'élève peu sous l'effet de la chaleur (= chaleur volumique élevée): **b** évolue dans le même sens que de la chaleur volumique.

L'effusivité thermique évolue donc dans le même sens que le produit de la conductivité thermique par la chaleur volumique.

II.2.2 Différentes techniques de mesure des paramètres thermiques

Ce paragraphe présente les méthodes de mesure des principales propriétés thermiques d'un solide: conductivité thermique, chaleur massique et diffusivité thermique. Ces propriétés permettent, avec les propriétés physiques du matériau ou la géométrie de la structure, de connaître les autres propriétés thermiques comme la résistance thermique, le coefficient de transmission surfacique ou l'effusivité thermique. L'ensemble de ces propriétés caractérise la performance thermique du matériau.

Il existe plusieurs méthodes de mesure des propriétés thermiques des matériaux. D'après Degiovanni (**Degiovanni, 1994**), la classification la plus naturelle se fait en deux grands groupes : les méthodes de mesure en régime permanent et les méthodes de mesure en régime variable (ou transitoire). Dans les premières, le temps n'intervient pas. Ces méthodes permettent uniquement de mesurer la conductivité thermique Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes : la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode de la barre, la

méthode des boîtes, et la méthode du flux radial. Dans les secondes, les mesures sont effectuées en fonction du temps et permettent l'identification des trois paramètres : conductivité, chaleur spécifique et diffusivité. De nombreuses méthodes instationnaires ont vu le jour pour les mesures de la conductivité thermique, nous pouvons citer : méthode fil chaud, plan chaud, ruban chaud, pastille chaude, et Hot Disk. (Franco, 2007; Klarsfeld et De Ponte, 2012)

Le choix d'une méthode de mesure de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau-précision se pose de manière précise, de nombreux paramètres sont à prendre en compte :

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire, ou quasi établi.
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.
- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres.
-etc..

Les méthodes en régime permanent sont complexes en raison des appareillages compliqués, des conditions de mesure strictes et du long temps nécessaire pour établir un gradient de température permanent traversant l'échantillon (Franco, 2007). Les méthodes en régime variable sont actuellement les plus utilisées. Elles consistent à appliquer sur un échantillon à l'équilibre une perturbation thermique, et à mesurer une ou plusieurs températures (ou flux) en fonction du temps. Nous présentons dans la suite les techniques de mesure les plus fréquentes dont une en régime permanent, la technique de plaque chaude gardée, et deux en régime transitoire, les techniques du fil-chaud et du Hot-disk. (Filali, 2006)

II.2.2.1 Méthode de la plaque chaude gardée

C'est une expérience en régime permanent (ISO 8302) où l'on impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel, et on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une plaque de faible épaisseur par rapport aux dimensions traverses de l'échantillon. Le dispositif expérimental est schématisé sur la **figure II.1** Cette méthode est réalisée sur la base de deux suppositions : **La première :** On suppose le matériau homogène en surface, c'est-à-dire selon des plans parallèles aux surfaces qui le limitent, mais il peut être hétérogène en épaisseur, dans la direction perpendiculaire aux surfaces.

La deuxième : est de considérer que si l'on réchauffe par effet Joule une plaque métallique, appelée plaque chaude, située entre deux éprouvettes identiques en contact chacune, vers

l'extérieur, avec une plaque de refroidissement, appelée plaque froide, et de température égale mais inférieure à celle de la plaque chaude, la puissance électrique dissipée par effet Joule dans la plaque chaude se répartira en deux parties égales.

Dans la méthode de la plaque chaude gardée, on utilise une garde active pour minimiser les pertes latérales aux extrémités de l'échantillon (conditions aux limites). Le transfert est unidirectionnel et est assuré par un enroulement résistif. A l'aide de thermocouples disposés de part et d'autre de l'échantillon étudié, la température est ainsi mesurée.

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisqu'ils sont basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que :

$$T_1 - T_2 = R\phi \dots \dots \dots (\text{II.11})$$

Où $R = \frac{e}{\lambda S}$

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants. Ce type de méthode est difficile à mettre en œuvre et pose beaucoup de problèmes d'ordre expérimental comme :

- Atteindre le régime permanent qui est particulièrement long et peut atteindre une durée de 24h.
- Obtenir un flux unidirectionnel dans l'échantillon
- Mesure de ce flux et les températures avec précision

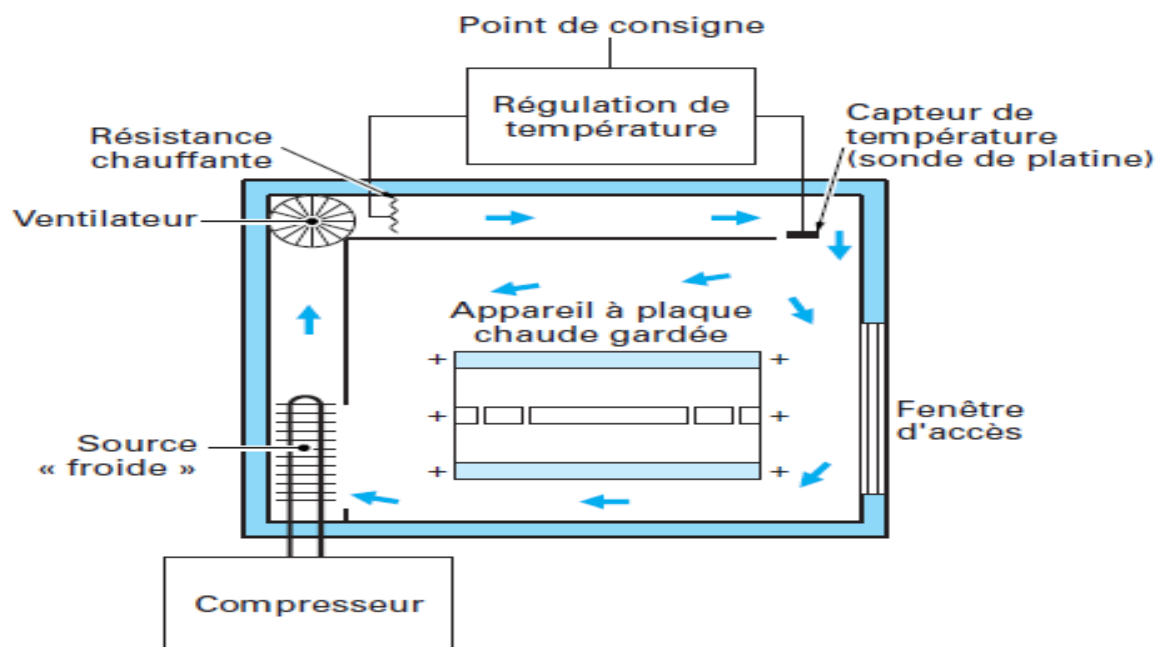


Figure II.1: Schéma de principe de la plaque chaude gardée (Klarsfeld et De Ponte, 2012)

II.2.2.2 Méthode du fil chaud

C'est la méthode de caractérisation la plus utilisée dans le monde industriel par sa facilité de mise en œuvre, et sa rapidité. Elle fut développée en premier lieu pour l'étude de la conductivité thermique de liquide, et étendue par la suite à la caractérisation de milieux solides et aux milieux poreux (Degiovanni, 1994; Franco, 2007; Izard, 2006). Le principe expérimental est simple : on place un fil métallique entre deux blocs du matériau à étudier pour les matériaux solides et dans une enceinte fermée pour les gazs et les liquides. On applique un échelon de flux de chaleur constant ($\varphi = 0$ si $t < t_0$ et $\varphi = \varphi_0$ si $t > t_0$) au fil chauffant et on relève l'évolution de la température $T_s(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide (figure II.2).

L'élévation de la température du fil chaud est fonction de la conductivité thermique du matériau entouré. La connaissance de cette valeur fournit la conductivité thermique. Franco (Franco, 2007) a proposé une variation de la méthode du fil chaud en remplaçant une des deux éprouvettes par un isolant. Le fil chaud est utilisé comme une sonde thermique pour éliminer la non-homogénéité locale du matériau. De plus, un autre thermocouple est ajouté pour assurer une bonne précision.

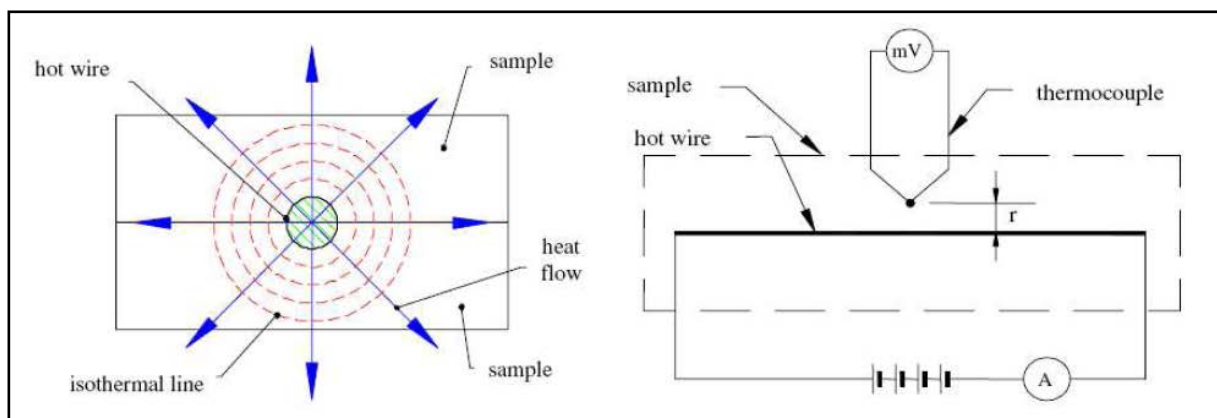


Figure II.2: Schéma du montage de la méthode du fil chaud (Franco, 2007)

II.2.2.3 Méthode de Hot-disk

La méthode THS est très semblable ou étroitement liée à la technique du fil chaud. La différence essentielle est l'utilisation d'une bande mince en métal au lieu d'un fil. Elle a été développée par (Gustafsson, 1991).

Cette technique s'intéresse à la mesure simultanée de la conductivité thermique, et de la diffusivité thermique et donne par déduction la capacité thermique des matériaux. Le dispositif expérimental est simple de mise en œuvre. Une sonde composée d'une résistance

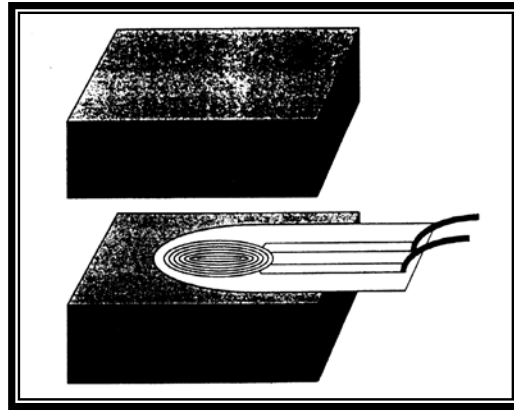


Figure II.3 : Principe expérimental du Hot Disk

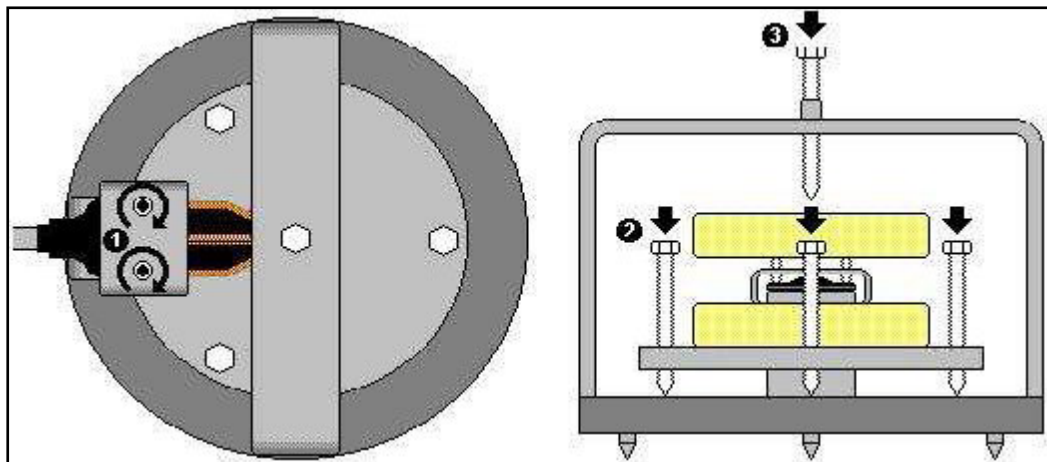


Figure II.4: Montage standard du Hot Disk

En conclusion; nous avons présenté d'une manière générale les différentes méthodes de mesures des propriétés thermophysiques, notamment de la conductivité thermique. En régime stationnaire, la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode des boîtes, on peut encore citer d'autres méthodes comme la méthode de la barre, et la méthode du flux radial. Pour le régime instationnaire, on a cité : la méthode du fil chaud, et la méthode Hot Disk, mais d'autres méthodes peuvent être mentionnées comme celle du plan chaud, ruban chaud, et pastille chaude.

Le choix d'une méthode de mesure va dépendre de plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

- La fiabilité des résultats et la durée de mesure
- L'aspect physique du milieu
 - Milieux granulaires □ méthodes en régime instationnaire

- Milieux sous forme compactes □ méthodes en régime stationnaire

➤ Des moyens disponibles

Pour un gain de temps appréciable et une facilité de mise en œuvre de l'échantillon, les méthodes in stationnaires sont de loin les plus conseillées.

Synthèse bibliographique

L'étude bibliographique nous a permis en premier lieu de situer l'utilisation des bétons de granulats légers dans le domaine de construction et la mise en œuvre du recours à la valorisation des déchets naturels et des déchets industriels pour l'élaboration des bétons ou de mortiers légers isolant thermiquement. En deuxième lieu, on essaye de revoir les différents travaux de recherche réalisés sur les composites à base de granulats légers en générale et les composites à base de granulats de liège en particulier; afin de situer notre travail et de faire ressortir son originalité et son apport dans le domaine de construction.

A travers cette étude nous avons pu voir que les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des composites à base de granulats légers sont étroitement dépendantes de celles des granulats. Une remarque pratiquement observée pour tous ces composites, est que l'incorporation de granulats légers fait diminuer leur densité d'autant plus que les granulats sont légers. L'apport des granulats légers est très remarquable en matière d'isolation. En revanche, on signale des chutes parfois considérables des résistances mécaniques.

Un état de lieu consacré aux matériaux de liège a permis de révéler les multitudes caractéristiques très bénéfiques du liège et de son utilité en matière d'allègement des structures et d'isolation des locaux. Les différents travaux réalisés sur les composites à base de granulats de liège soulignent un nombre de remarques concernant la compatibilité du liège avec les différentes matrices, l'effet de la nature du liège utilisé comme granulats ainsi que l'effet de taille sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des composites à base de liège. Toutes ces études assignent une bonne compatibilité du liège avec les différentes natures de matrice. Entre autre elles ont souligné l'effet de taille des granulats de liège qui est analogue pratiquement avec tous les granulats légers. Plus la taille des granulats augmente et plus la résistance diminue. En revanche la conductivité est inversement proportionnelle à la taille des granulats. Comme la taille, la nature du liège a une influence sur les propriétés des composites à base de liège. Le liège expansé est plus recommandé à l'utilisation en particulier dans les matrices cimentaires.

Partie II

Chapitre III. Matériaux et méthodes expérimentales:

Etant donné que les caractéristiques physico-mécaniques des bétons sont étroitement liées à celles des différentes matières premières qui les composent, il est indispensable d'étudier les caractéristiques des différents matériaux utilisés afin de pouvoir convenablement interpréter les résultats obtenus par la suite.

La première partie est consacrée aux méthodes de caractérisation des matières premières puis on abordera les méthodes de caractérisation physico-mécaniques des matériaux élaborés.

Les matériaux étudiés sont des bétons de sable calcaire allégés par des granulats de liège. Ils sont destinés à être utilisés comme des matériaux de construction, isolant et isolant-porteurs, dont la tenue mécanique est assurée par la matrice constituée de ciment et de sable calcaire et l'isolation par la faible conductivité thermique des granulats de liège. Avant d'aborder la caractérisation physico-mécanique de ces matériaux; objectif du présent travail, nous allons consacrer ce chapitre à une caractérisation générale des matières premières utilisées, puis à l'élaboration des bétons étudiés et enfin à une brève présentation des principales techniques expérimentales utilisées.

L'élaboration d'un béton calcaire à base de granulats de liège est très spécifique dans le sens où elle nécessite le mélange de matériaux d'origines très différentes : minérale et végétale. De ce fait, la caractérisation de ces matières nécessite l'utilisation de techniques adaptées. Le présent chapitre est l'occasion de préciser successivement les méthodes utilisées dans ce travail pour caractériser les matières premières de la matrice et les granulats de liège.

III.1 Les matières premières

Les matériaux utilisés pour l'élaboration des bétons calcaires légers sont le ciment composé CPJ de la cimenterie Lafarge de Msila , un sable calcaire issu des déchets de concassage et des granulats issus de l'industrie des panneaux de liège.

III.1.1 Le Sable

Le sable utilisé est un sable calcaire de granulométrie 0/3 provenant des déchets de concassage des roches massives issus des calcaires dolomitiques du turonien, la source de ce sable est la carrière de Ouazane située à la limite septentrionale du djebel Makrane au voisinage du pont de l'oued M'Zi dans la commune de Laghouat.

Le **tableau III.1** regroupe les principales caractéristiques du sable calcaire utilisé.

Les valeurs moyennes des masses volumiques apparentes montrent que le sable est plus dense, la valeur du module de finesse confirment que notre sable est plus ou moins fin et les valeurs de l'équivalent de sable (selon la norme **NF P18 598**) mettent en évidence la propreté du sable calcaire

Les valeurs du tableau III.1 montrent que le sable exploité est un sable plus ou moins fin propre et sans trop d'impuretés, son emploi comme sable de béton peut conférer à ce dernier les performances mécaniques requises. Le taux d'absorption du sable calcaire est relativement élevé par rapport au sable siliceux, ceci doit être pris en considération dans l'optimisation de la quantité d'eau de gâchage.

Tableau III.1: Propriétés physiques du sable calcaire

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Equivalent de sable (%)	Absorption d'eau (%)	Porosité
1530±4	2670±2.6	83.1±1	7.780±0.03	0.43±0.01

La **figure III.1**, illustrant l'analyse granulométrique réalisée selon la norme **NF P18- 560**, montre que le sable calcaire est un sable référentiel en se référant à la norme **XP P 18-540** avec un module de finesse de 2.66. D'après la courbe granulométrique le sable utilisé renferme 14% de filler. Ces fillers auront des impacts sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des matériaux élaborés. Leur quantité reste toujours dans l'intervalle 3-22% exigé par la norme **EN 12620**.

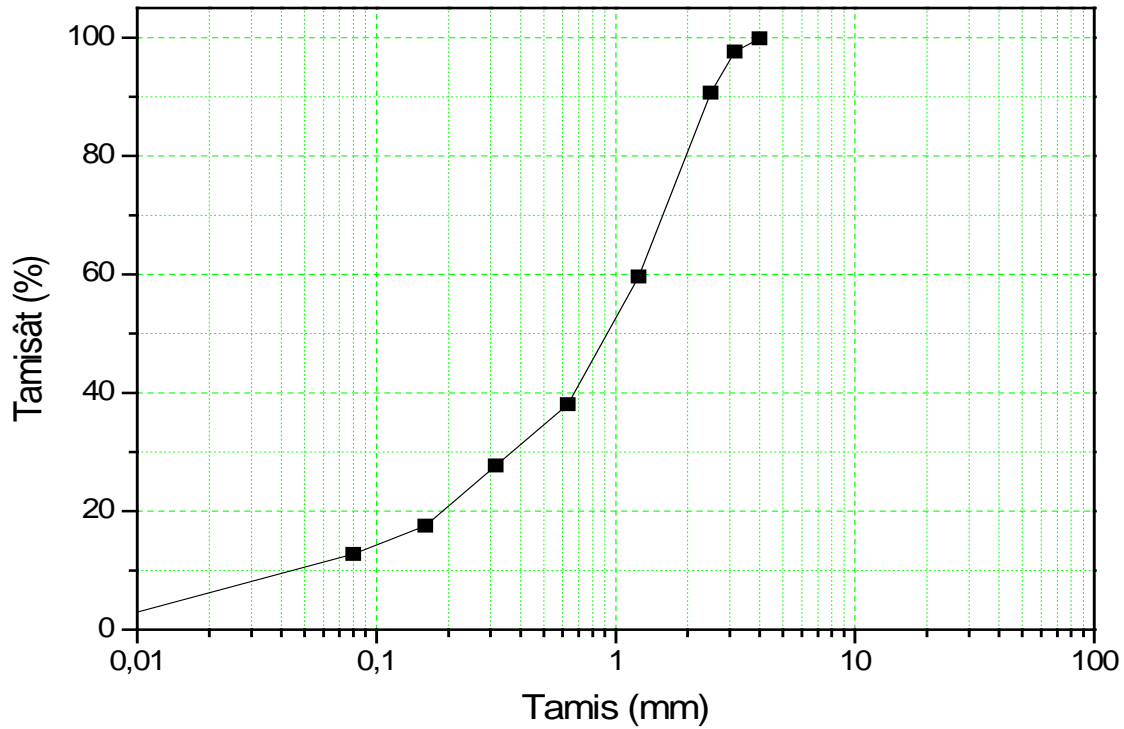


Figure III.1: Courbe granulométrique du sable calcaire

Une analyse de diffraction au rayon X effectuée sur le sable (**figure III. 2**) a permis de déceler la nature des éléments composants le sable calcaire, ils sont en totalité de la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ et quelques éléments de quartz SiO_2 .

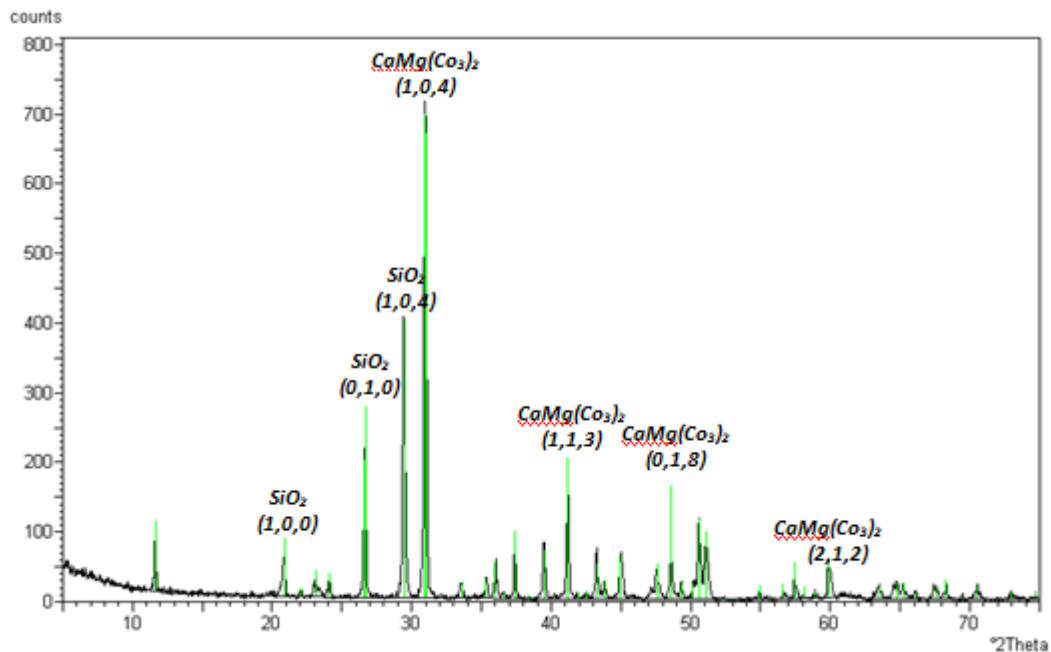


Figure III.2: Diffractogramme du sable calcaire

III.1.2 Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ dont la dénomination est CEM II/B 42,5 R NA 442 selon la nouvelle normalisation algérienne. Les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques du ciment sont présentées dans les tableaux III.2 et III.3.

Tableau III.2 : Caractéristiques chimiques du ciment [Lafarge Algérie]

Analyse chimique		Composition du clinker	
Perte au feu (%)	7.5-12	Silicate tricalcique C3S (%)	58-64
Résidus insolubles (%)	0.7-2	Silicate bicalcique C2S (%)	12-18
Teneur en SO ₃ (%)	2.0-2.7	Aluminate tricalcique C3A(%)	6-8
Teneur en MgO (%)	1.0-2.2	Aliminoferrite tetracalcique C4Af(%)	10-12
Teneur en chlorure (%)	0.01-0.05		
Teneur equivalent alcalis (%)	0.3-0.75		

Tableau III.3: Caractéristiques physico-mécaniques du ciment [Lafarge Algérie]

Caractéristiques physiques		Caractéristiques mécaniques	
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.1	Résistance à 02 jours (MPa)	>10.00
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.4	Résistance à 28 jours (MPa)	>42.5
Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)	4150-5250		
Retrait à 28 jours en µm/m	<1000		

III.1.3 Les granulats de liège

Le liège utilisé dans cette étude est du liège expansé issu des déchets de l'industrie des panneaux de liège de Djijel. Ces déchets sont emballés en sac renfermant une gamme de 0 à 25mm de diamètre. Une opération de tamisage a été menée au laboratoire afin de faire sortir trois gammes de granulométrie à savoir 0/3, 3/8, et 8/15.

Une attention particulière a été consacrée aux méthodes expérimentales de caractérisation des granulats de liège.

III.1.3.1 Granulométrie

La granulométrie est réalisée suivant la norme **NF EN 933-1**. Les tamis utilisés sont conformes à la norme **NF EN 933-2**. Avant de commencer les mesures, les granulats sont séchés dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante. L'état de masse constante est supposé quand la masse de l'échantillon ne varie pas de plus de 0,1% après 1h de séchage. La colonne de tamis remplie de granulats est ensuite agitée sur l'appareil de tamisage.

La masse des refus permet de tracer une courbe granulométrique pour chacun des granulats. La **Figure III-3** présente les courbes granulométriques des granulats de liège pour les trois classes avec celle du sable calcaire.

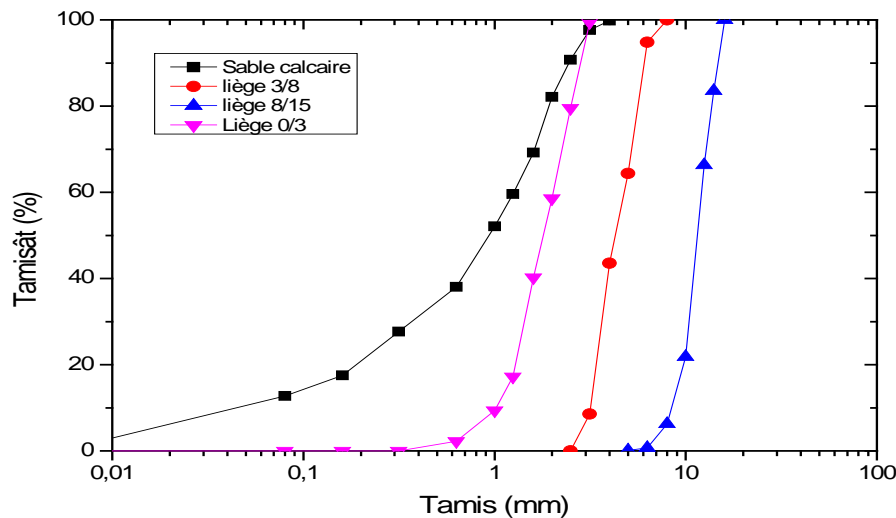


Figure III.3: Courbe granulométrique des granulats de liège.

Les courbes granulométriques des granulats avec le sable montrent une uniformité et une continuité dans l'intervalle 0/15. Pour la granulométrie 0/3, elle comprend 10% de grains de liège dont la taille est inférieure à 1mm, cela aura certainement une influence sur les caractéristiques du béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

III.1.3.2 La masse volumique

La masse volumique d'un granulat léger est une caractéristique fondamentale influençant notablement les caractéristiques mécaniques des granulats et par conséquent les performances du béton.

Différentes masses volumiques peuvent être définies pour les granulats selon le mode opératoire utilisé. On parlera, conformément à la norme EN 1097, de masses volumiques apparente en vrac, réelle et absolue.

➤ Masse volumique en vrac

La masse de granulats légers occupant un récipient donné d'un volume d'un litre selon le mode opératoire de la norme **EN 1097-3** sert à caractériser la masse volumique dite apparente en vrac des granulats ρ_{app} .

Les granulats sont séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Ils sont ensuite versés dans un récipient de 1 litre à une hauteur inférieure à 5 cm jusqu'à ce que le récipient déborde. Suite à cette opération, on enlève l'excédent au sommet du récipient et on nivèle les granulats avec la règle en évitant tout compactage de surface. Les granulats restants ont donc une masse

correspondant au volume du récipient. Nous en déduisons la masse volumique en vrac des granulats. On l'obtient par la relation suivante :

$$\rho_{app} = (M_n - M_0) / V \dots\dots\dots(III-1)$$

où M_0 est la masse du récipient vide, M_n la masse M_0 à laquelle s'ajoute celle de l'échantillon mis en place sans tassement et V le volume du récipient.

➤ **Masse volumique réelle**

La masse volumique réelle des grains est définie comme le rapport de la masse d'un échantillon de granulat sur le volume de ses grains. Le volume des grains est délimité selon la norme **EN 1097-6** par l'enveloppe extérieure du grain, pores compris. Les masses volumiques réelles comprennent la masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve, la masse volumique absolue et la masse volumique réelle saturée surface sèche. La définition de chaque notion est présentée ci-dessous. Les masses volumiques réelles sont déterminées par une seule opération en utilisant la méthode du pycnomètre selon la norme **EN 1097-6**.

Les granulats sont séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Après le séchage, ils sont immergés dans un pycnomètre rempli d'eau. Le pycnomètre est ensuite placé dans un bain d'eau à la température ambiante pendant 24 heures. A la suite de cette période, nous éliminons l'air occlus dans le pycnomètre puis le remplissons à nouveau à ras bord. La masse M_2 du pycnomètre est mesurée après séchage de ses parois extérieures. En pesant le pycnomètre rempli d'eau sans les granulats, nous obtenons la masse M_3 . Les granulats saturés sont ensuite égouttés pendant quelques minutes avant d'être séchés en surface avec des chiffons mouillés pendant 15 secondes au maximum. L'état saturé surface sèche des granulats est atteint lorsqu'on ne voit plus les films d'eau autour des granulats. Ceux-ci gardant toutefois un aspect humide (**Figure III-4**).

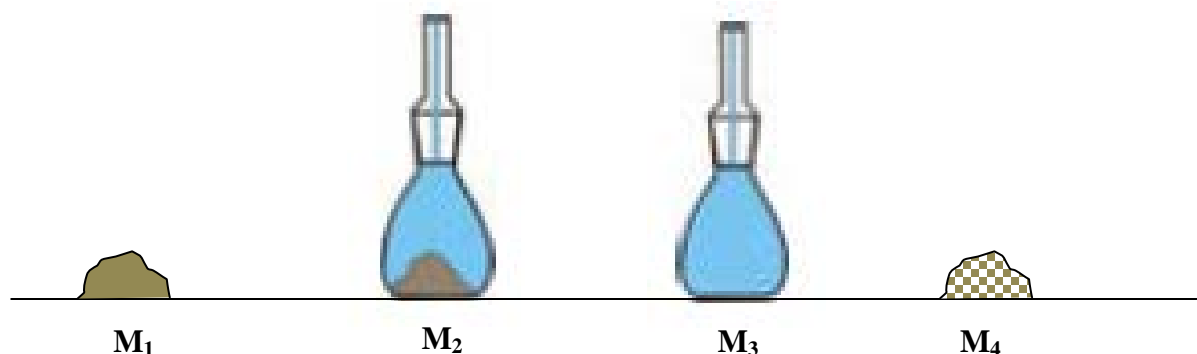


Figure III.4: Schémas de principe de mesure des masses volumiques réelles

Il n'existe pas de norme pour les granulats légers < 4 mm. Nous nous sommes basés sur la norme **EN 1097-6** pour les sables de densité normale en assurant toutefois une saturation de 24h. Les granulats fins sont séchés en surface en utilisant un faible courant d'air chaud venu d'un sèche-cheveux. Un moule tronconique est rempli d'une partie des granulats qui sont tassés légèrement

à 25 reprises à l'aide d'un pilon. L'état saturé surface sèche des granulats fins est atteint dès que le cône s'effondre lorsqu'on soulève le moule.

Lorsque la vérification de l'état hydrométrique est satisfaisante, les granulats sont pesés pour avoir la masse M_1 . Enfin, la masse M_4 est mesurée après le séchage des granulats dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

Les masses volumiques (absolue, réelle et saturée surface sèche) sont déterminées selon les formules dans la norme **NF 1097-6** :

- Masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve : elle correspond au rapport de la masse d'un échantillon de granulats séché en étuve sur le volume total des grains y compris le solide, les pores fermés et ceux accessibles à l'eau.

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_3 - (M_2 - M_1)} \dots \dots \dots \text{(III. 2)}$$

- Masse volumique réelle saturée surface sèche : elle correspond au rapport de la masse d'un échantillon de granulats y compris la masse de l'eau présente dans les pores accessibles à l'eau sur le volume total des grains y compris le solide, les pores fermés et ceux accessibles à l'eau.

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_3 - (M_2 - M_1)} \dots \dots \dots \text{(III. 3)}$$

- Masse volumique absolue : elle correspond au rapport de la masse d'un échantillon de granulats séché en étuve sur le volume qu'il occupe dans l'eau c'est-à-dire le volume du solide et celui des pores fermés.

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_3 - (M_2 - M_4)} \dots \dots \dots \text{(III. 4)}$$



Figure III.5: Mesure de la masse volumique réelle et absolue

Les résultats obtenus pour les différents granulats sont présentés dans le **Tableau III-4** pour chaque masse volumique, la valeur retenue est la moyenne de trois essais différents sont également présentées au Tableau III-1, les valeurs de la porosité intergranulaire P_{inter} pour les différents granulats définie par :

$$P_{inter} = 1 - \rho_{app} / \rho_{rd} \dots \dots \dots (III. 5)$$

Tableau III.4: Résultats de mesure des masses volumiques des granulats de liège

Taille	Masse volumique en vrac $\rho_{app} (kg/m^3)$	Masse volumique réelle $\rho_{rd} (kg/m^3)$	Masse volumique saturée à surface sèche $\rho_{ssd} (kg/m^3)$	Masse volumique absolue $\rho_a (kg/m^3)$	P_{inter}
0/3	104.87	178.98	219.60	363.94	0.41
3/8	71.21	131.28	155.83	288.81	0.46
8/15	74.93	133.03	155.48	277.06	0.44

Les résultats relatifs aux masses volumiques montrent que le liège est un matériau assez léger, d'ailleurs plus légers que le bois. Cette faible masse volumique est beaucoup plus due à la présence des vides à l'intérieur des granulats, cependant nous pouvant remarquer l'évolution des différentes masse volumique en fonction de la taille; effectivement, comme pratiquement tous les granulats la masse volumique augmente lorsque la taille des granulats diminue.

III.1.3.3 Absorption d'eau et porosité

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau d'un granulat permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton. De plus, l'étude du comportement des granulats légers dans l'eau permet de compléter les données sur la porosité issues des mesures de masse volumique.

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après imbibition pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme **NF P 18-555**.

Le coefficient d'absorption W_a est ainsi défini par :

$$W_a = \frac{M_e}{M_s} \times 100\% \dots \dots \dots (III.6)$$

Où M_e désigne la masse de l'eau absorbée et M_s la masse de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C.

les valeurs des coefficients d'absorption et le gain massique en eau du liège selon les trois granulométries sont représentées dans le **tableau III.5**.

Tableau III.5: Valeurs du coefficient d'absorption et du gain massique

	0/3	3/8	8/15
coefficient d'absorption(%)	3.1	2.3	1.4
gain massique (%)	22	16.2	12.5

Afin de suivre l'évolution de l'absorption au cours du temps des mesures de masse sont effectués à des temps de 1,2,3,5,10,20,30mn,1h,2,4,8,12,24,48h.

Une opération inverse est réalisée sur les granulats imbibés dans l'eau afin de mesurer la vitesse de perte massique ou encore la vitesse de l'hydrofuge.

les résultats de ces essais sont représentés sur les **figures III.6 et III.7**

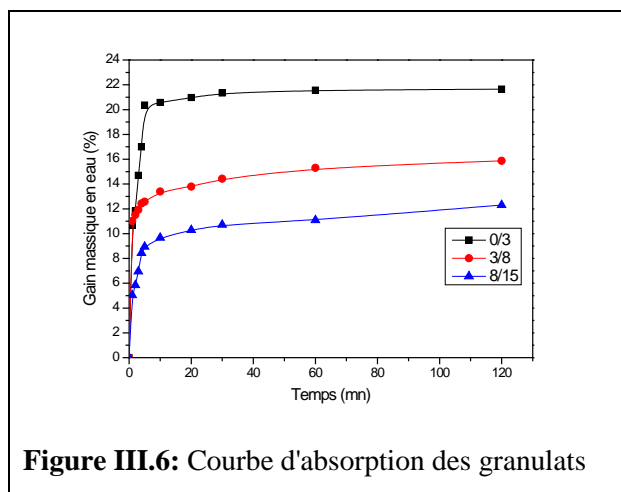


Figure III.6: Courbe d'absorption des granulats

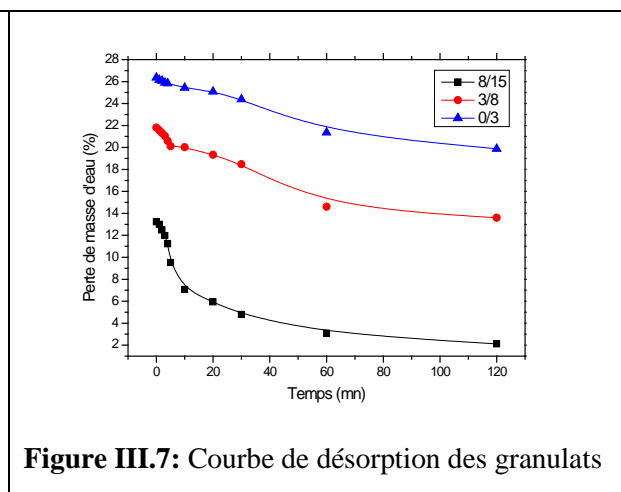


Figure III.7: Courbe de désorption des granulats

L'absorption de l'eau par les granulats est rapide pendant les cinq premières minutes puis elle s'affaiblit et tend à se stabiliser à partir de la première heure. Les granulats 0/3 ont un pouvoir d'absorption le plus important du fait du taux d'éléments fins qu'ils renferment. Plus la taille des granulats est grande plus l'absorption est faible.

pour l'essai de désorption la perte d'eau est beaucoup plus importante pour les granulats 8/15 à cause de leur grande porosité. Plus la taille des granulats est grande et plus la fuite de l'eau est plus importante.

III.1.3.4 Observation au microscope

Le microscope utilisé est un microscope optique ZEISS du laboratoire de biologie, équipé d'un appareil photographique (figure III.8). Le grossissement x40 a été utilisé pour visualiser la surface extérieure du granulat de liège.



Figure III.8: Microscope optique



Figure III.9: Photo d'un granulat de liège X40

La photo de la **figure III.9** montre que la surface externe des granulats de liège est très rugueuse et présentant des ouvertures profondes. Cette structure explique le pouvoir absorbant d'eau des granulats de liège et elle pourra contribuer à une bonne adhérence entre le granulat et la matrice.

III. 1.3.5. Analyse chimique

Une analyse à la spectroscopie infrarouge a été réalisée au laboratoire de recherche IMAP à Amiens en France sur des granulats de liège naturel et du liège expansé. Le résultat de cette analyse est représenté sur le spectre IR de la **figure III.10**.

La spectroscopie infrarouge donne des informations sur les différents groupes fonctionnels et les liaisons chimiques qui sont présentes dans un matériau basé sur leur absorbance spécifique de vibrations énergie. La spectroscopie FT-IR a été de plus en plus utilisée pour détecter les fonctionnalités groupes dans des matériaux ligno-cellulosiques et aussi quantifiée des composants spécifiques. **Le tableau III.6** présente les différentes bandes liées aux vibrations des groupe CH₂ et OH se trouvant dans la cellulose et la subérines.

En se référant au **tableau III.6** et la **figure III.10** on retrouve la bande d'absorption 1159.52 cm⁻¹ relative au groupement CH₂ présent dans la cellulose pour le liège naturel. Nous pouvons constater aussi l'existence de la bande 1463,91 cm⁻¹ qui représente la vibration des groupement OH se trouvant dans la cellulose.

les groupements CH₂ et OH réapparaissent au niveau des bandes 1714.32 cm⁻¹ et 1732.08 cm⁻¹. L'effet du procédé d'expansion du liège est très lisible. En effet les intensités au niveau des pics relatifs au groupement OH et CH₂ dans le cas du liège expansé sont très faibles. Cela s'explique par la diminution du taux de cellulose dans le liège expansé.

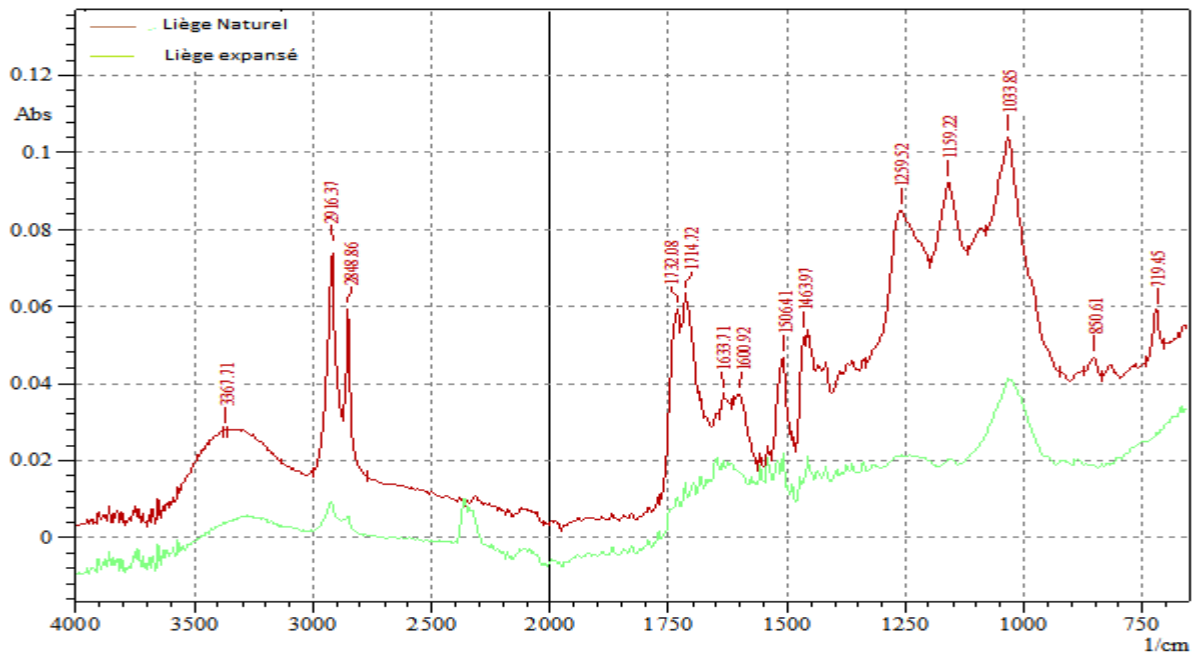


Figure III.10: Spectre infrarouge du liège

Tableau III.6: Affectations des bandes d'absorption et du groupement fonctionnel aux principaux composés de liège (Cristina et al.,2006)

Interval (nm)	Peak (nm)	Functional grouping	Structure	Cork compound	
1158–1338	1215	—CH	Second overtone	—CH ₂ group	Cellulose
1424–1612	1450	—OH	First overtone and combination bands	—OH group	
1718–1822	1730	—CH	First overtone	—CH ₂ group	Cellulose
1882–1960	1930	—OH	First overtone and combination bands	—OH group	
1960–2152	2146	—CH	Combination bands	—CH and C=O	Suberin Cellulose
2308–2500	2310	—CH	Combination bands of asymmetric and symmetric stretch	—CH and —CH ₂	
	2354	—CH			

III-1.3.6 Caractérisation mécanique

Des essais mécaniques ont été réalisés sur une presse de traction compression équipée d'une cellule de charge de 10 kN (**figure III.11**), répondant à l'exigence de la norme **EN 932-5** et assisté par micro sous logiciel Tapezium. Pour cela des coupes d'échantillons sont réalisés sur des panneaux de liège expansé. Les essais de flexion sont réalisés sur des éprouvettes 4x4x16cm³. Les deux parties restantes sont soumises à la compression. Des exemples des résultats obtenus sont représentés sur les **figures III-13 et III-14**. Ils montrent une importante élasticité du liège en particulier en compression. Les déformations sont très importantes

atteignant les 90% et les valeurs des résistances en flexion et compression atteignent respectivement **0.15MPa** et **3.61MPa**. Les modules de Young sont respectivement de l'ordre de **0.92** et **0.66 MPa** en flexion et compression. On peut remarquer que le module de Young en flexion est nettement supérieur à celui observé en compression. Ceci peut s'expliquer par la grande élasticité du liège et le taux de déformation très importante en compression. Ces résultats sont presque analogues à ceux de plusieurs études réalisées sur le liège (**Lakreb 2015; Lagorce-Tachon 2015; Costa, et al 2003**). La **figure III.12** montre le dispositif de l'essai de résistance à la traction du fil. Les résultats obtenus affichent une moyenne de **0.033MPa**.



Figure III.11: Photo de la presse universelle traction compression Modèle AG-X

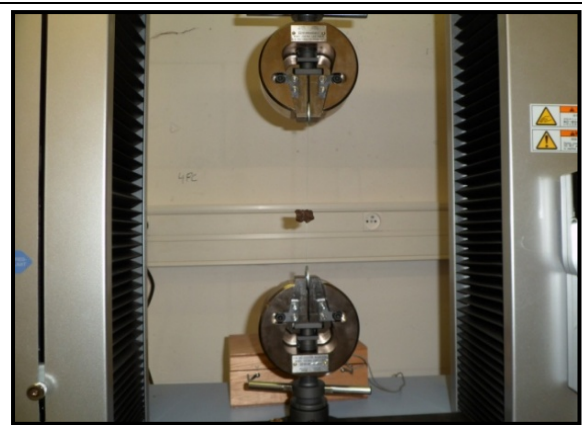


Figure III.12: Dispositif de traction au fil

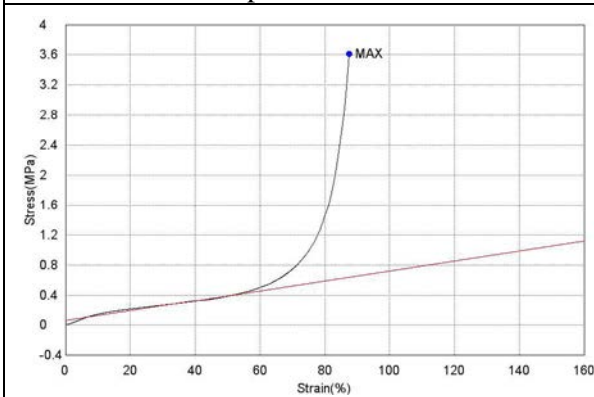


Figure III.13: Evolution de la résistance en compression en fonction de la déformation

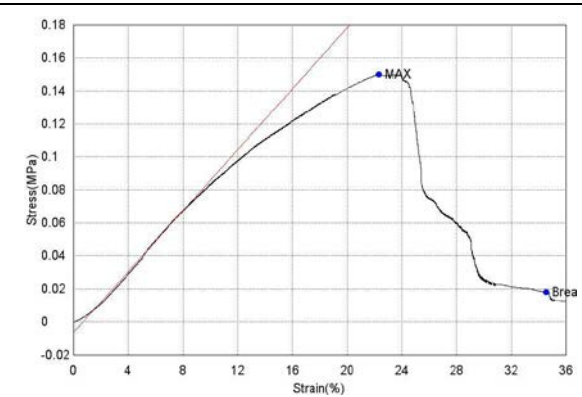


Figure III.14 : Evolution de la contrainte en flexion en fonction de la déformation

III.1.4 Les adjuvants

Les travaux récents réalisés sur les bétons de liège ont permis de relever les difficultés de formuler une composition à base cimentaire incorporant des Granulats de liège. C'est le cas pour des travaux réalisés sur les mortiers (**Contant, 2001; Ho, 2010**). Il s'est avéré que les adjuvants qui occupent une place de choix dans la formulation de bétons ordinaires jouent un rôle prépondérant lorsqu'il s'agit de bétons incorporant des granulats de liège (**El Bakkouri et al., 2005; Jalali et al., 2005**). En effet, ces inclusions sont particulièrement préjudiciables vis-à-vis de la maniabilité et ils sont très sensibles à la ségrégation présentant une fâcheuse tendance à

remonter à la surface supérieure du volume du béton. Pour corriger ce double défaut nous avons eu recours à un superplastifiant du type SP 40.

III.2. Formulation et élaboration des bétons calcaires légers

La plupart des bétons légers, notamment les bétons légers de structure sont formulés de la même manière que les bétons classiques. Les critères recherchés dans les méthodes de formulation sont généralement la résistance et la maniabilité (De Larrard, 2000; Dreux et Festa, 1998; Chamoin, 2013). Par contre, pour les bétons légers de construction et d'isolation, un compromis entre la résistance et les performances physiques et thermiques doit être optimisé lors de la formulation, c'est le cas des bétons de liège élaborés dans ce travail.

III.2.1 Formulation des bétons calcaires

III.2.1.1 Formulation du mortier témoin

Ce béton est un béton dépourvu de granulats, il est composé essentiellement de ciment, de sable et éventuellement de l'eau.

- Dosage en ciment

Comme il a été cité auparavant pour l'élaboration d'un mortier normalisé, nous avons choisi un rapport C/S=1/3, ce dosage sera fixé pour tous les échantillons élaborés.

- Optimisation du dosage en eau :

Pour un dosage en ciment C/S=1/3, on a procédé à la confection d'une série d'éprouvettes 10x10x10 cm³ en faisant varier le rapport E/C d'une valeur minimale de 0.35 à une valeur maximal de 0.65. Après 28 jours on soumet ces différents échantillons à l'essai d'écrasement par compression. Le pourcentage d'eau optimum est celui qui fournit la résistance à la compression maximale.

Les résultats des résistances des mortiers pour les différents dosages en eau sont représentés dans le **tableau III-7**.

Tableau III.7: Valeurs de la résistance en compression en fonction du rapport E/C

Dosage en eau (E/C)	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
Résistance à la compression (MPa)	9	14	18	21.2	24	25.3	23.5

Les variations de la résistance à 28 jours en fonction du rapport E/C sont représentées sur la **figure III.15**.

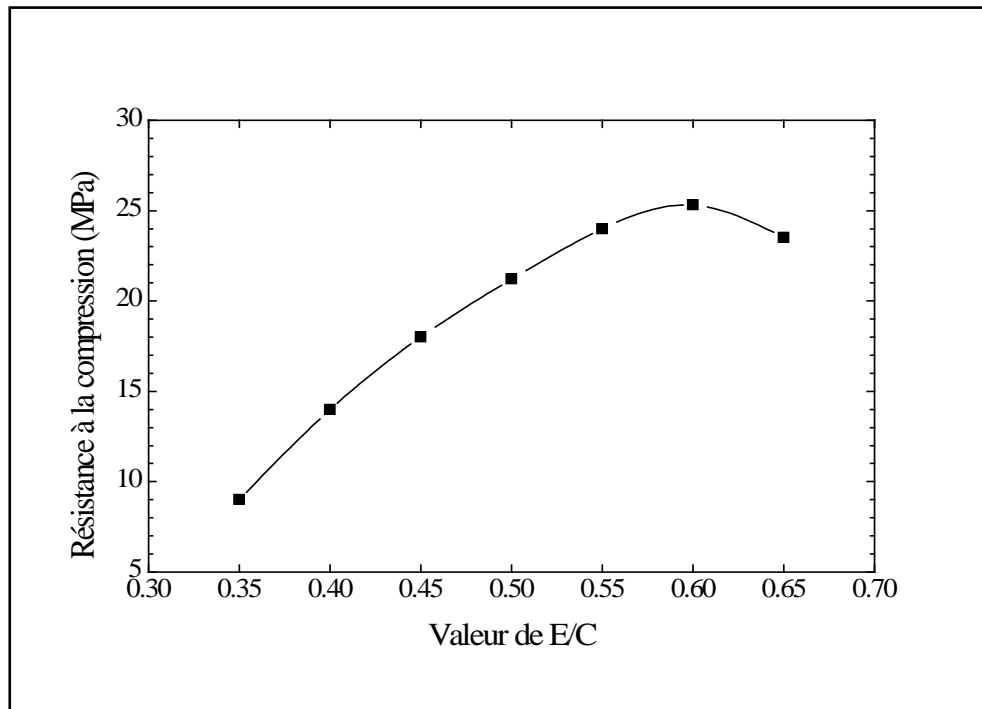


Figure III.15: Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C

D'après les résultats obtenus, on voit que l'optimum des résistances correspond à un rapport E/C=0.6. Ce rapport est maintenu pour déterminer la quantité de l'eau de gâchage des bétons élaborés.

III.2.1.2 Formulation des bétons élaborés

En général et en se référant à plusieurs travaux dans le domaine des bétons légers, le principe de formulation des bétons léger est basé sur la substitution d'une proportion de granulats rigides par une même proportion de granulats légers (Amoroso et Bacatselos, 1979; Vaquier et al., 1977; Magniont et al., 2011; Kan et Demirboğa, 2009; Hernández-Olivares et al., 1999) D'autre travaux comme (Sotehi, 2010; Contant, 2001) substituent une partie de la matrice par une même proportion de granulats légers. Dans notre cas nous avons opté pour la deuxième méthode car dans cette méthode le dosage en ciment est gardé constant c'est-à-dire que C/S=1/3 pour tous les échantillons de bétons élaborés dans cette étude.

❖ Proportions et dimensions des granulats employées :

Cette étude est divisée en deux parties :

✓ La première partie est consacrée à une étude de faisabilité des bétons calcaires allégés par les granulats de liège. Dans cette partie une seule dimension de granulats de liège est utilisée, il s'agit de la granulométrie 3/8. Avec des proportions de substitution ascendantes de 20% à 70% par pas de 10. Le but de cette partie d'étude est de voir si l'utilisation des granulats de liège est bénéfique en termes de mise en œuvre, de maniabilité, de résistance, d'isolation..., etc. La

composition des bétons de granulats de liège relative à cette partie est représentée dans le tableau ci-dessous :

On désignera par BCLLx ; Béton Calcaire Léger de Liège, x désigne le pourcentage de liège, il varie de 0 à 70%.

G/M désigne le rapport volumique des granulats de liège par rapport à la matrice

Tableau III.8 Composition des bétons allégés avec des granulats de liège 3/8

Séries	G/M (%)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Eau utile (litres)
BCLL0	0	0	1380	460	276
BCLL20	20	29,30	1098,4	366,12	219,67
BCLL30	30	43,95	961,07	320,35	192,21
BCLL40	40	58,60	823,77	274,60	164,75
BCLL50	50	73,25	686,48	228,82	137,29
BCLL60	60	87,90	549,18	183,06	109,83
BCLL70	70	102,55	411,89	137,29	82,38

✓ La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'effet de taille des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des matériaux élaborés. A cet effet trois classes granulaires sont utilisées : 0/3, 3/8, et 8/15.

Nous avons remarqué dans la première partie qu'il avait une très grande difficulté lors de l'élaboration des bétons et leur mise en moule. L'emploi dans la deuxième partie d'un super plastifiant s'avère indispensable.

Les compositions des bétons élaborés dans la deuxième partie sont représentées dans les **tableaux III.9,10,11.**

Tableau III.9: Composition des bétons allégés par les granulats de liège de classe 0/3

Série	G/S (%)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Eau utile (litres)	Super plastifiant (kg)
Série 0	0	0	1380	460	276	0
Série 1	20	41,8	1104,1	368,0372	220,8223	1,84
Série 2	30	62,7	966,1	322,0325	193,2195	3,22
Série 3	40	83,61	828,08	276,0279	165,6167	4,14
Série 4	50	104,509	690,07	230,0232	138,0139	5.75
Série 5	60	125,41	552,06	184,0186	110,4112	5.52

Tableau III.10: Composition des bétons allégés par les granulats de liège de classe 3/8

Série	G/S (%)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Eau utile (litres)	Super plastifiant (kg)
Série 0	0	0	1380	460	276	0
Série 1	20	29,2994	1098,4	366,1212	219,6727	1,831
Série 2	30	43,94909	961,07	320,356	192,2136	3,204
Série 3	40	58,59879	823,77	274,5909	164,7545	4,119
Série 4	50	73,24849	686,48	228,8257	137,2954	5,72
Série 5	60	87,89819	549,18	183,0606	109,8364	5,49

Tableau III.11: Compositions des bétons allégés par les granulats de liège de classe 8/15

Série	G/S (%)	Granulats (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Eau utile (litres)	Super plastifiant (kg)
Série 0	0	0	1380	460	276	0
Série 1	20	29,3	1098,4	366,1212	219,6727	1,831
Série 2	30	43,95	961,07	320,356	192,2136	3,204
Série 3	40	58,6	823,77	274,5909	164,7545	4,119
Série 4	50	75,25	686,48	228,8257	137,2954	5,72
Série 5	60	87,9	549,18	183,0606	109,8364	5,49

III.2.2 Techniques de fabrication

Cette section regroupe toutes les étapes complémentaires à la réalisation des essais que se soit le conditionnement des matériaux, le malaxage, la consolidation ou le mûrissement des éprouvettes.

III.2.2.1 Préparation des matériaux

En général, deux procédés sont utilisés quant à la préparation des granulats. Certains auteurs utilisent les granulats secs et réalisent un malaxage à sec de tous les composants du matériau; il faut juste ajouter la quantité d'eau qui sera absorbée par les granulats pendant le malaxage. D'autres réalisent un pré-mouillage des granulats. Cette deuxième méthode s'avère très bénéfique en matière de facilité de malaxage puisque le problème majeur l'hors du malaxage des bétons de granulats légers est l'homogénéité du fait de la légèreté des granulats. Il faut noter que les granulats sont pré-mouillés 48 heures dans l'eau au préalable afin d'éviter l'absorption

d'une partie de l'eau de gâchage par les granulats de liège, puis ils sont égouttés sur tamis ou sur un morceau de tissu pendant 4mn (**Figure III.16**).



Figure III.16: Egouttage de granulats de liège

Entre temps, le sable et le ciment sont malaxés à sec pendant 1mn, puis on ajout les 2/3 de la quantité d'eau et on laisse malaxer pendant deux autres minutes. On rajoute ensuite le tiers restant de la quantité d'eau avec du super plastifiant dilué dedans et on laisse malaxer pendant une minute. Enfin on rajoute par partie pendant 2 minutes la quantité de granulats nécessaire.

Le choix des dimensions du moule est fixé par la norme **NF P.18-400**. Il doit satisfaire le critère de l'échelle de volume représentatif, stipulant ainsi que la plus petite dimension du moule doit être largement supérieure à la dimension du plus gros granulats. De plus, les dimensions permettent de réaliser les essais de caractérisation recherchés. Pour la caractérisation physico-mécanique des bétons élaborés dans ce travail, quatre types de moule ont été choisis pour réaliser les essais. Il s'agit des moules prismatiques 4x4x16cm et 7x7x28cm³, des moules cubiques 10x10x10 cm³ et des moules cylindriques de dimensions $\varnothing 10 \times 20$ cm, (**figure III.17**).

La mise en moule est faite sans vibration à raison de quatre couches damées à 25 coups chacune et cela afin d'éviter tout problème de ségrégation affectant l'homogénéisation des échantillons.



Figure III.17: Confection des éprouvettes de béton de liège

Afin d'étudier l'apport de l'environnement de cure sur les caractéristiques physicomécaniques, les éprouvettes confectionnées sont conservées dans deux environnements différents:

- Les conditions ambiantes du laboratoire, désigné par l'environnement 1 (ENV 1).
- Une cure par immersion dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, désignée par l'environnement 2 (ENV 2).



Figure III.18: Photo d'éprouvettes de béton de liège

III.3 Techniques expérimentales

Dans cette partie de ce chapitre, nous allons décrire les principales techniques expérimentales utilisées pour l'identification des différentes caractéristiques des composites étudiés.

III.3.1 Essais réalisés sur le béton frais

Durant les opérations de malaxage, l'affaissement au cône d'Abrams et la masse volumique sont déterminées pour chaque gâchée. On utilise la valeur de la masse volumique pour éventuellement corriger les proportions des mélanges effectivement réalisés. La mesure de l'affaissement permet de contrôler l'ouvrabilité. Les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams finalement obtenues (Aff) selon la norme française **NF EN 12350-2** ainsi que les valeurs de masse volumique du béton frais (M_V).

III.3.2 Caractérisation physico-mécanique des bétons élaborés

III.3.2.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente (ρ) est définie comme étant le rapport de la masse de l'échantillon (M) à son volume apparent sec (V). La masse est déterminée par pesée à 0,01g près après avoir séché l'échantillon à l'étuve jusqu'à masse constante selon la norme **EN 12390-7**.

III.3.2.2 Variations dimensionnelles

L'essai est réalisé selon la norme **NFP 15-433** sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. La mesure du retrait est effectuée à l'aide d'un rétractomètre muni d'un comparateur digital de division 10^{-3} (**figure III.19**). Après démoulage les éprouvettes munies de plots à leurs extrémités sont placées en position verticale sur le rétractomètre et on initialise le comparateur à la valeur zéro à l'aide

d'une tige étalant. Après cela, les lectures sont effectuées au cours du temps à des intervalles de deux jours. Les dernières lectures sont prises à l'âge de 40 jours puisqu'on estime qu'au delà de cet âge les variations dimensionnelles se stabilisent.

III.3.2.3 Mesure de Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est une mesure qui renseigne sur la porosité ouverte d'un béton. Elle n'apporte en revanche aucune information sur les tailles de porosités comme c'est le cas du porosimètre à mercure ou de la méthode BET . Elle est déterminée selon la norme **NF EN 18-459** dont le principe repose sur la méthode par pesée hydrostatique après saturation sous vide.

L'essai de porosité accessible est réalisé à l'aide du dispositif schématisé sur **la figure III-20**.



Figure III.19: Rétractomètre



Figure III.20: Photo de l'appareil de mesure de la porosité

Les échantillons à analyser sont préalablement séchés à 105°C pendant 48h. Une pesée à la sortie de l'étuve permet d'obtenir la masse sèche m_{sec} . Ils sont ensuite placés dans un dessiccateur relié à une pompe à vide et à un bac contenant de l'eau (**Figure III.20**). Une pression de 25mbar est appliquée pendant 4 heures, le robinet du circuit d'eau étant maintenu fermé. Une fois le dégazage terminé, le robinet d'eau est ouvert afin de recouvrir les éprouvettes, toujours sous pression, de 2 centimètres d'eau environ et le vide est conservé pendant 24h supplémentaires. Lorsque les échantillons sont retirés du dessiccateur, ils sont pesés après être essuyés de l'extérieur avec un chiffon. Le rapport de la différence entre la masse humide et la masse sec sur le volume de l'éprouvette nous donne la porosité de l'échantillon.

III.3.2.4 Résistances mécaniques

❖ Résistance à la compression

La résistance à la rupture en compression est déterminée selon la norme **EN 12390-3** à partir des essais destructifs de compression uniaxiale effectués sur trois éprouvettes cubiques 10x10x10 cm³. La machine utilisée est une presse hydraulique de charge maximale 300 kN. L'acquisition et le pilotage sont gérés par un ordinateur muni d'un logiciel de commande qui traite tous les résultats (**Figure III-22**).

La vitesse de chargement est préalablement réglée de telle sorte que la rupture surviendra dans au moins 30 secondes après le contact du plateau de la presse avec la surface horizontale de l'éprouvette (recommandations de RILEM). La section de l'éprouvette étant introduite, l'appareil affiche automatiquement la charge de rupture F_C (kN).

❖ Résistance à la flexion

Les éprouvettes 7x7x28 cm³ sont soumises à un essai de flexion trois (3) points (**Figure III.21**). la même presse hydraulique est utilisée (**Figure III.23**). Les éprouvettes curées dans la salle sont directement écrasées, celles curées dans l'eau sont asséchées à l'étuve Pendant 24 heures avant écrasement.

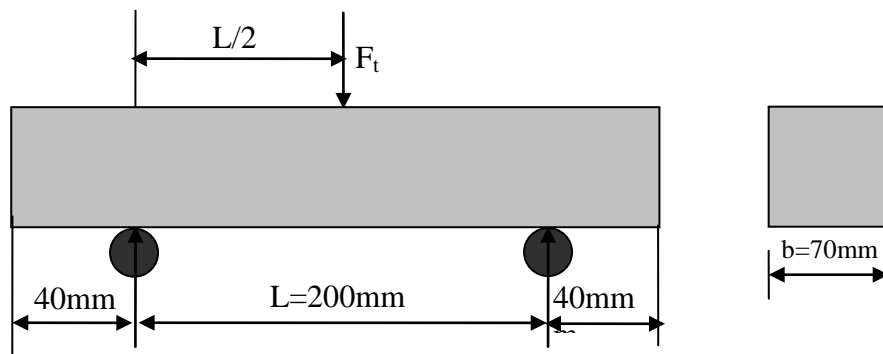


Figure III.21: Schémas de l'essai de flexion

La vitesse de chargement a été réglée à $0,05 \pm 0,01$ MPa /seconde jusqu'à la rupture selon la norme **NFP 18-407**. La charge à la rupture est lue sur le cadran de la presse et la résistance à la compression est calculée par relation :

Si F_t est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion, le moment de rupture vaut

$F_t L/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_t = \frac{1.5F_t L}{b^3} \dots \dots \dots \text{(III. 7)}$$

En remplaçant L et b par leurs valeurs on obtient :

$$R_t = 0.234F_t \dots \dots \dots \text{(III. 8)}$$



Figure III.22: Essai de compression

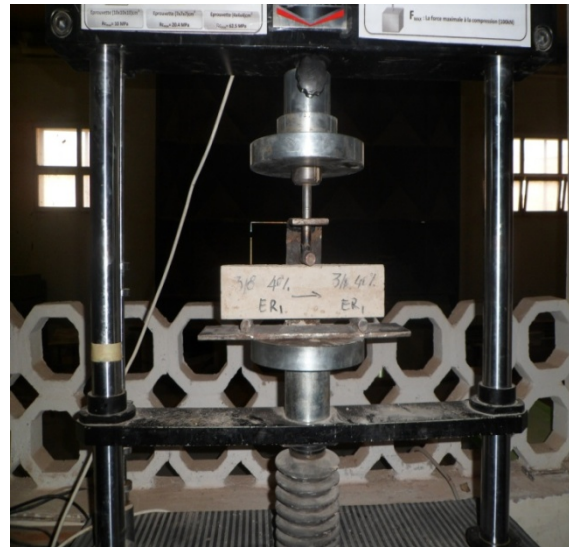


Figure III.23: Essai de flexion trois points

❖ module d'élasticité

Le module élastique des bétons est mesuré sur trois éprouvettes cylindriques $\varnothing 10 \times 20$ cm lors des essais de compression simple réalisés avec console du type AUTOMAX SMART-line équipée d'un bâtis de flexion-compression (**figure III.24**).

Le module de Young est obtenu à partir des déformations mesurées par des jauges de déformations (extensométriques) collées à la surface d'éprouvettes soumises à une compression uniaxiale. Cette méthode est conçue à la base pour les mesures des propriétés mécaniques des matériaux solides.

Les jauges de déformation sont reliées directement à un pont d'extensomètre type Geodatalog serie 6000 qui mesure directement la variation de déformations. Les mesures des contraintes sont calculées avec le système de contrôle et de commande DIGIMAX SMART-line sur laquelle est monté un capteur de déplacement (LVDT) de course maximale 2 mm permettant de mesurer la flèche vraie de l'éprouvette. L'essai est asservi à cette flèche à la vitesse de déplacement imposée de 0,05 mm/min. Afin d'accélérer l'essai, cette vitesse est portée à 0,5 mm/min une fois le pic de charge passé. Les résultats de l'essai; la force et la flèche sont enregistrées par un système d'acquisition de données à raison d'un point par 0,1 seconde.



Figure III.24: Dispositif de mesure du module d'élasticité

III.3.2.5 Méthode de détermination des paramètres thermiques

Les caractéristiques thermiques des matériaux élaborés ont été déterminées à l'aide de l'analyseur thermique Hot Disk TPS (**figure III.25**) développée par la société suédoise HOT DISK AB. Le Hot Disk est un dispositif de caractérisation thermique fonctionnant sur le principe de la Technologie TPS. Il effectue des mesures précises de conductivité, de diffusivité et de capacité thermique en une seule manipulation. Le Hot Disk Instrument idéal pour des mesures rapides et fiables de conductivité thermique et diffusivité thermique.

La méthode régie par la Norme Internationale **ISO 22007-2**, est basée sur l'utilisation d'un capteur plan transitoire dont l'adaptation est l'analyseur de conductivité thermique et diffusivité thermique Hot Disk. La sonde Hot Disk se compose d'un motif conducteur électrique qui se présente sous la forme d'une double spirale en Nickel sérigraphie sur des feuilles minces d'un matériau isolant (Kapton ou Mica) (**figure III.26**).

Le principe de base du système est de fournir au matériau une puissance constante pendant un temps défini via la **sonde Hot Disk** et cela afin de générer une augmentation de température de un à plusieurs degrés. C'est également la sonde qui est utilisée pour mesurer l'élévation de température grâce à l'enregistrement de la variation de sa résistance électrique via un pont de Wheatstone très précis. La **sonde Hot Disk** est donc utilisée à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température.

Pour effectuer une mesure de conductivité thermique ou diffusivité thermique, la sonde Hot Disk doit être placée entre deux échantillons du matériau à caractériser (**figure III.27**). Une légère pression mécanique est appliquée sur l'ensemble dans le but d'améliorer le contact mécanique entre les surfaces de la sonde et celles de l'échantillon diminuant ainsi l'effet des résistances thermiques de contact. Les paramètres thermiques sont ensuite calculés par un logiciel.



Figure III. 25: Dispositif de l'analyseur thermique Hot Disk TPS



Figure III.26: Photo de La sonde TPS



Figure III.27: Photo de sonde TPS entre deux échantillons

Partie III:

Résultats et discussion

Dans cette partie qui constitue en fait l'essentiel de cette thèse, nous présentons l'ensemble des résultats obtenus par des mesures effectuées sur les bétons de calcaire élaborés (caractéristiques physiques des bétons à l'état frais, caractéristiques physico-mécaniques et caractéristiques thermiques à l'état durci).

Le premier volé de cette partie est consacré aux résultats des essais relatifs à l'étude de faisabilité des bétons calcaires allégés par les granulats de liège 3/8. Dans ce volé une étude des caractéristiques physico-mécaniques et thermiques nous permettra de déceler tous les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation du liège comme procédé d'allègement et d'en tirer les recommandations pour la mise en œuvre et l'exploitation des BCLL.

Notre intérêt s'est porté particulièrement sur l'influence de la teneur en granulats de liège sur les paramètres cités antérieurement. Les interprétations vont principalement être axées sur la conductivité et la résistance thermique et complétées par une étude thermomécanique. Ce volé sera clôturé par une étude de compatibilité élastique entre la matrice et les granulats et d'une étude de modélisation du comportement mécanique du béton calcaire allégé par les granulats de liège.

Le deuxième volet sera consacré à l'étude de l'effet de taille des granulats sur les paramètres de mise en œuvre et sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons calcaires élaborés. Une analyse, sur la base d'une étude de comparaison des trois types de bétons élaborés avec les trois dimensions de granulats sera établie.

Chapitre IV:

Etude de la faisabilité du béton

de liège

IV.1 Caractéristiques du béton frais

IV.1.1 Etude de la maniabilité

Les résultats de la variation de l'affaissement du béton élaboré en fonction du pourcentage en granulats de liège sont représentés dans la **figure IV.1**. Les résultats obtenus montrent que l'affaissement décroît au fur et à mesure qu'on rajoute les granulats. Ce phénomène est pratiquement observé avec tous les bétons légers et même avec les bétons classiques. A partir de 60%, l'affaissement est quasiment nul. Ajouté à cela la mise en œuvre est de plus en plus difficile pour des dosages élevés en granulats malgré la technique adoptée dans l'élaboration du composite. Afin de palier à ce problème, il est recommandé d'utiliser un superplastifiant.

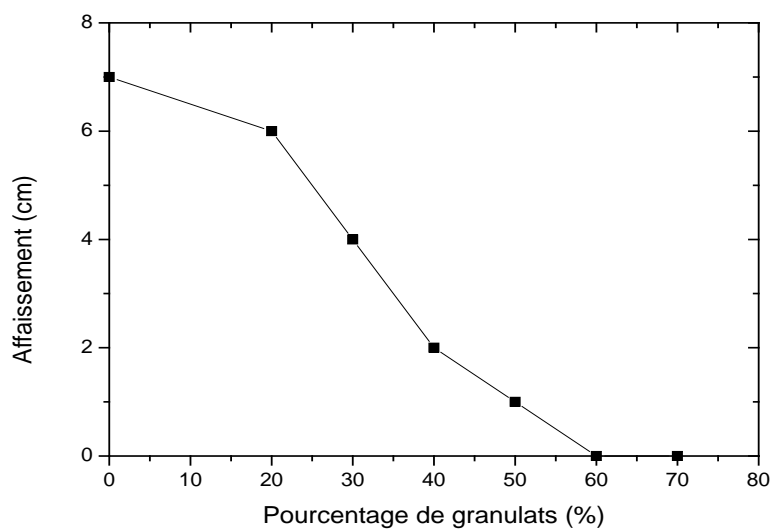


Figure IV.1: Evolution de l'affaissement du béton de liège en fonction du dosage en granulats

IV.1.2 Masse volumique à l'état frais

La masse volumique à l'état frais est mesurée à l'aide du moule $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Après avoir rempli le moule et araser au nombre de trois, ils sont pesés sur une balance de précision de 0.1g. La masse volumique apparente du béton à l'état frais est le rapport du poids de la matière sur le volume du moule c.a.d 1000 cm^3 .

La variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage en granulats légers est représentée dans la **figure IV-2**.

La **Figure IV-2** montre que, dans les limites du taux maximum de substitution étudié de 70% du volume absolu de la matrice remplacée par des granulats de liège, la variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution en G.L. peut être décrite par une fonction linéaire.

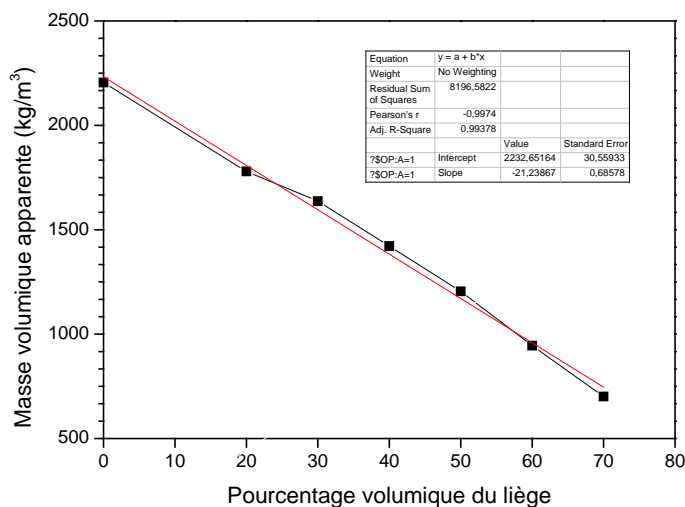


Figure IV.2: Variation de la masse volumique du béton de liège à l'état frais en fonction du dosage en granulats

IV.2 Caractéristiques du béton durci

IV.2.1 Caractéristiques physiques

IV.2.1.1 Masse volumique

Les masses volumiques apparentes du béton à l'état durci ont été déterminées par pesée à l'âge de 28 jours après séchage à l'étuve à 60°C jusqu'à masse constante. Les dimensions des éprouvettes sont mesurées afin de calculer le volume de l'éprouvette. Toutes les mesures sont effectuées au nombre de trois et la valeur prise est la moyenne des trois essais. Les variations de la masse volumique en fonction du taux d'incorporation des granulats de liège sont représentées dans la **figure IV.3**. Elle montre que la densité du béton élaboré diminue avec l'augmentation de la teneur en liège, comme il a été prévisible avec la substitution d'une partie de la matrice par son équivalent en matériau moins dense. Cela a été remarqué par plusieurs auteurs (**Brás et al., 2013; Ke, 2008**). La densité varie de **1.980** à **0.59** pour une teneur en granulats de liège allant de 0% (mortier de référence) à 70% ; ce qui correspond à un allègement de l'ordre de **70%**. Notons que le dosage minimum de liège correspondant à 20% procure un allègement de **18%** par rapport au béton témoin.

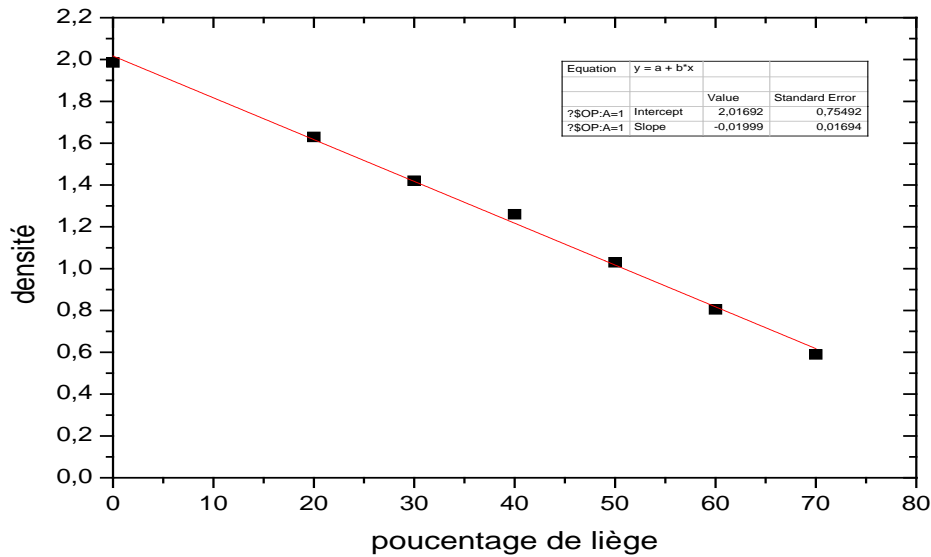


Figure IV.3: Variation de la masse volumique du béton de liège à l'état durci en fonction du dosage en granulats

IV.2.1.2 Variations dimensionnelles

➤ Evolution du retrait en fonction du temps

Pour chaque formulation testée, nous avons mesuré les variations dimensionnelles de trois éprouvettes prismatiques de dimension 70x70x280 mm³. Les éprouvettes sont démoulées 24 heures après le coulage et sont conservées sans aucune protection. Les échanges hydriques avec le milieu ambiant sont autorisés.

Les variations du retrait des BCLL en fonction de l'âge sont représentées sur la figure IV.4

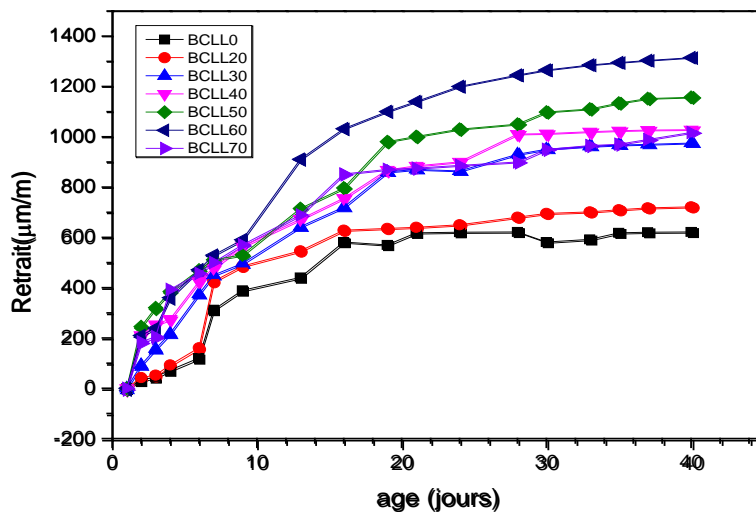


Figure IV.4: Variation du retrait en fonction de l'âge

A travers l'allure des courbes on constate une évolution ascendante du retrait au cours des premiers jours puis ces valeurs se stabilisent au delà de 21j.

➤ **Evolution du retrait en fonction du dosage en granulats**

En se référant à la courbe de la **figure IV.5** représentant l'évolution du retrait en fonction du pourcentage d'incorporation des granulats de liège, nous pouvons dire que le retrait augmente en fonction du dosage en granulats. Autrement dit plus le dosage augmente plus le composite est moins rigide et plus sa rétraction est plus facile. Cette influence de la rigidité sur le retrait peut être expliquée par les conclusions très anciennes de Reichard (**Reichard, 1964**) qui a démontré la corrélation entre le retrait de séchage et le module d'élasticité du béton, qui dépend lui-même de la rigidité du granulat employé. En effet, au cours du retrait, la matrice cimentaire étant mise en traction, les granulats s'opposent à la déformation de retrait en fonction de leur module de déformation en compression. La faible rigidité des granulats de liège est certainement un facteur important qui influe sur les variations dimensionnelles de retrait des BCLL. Au delà de 60%, le retrait diminue et cela s'explique par le fait qu'il y a très peu de matrice qui fait que le composite ne peut plus se rétracter.

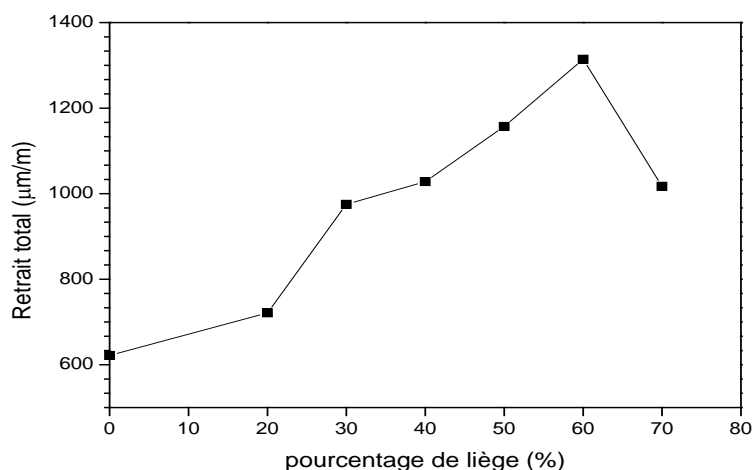


Figure IV.5: Variation du retrait en fonction du dosage en granulats

IV.2.1.3 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre très important qui préfigure le comportement du matériau élaboré vis-à-vis de sa durabilité. La **figure IV.6** montre l'évolution de la porosité accessible à l'eau en fonction du dosage en granulats. La porosité totale des bétons de liège est très influencée par le dosage à cause de la grande porosité des granulats de liège. En effet, elle passe d'une valeur de **20%** pour le béton témoin pour atteindre une valeur de **49%** pour le dosage maximum en granulats de liège avec un taux d'augmentation de **145%**. La porosité ouverte des granulats joue le rôle d'entraîneur d'air et confère au béton la capacité de résistance au gel.

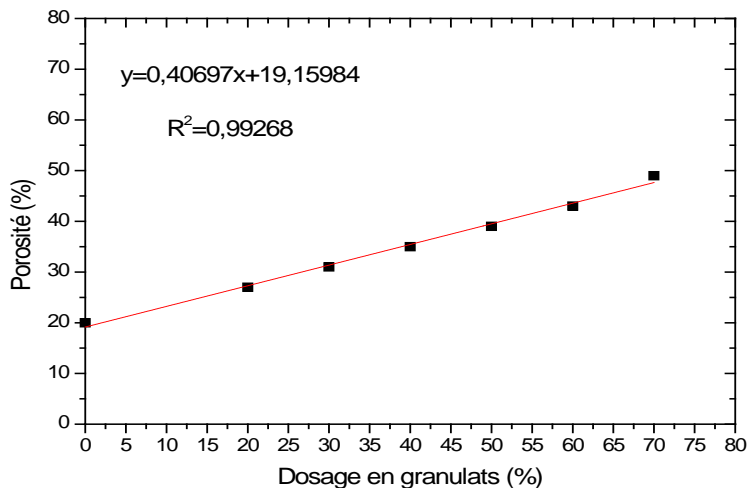


Figure IV.6: Variation de la porosité en fonction du dosage en granulats

IV.2.2 Etude microstructurale

Les composites à base de granulats cellulosiques ont des particularités vis-à-vis de la liaison granulats matrice. Plusieurs propriétés de ces matériaux sont influées par la nature de cette liaison, Il est donc impératif de faire une étude microstructurale afin de comprendre les comportements de ces matériaux. A cet effet, deux types de microscopes ont été utilisés , un microscope optique permettant la visualisation à grandes échelles et un microscope électronique à balayage permettant la visualisation à petites échelles.

➤ Disposition et liaison matrice-granulats

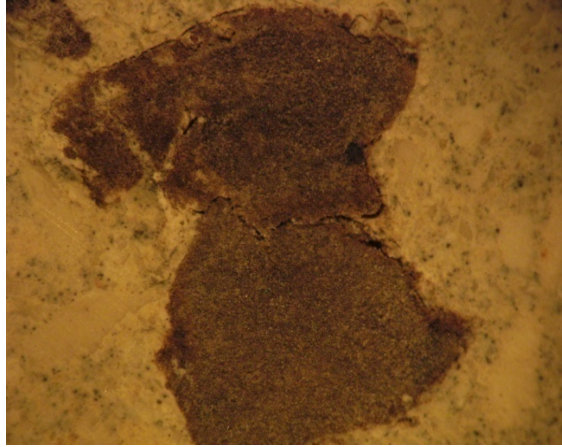
Des observations des coupes d'échantillons, avant écrasement, ont montré une répartition plus ou moins bonne des granulats dans la matrice (**figure IV.7**). Elle est assez bonne pour les dosages élevés en granulats, cela revient à la technique de malaxage adoptée. Afin de bien voir la liaison matrice- granulats de liège, des coupes d'échantillons ont été visionnées à l'aide d'un microscope optique Zeiss 80X avec un agrandissement 40X (**figure IV. 8**). On peut voir que la liaison granulats-matrice est assez bonne. Nous pouvons également constater des petites fissures des granulats représentant la porosité des granulats de liège.



Figure IV.7: Répartition des granulats dans la matrice



BCLL 3/8 50% X10.4



BCLL 3/8 20% X40

Figure IV.8: Liaison granulats- matrice

➤ **Analyse microstructurale**

L'analyse microstructurale, par le biais d'un microscope électronique à Balayage, a été réalisée au laboratoire IMAP à Amiens en France sur trois échantillons qui sont le béton de référence BCLL0 les bétons de liège allégés de 20% et de 50% (BCLL20% et BCLL50%). Les résultats effectués sont illustrés par les **figures IV. 9, IV. 10 et IV. 11.**

• **Béton de référence BCLL0**

Sur le plan de l'aspect général, on constate une bonne compacité de la matrice cimentaire et les micrographes **IV.9a** et **IV.9 b** le montrent avec l'existence des pores avec une couleur très sombre dus probablement à l'inclusion de l'air lors du malaxage ou au moment du remplissage des éprouvettes. Sur le plan de liaison granulats de sable et pâte de ciment, nous pouvons voir clairement sur le micrographe **IV.9c** et **IV.9d** une bonne adhérence des granulats avec la pate de ciment. On constate aussi une présence importante de dolomite dans les échantillons; forme orthorhombique observée sur le micrographe **IV.9c**. A fort grossissement, nous avons pu identifier la nature des produits d'hydratation. Ces observations sont données dans les micrographes **IV.9e** et **IV.9f**. Les produits d'hydratations principaux observés sur l'échantillon de mortier sont des gels C-S-H sous forme de fleurs de coton et la Portlandite Ca(OH)_2 qui sont généralement rencontrés dans les matrice cimentaire (**Tamba et al., 2007; Bederina, 2007; Gadea et al., 2010**).

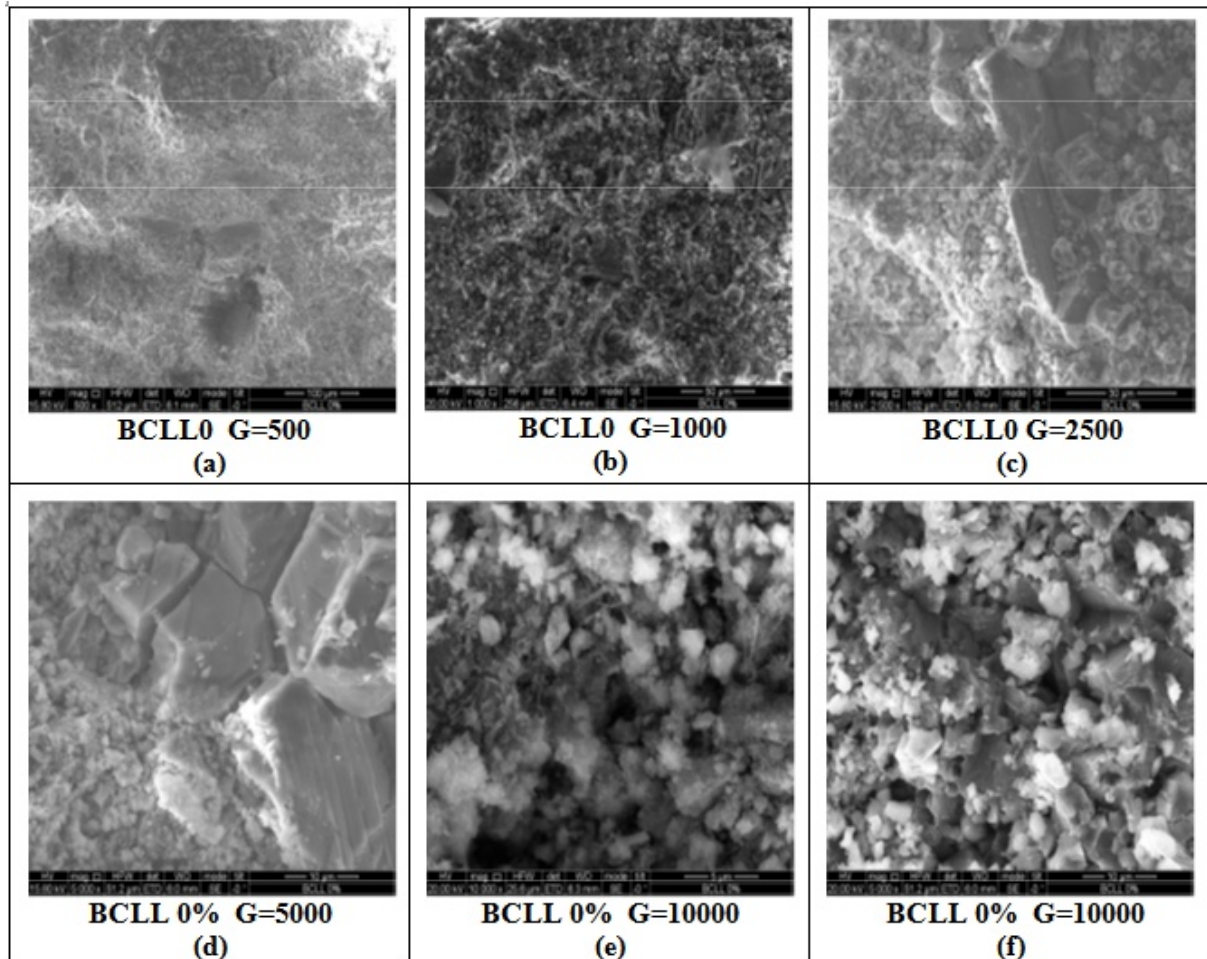


Figure IV.9: Microstructure du BCLLO

- **Influence des granulats de liège**

Les observations réalisées sur les échantillons de béton contenant des granulats de liège à des pourcentages de 20 et 50% sont illustrés par les **figures IV.10** et **IV.11**. L'analyse de ces photos MEB nous a permis de remarquer les mêmes phénomènes pour les deux formulations.

- Les photos **IV.10a** et **IV.11b**, comme pour le cas du béton témoin, révèlent l'aspect compact de la matrice avec l'existence de quelques pores.
- On constate toujours la présence importante de dolomite dans les échantillons (**figure IV.10 e** et **IV.11.e**).
- A fort grossissement (**Figure IV.10e**, **IV.10f**, **IV.11e**, **IV.11f**), nous retrouvons toujours les produits d'hydratation à savoir les CSH et la portlandite. Ceci montre que l'introduction des granulats de liège dans la matrice n'a pas modifié la structure de la matrice. D'après certains auteurs (**Belhadj et al., 2014; Nozahic, 2012; Bederina, 2007**), les granulats cellulés qui ont subi un traitement sont inerte vis-à-vis de la matrice. Cependant, on peut remarquer le développement au voisinage des granulats de touffes d'aiguilles (forme généralement attribuée aux CSH (images f des **figures IV.10** et **IV.11**)).

Nous pouvons aussi constater que, pour les dosages élevés en granulats, ces aiguilles sont plus agglomérées entre elles. Les photos b et c de la **figure IV.10** et de la **figure IV.11** visionnant la liaison granulats matrice montrent une bonne adhérence entre la matrice et les granulats de liège. Dans la zone d'interphase, un décollement se produit entre la face externe du granulat et la matrice lorsque la particule se rétracte (lors du séchage de l'échantillon) (Québaud et al., 1998).

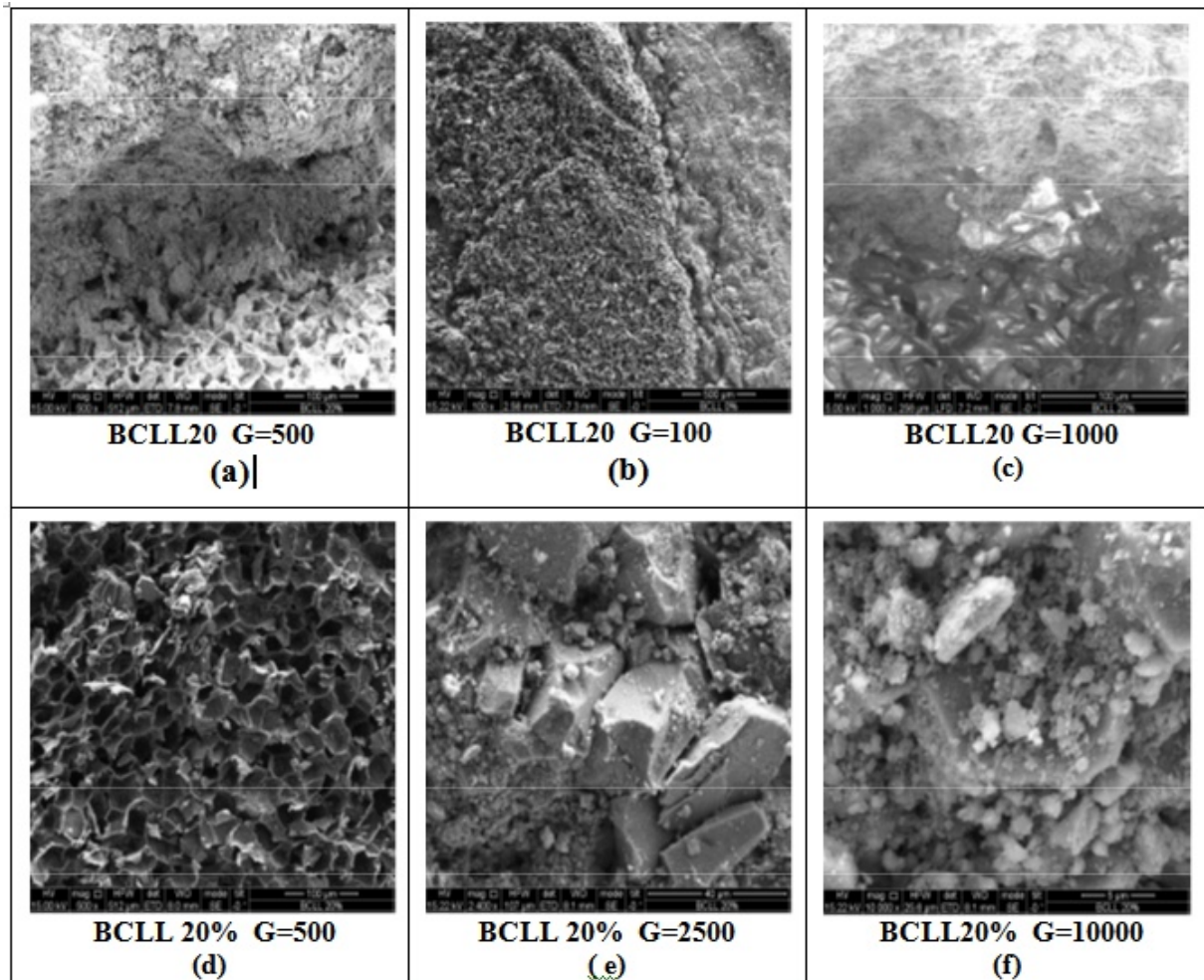


Figure IV.10 Microstructure des BCLL20

- Dans les images des **figures IV.10 et IV.11**, nous avons constaté que les pores du liège ne se remplissent pas de matrice. Ce phénomène a été observé par un certain nombre d'auteurs (Nozahic, 2012).

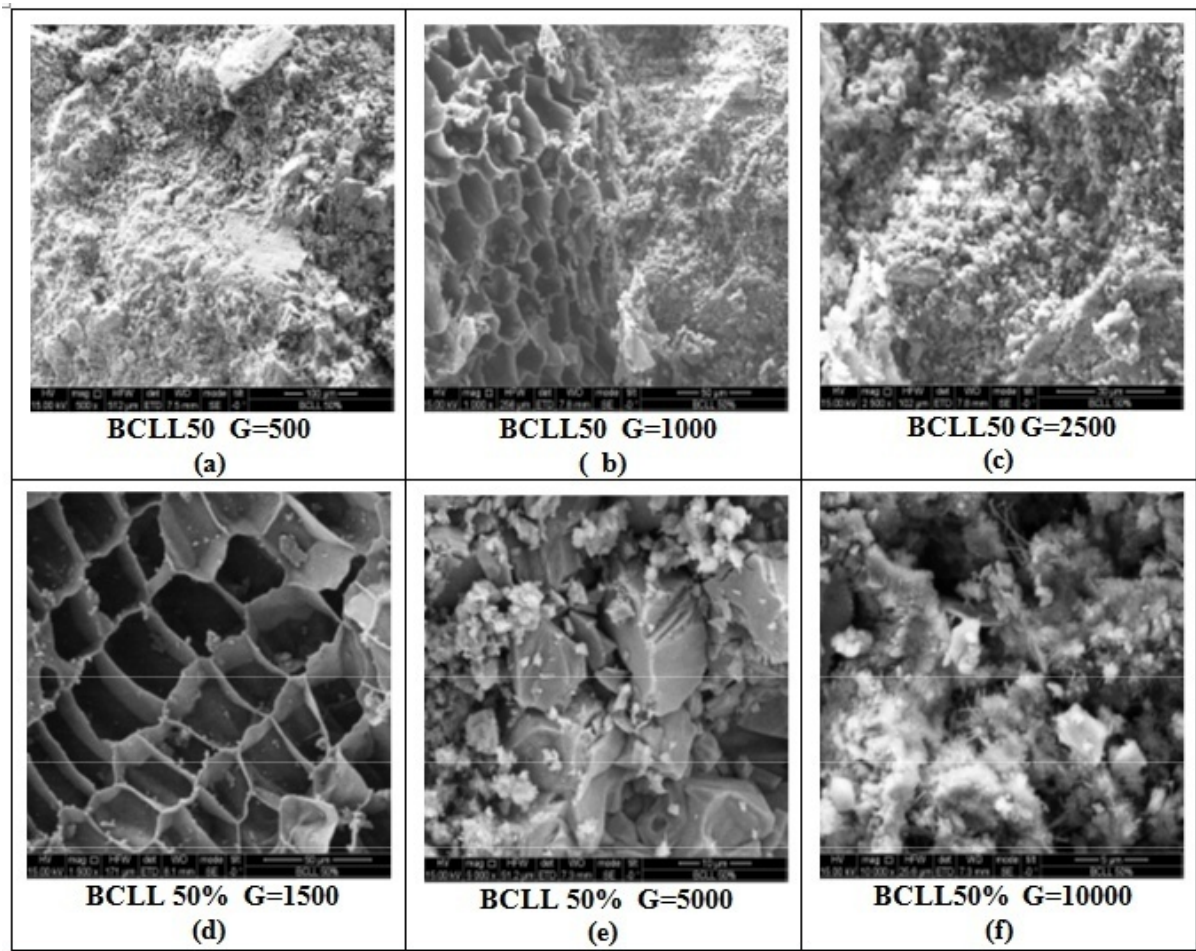


Figure IV.11: Microstructure du BCLL 50%

IV.2.3 Analyse chimique

Une analyse à la spectroscopie est effectuée sur les bétons de liège de différents dosages en granulats de liège dans le but de voir l'influence de l'incorporation du liège dans la matrice cimentaire. Les spectres des différents mélanges sont montrés dans la **figure IV.12**.

L'analyse réalisée par spectroscopie, moyennant l'infrarouge sur les différents mélanges en présence ou non de liège, donne une idée de l'effet de liège sur la cinétique de formation des formes hydratées des principaux composants du matériau élaboré. Dans la zone comprise entre 1900 cm^{-1} et 711 cm^{-1} , nous constatons quelques différences d'intensités de certaines bandes caractéristiques centrées à 1402 cm^{-1} , 1003 cm^{-1} et 871 cm^{-1} . Les bandes à 1402 cm^{-1} et 871 cm^{-1} sont attribuées au mouvement vibratoire des liaisons C-O caractérisant la présence des carbonates de calcium (CaCO_3). La bande à 1003 cm^{-1} rend compte de la vibration des liaisons Si-O caractéristique de la présence des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Dans cette même zone, on constate qu'en ajoutant 70% de liège, les intensités des bandes à 1450 et 1003 cm^{-1} diminuaient. Cette observation indique une croissance du carbonate de calcium lorsqu'on augmente la quantité de liège jusqu'à 60% dans le mélange. Au delà de cette

proportion, on observe une diminution des carbonates et des silicates de calcium hydratés dans le milieu.

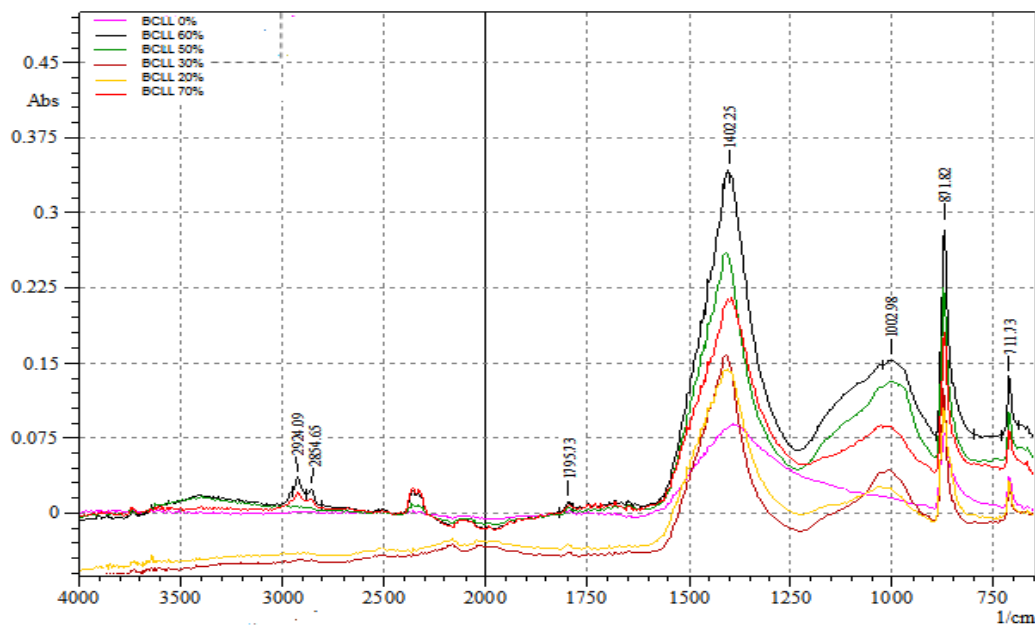


Figure IV.12: Spectre infrarouge des BCLL

Cette diminution d'intensité semble être due à une modification de la polymérisation des C-S-H, mais aussi aux carbonates. Sur la même figure, la bande située à 2924 cm^{-1} caractéristique de la présence de portlandite ne semble pas être affectée par le taux croissant de liège dans le matériau. Le liège semble avoir peu d'effet sur la précipitation de la portlandite. Cela indique que les ions calciums sont peu touchés par le milieu réactionnel imposé.

IV.2.4 Caractéristiques mécaniques

Pour les bétons de granulats légers, les résistances mécaniques sont influées par le dosage en granulat et des pores à l'intérieur du composite. L'ajout de granulats de liège a pour effet d'augmenter la porosité du matériau et par conséquent de diminuer sa résistance.

IV.2.4.1 Résistance à la compression

Les résultats obtenus des essais de résistance à la compression sont représentés dans les figures IV.13 et IV.14. Les résultats montrent une chute brusque de la résistance à la compression lorsqu'on passe du béton témoin au béton dosé à **20%** de **24,4MPa** à **12,22MPa**. La valeur minimale de la résistance à la compression est enregistrée pour le dosage maximum de **70%**, elle est de **0,56MPa** avec un taux de réduction de **97%**. La chute de résistance est expliquée du faite qu'on substitue une entité de matrice résistante par une entité de granulats moins résistante. Cette propriété est pratiquement remarquée pour tous les bétons de granulats légers (Aziz et al., 1979; Ferrandiz-Mas et al., 2014; Gil 2009; Hernández-Olivares et al., 1999)

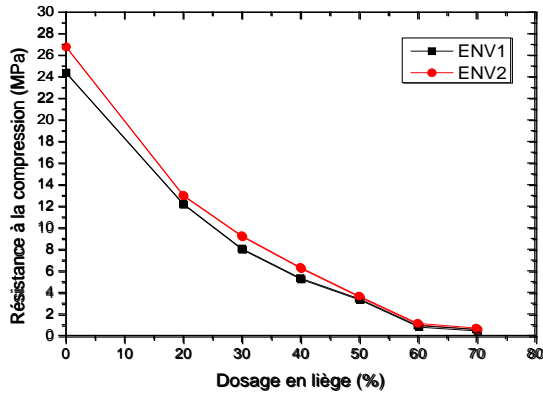


Figure IV13: Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats

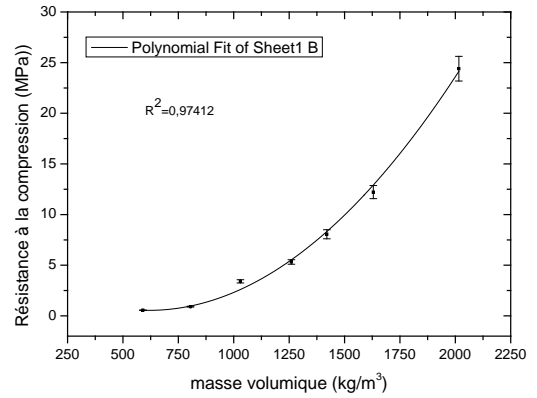


Figure IV14: Résistance à la compression en fonction de la densité

L'incorporation des granulats de liège dans la matrice a un effet sur la porosité du composite et par conséquent sa résistance. Ces deux paramètres sont très étroitement liés; en effet lorsque le dosage en granulats augmente la porosité du matériau augmente et par conséquent sa résistance diminue (Chandra et Berntsson 2002; Taoukil et al. 2013; Goual 2001; Ho 2010). Cette variation est observée dans la figure IV.15 qui représente l'évolution de la résistance à la compression du composite en fonction de sa porosité. La variation est d'allure parabolique.

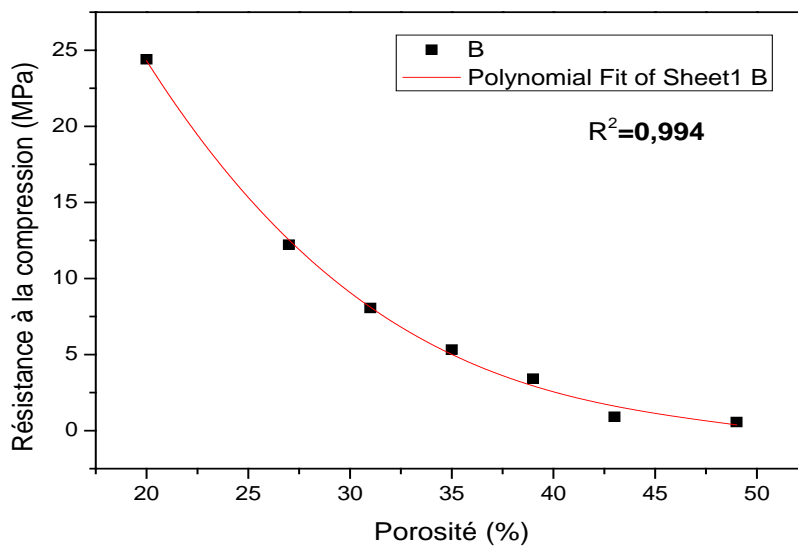


Figure IV.15: Evolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité

IV.2.4.2 Résistance à la flexion

Les résultats des essais de flexion trois points du composite effectués sur des éprouvettes pour les deux modes de cure sont représentés sur la figure IV.16. Les courbes de la résistance à la

flexion présentent des variations analogues à celle de la compression (Traore, 2015; Abdelhadi et al., 2013; Benazzouk et al., 2008). On enregistre une chute de flexion de **4.48 MPa** pour le béton témoin à **2.18 MPa** pour le béton de dosage **20%**. Cette résistance atteindra sa valeur minimale de **0.25 MPa** pour le dosage maximum de **70%** avec un taux de réduction de **94%**.

Nous pouvons voir aussi sur la **figure IV.17** l'évolution de la résistance à la flexion en fonction de la masse volumique du composite et qui montre que la résistance à la flexion décroît en fonction de la masse volumique.

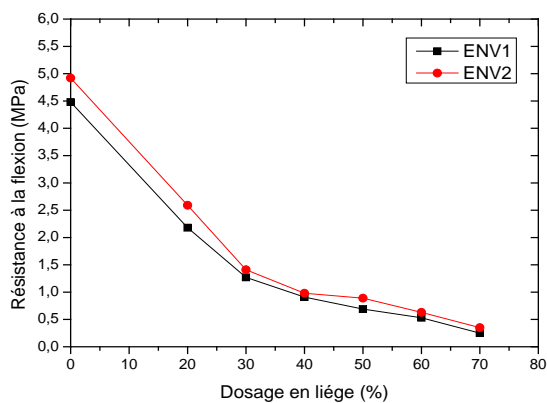


Figure IV16: Résistance à la flexion en fonction du dosage en granulats

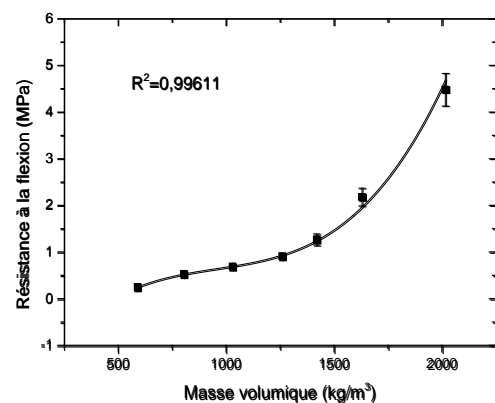


Figure IV17: Résistance à la flexion en fonction de la densité

IV.2.4.3 Mode de rupture

Il était très indispensable de s'intéresser au mode de rupture au niveau des échantillons Après écrasement. Des photos au microscope sur des morceaux prélevés de la zone de rupture (**figure IV.18**) ont montré que les fissures apparaissent dans la matrice (qui est plus rigide que les granulats) et que ces fissures contournent les granulats. En effet et sous l'effet des contraintes, le mortier va se déformer et le granulat va faire de même par contact granulat-mortier. Comme le granulat peut supporter des niveaux de déformation supérieurs à ceux du mortier, c'est ce dernier qui va se fissurer sous l'effet des contraintes et le granulat, n'ayant pas atteint son seuil de rupture, ne sera pas détruit. La rupture du béton se fait dans ce cas précis par rupture du mortier et non par rupture des granulats. Ainsi, les caractéristiques des granulats sont déterminantes dans les performances des bétons légers.

Certains auteurs (Nóvoa et al., 2004; Moreira et al., 2014; Karade et al., 2006) observent que la présence de liège change le mode de rupture des éprouvettes. Les éprouvettes du BCLL atteignent des déformations beaucoup plus élevées à la ruine que celles du béton de référence : elles conservent donc plus longtemps une forme avant de se désagréger.



Figure IV18: Mode de rupture du composite

V.2.4.4 Module d'élasticité en compression

Le module d'élasticité a été déterminé à l'âge de 28 jours pendant l'essai de compression réalisé sur des éprouvettes cylindriques $\varnothing 10 \times 20 \text{cm}^3$. La valeur du module est calculée graphiquement. Elle est égale à la pente de la courbe contrainte-déformation à 30% de la charge de rupture. L'évolution de la résistance à la compression en fonction de la déformation et selon le dosage en granulats de liège est représentée sur la **figure IV.19**. Nous remarquons bien que l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation est similaire à celle de tous les bétons. Elle se caractérise par une évolution exponentielle en fonction de la déformation jusqu'à la rupture. Nous trouvons d'abord une partie linéaire ou phase élastique, puis à partir de 30% de la charge de rupture, la résistance du composite va évoluer lentement et les déformations vont être de plus en plus importantes. Au delà de la zone de rupture les déformations vont évoluer rapidement et on aperçoit une chute de la résistance (**Shink, 2003; Y. Ke et al., 2006; Bastgen et Hermann, 1977; Nguyen et al., 2014; Nóvoa et al., 2004**).

Si nous essayons de regrouper les six graphes en un seul graphe (**figure IV20**). Nous pouvons voir clairement l'effet de l'incorporation des granulats de liège sur l'élasticité du composite. Nous constatons une diminution remarquable de la valeur du module d'élasticité en passant du béton de référence aux bétons de plus en plus allégés par les granulats légers de liège. Cette diminution a été observé par plusieurs auteurs utilisant des granulats de liège ou de granulats légers en général (**De-Carvalho et al., 2013; Nóvoa et al., 2004; Y. Ke et al., 2006; Contant, 2001**).

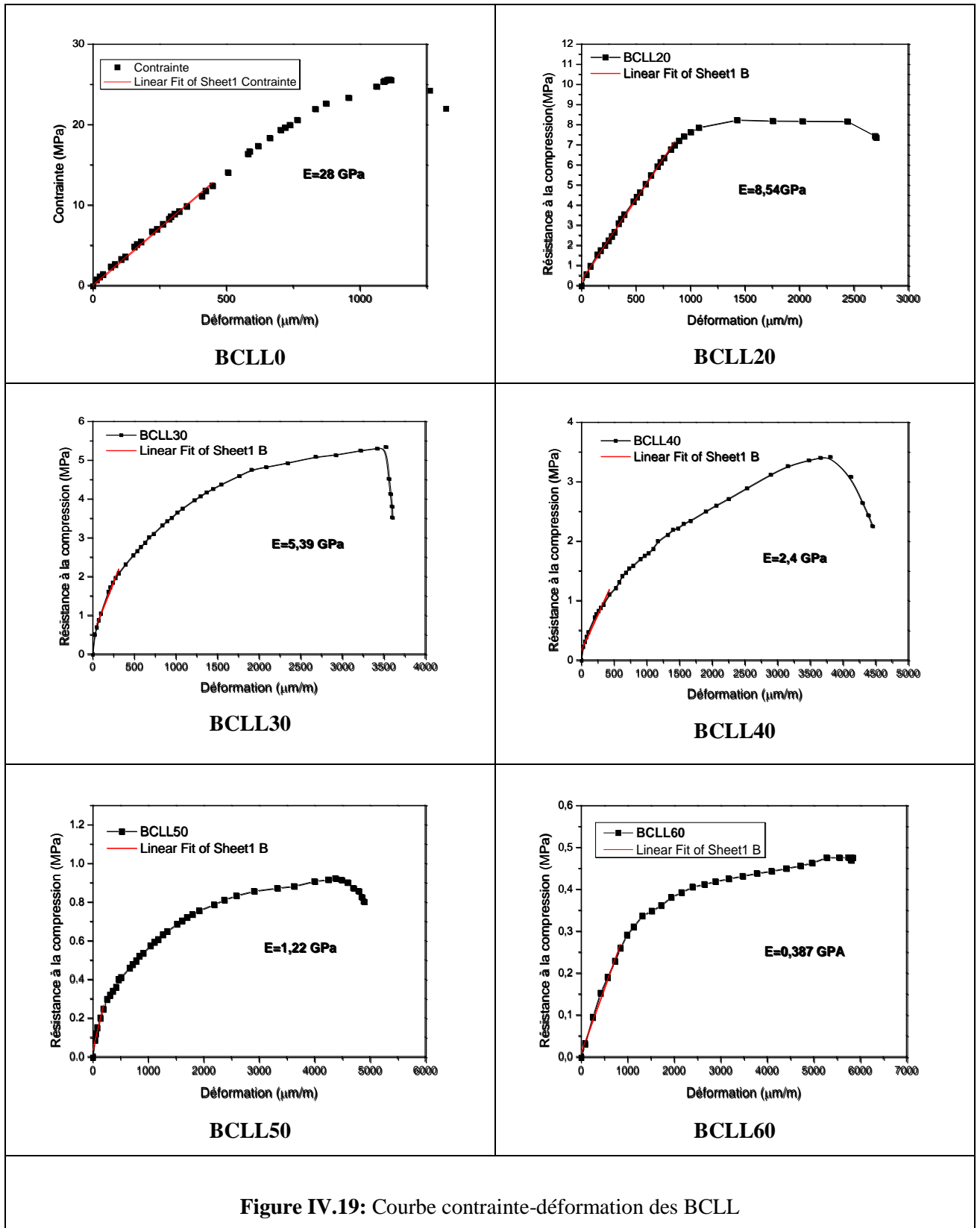
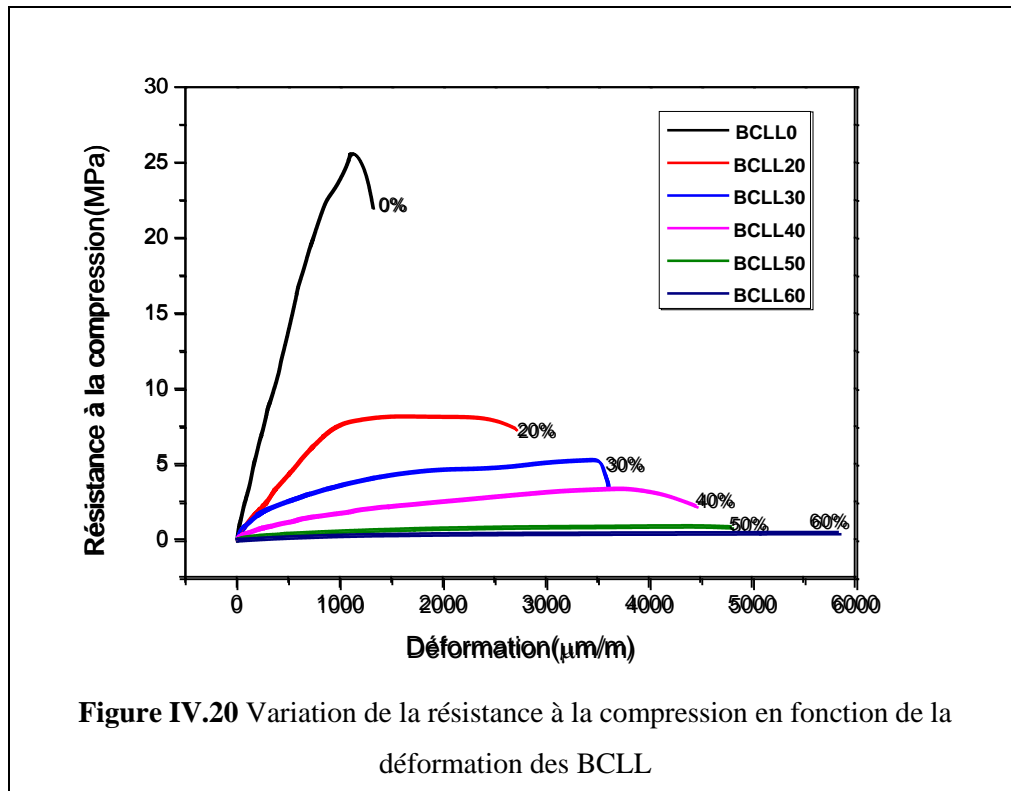


Figure IV.19: Courbe contrainte-déformation des BCLL



Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux confirment que l'incorporation de granulats légers induit une chute importante du module d'élasticité. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression (Ho, 2010; Contant, 2001; Shink, 2003; Younis et Pilakoutas, 2013).

Sur la **figure IV.21** donnant l'évolution du module d'élasticité en fonction du dosage en granulats de liège, nous pouvons voir clairement que la valeur du module décroît en fonction du dosage en granulats, elle passe d'une valeur de **28000 MPa** pour le béton de référence (BCLL0) à une valeur de **8540 MPa** pour le béton le moins allégé (BCLL20) avec un taux de réduction de **69%**. Elle atteint enfin une valeur minimale de **307MPa** correspondante au béton le plus allégé (BCLL60) soit un taux de diminution de **98%**.

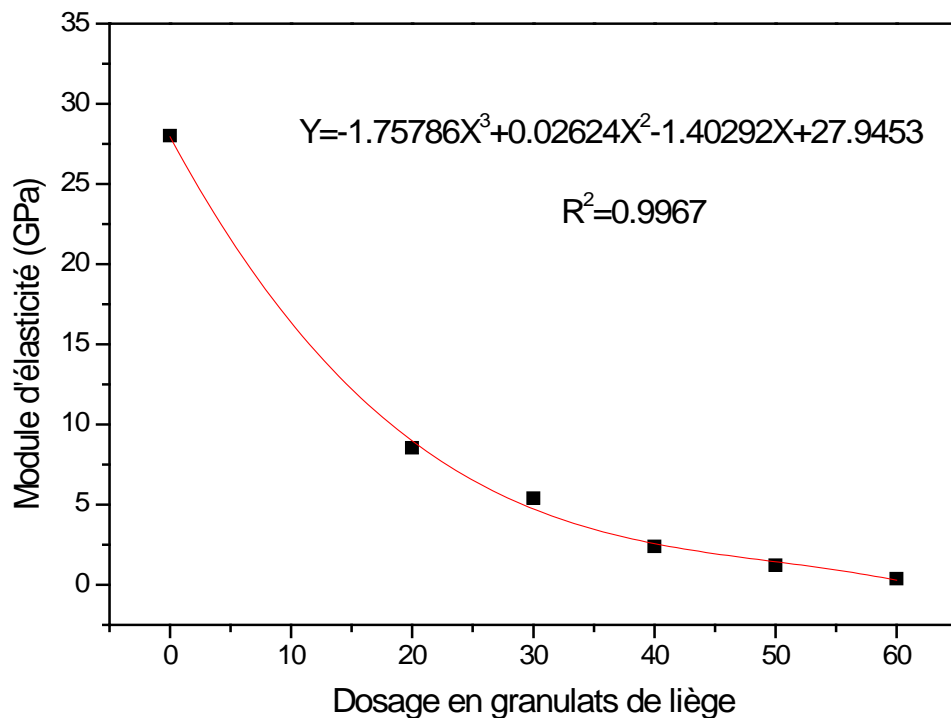


Figure IV.21: Variation du module d'élasticité en fonction du dosage en granulats

IV.2.4.5 Evolution de la flèche en fonction de la charge

Lors de l'essai de flexion, des mesures de la flèche sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{cm}^3$ ont été effectués afin de voir l'évolution de la flèche en fonction de la charge appliquée au cours du temps. Les résultats obtenus sont représentés sur une seule courbe (**figure V.22**) représentant l'évolution de la flèche en fonction de la charge et selon les pourcentages d'incorporation des granulats de liège.

Les résultats obtenus montrent que la flèche augmente de manière remarquable au fur et à mesure qu'on ajoute les granulats. Elle passe d'une valeur faible de **0.86mm** à une valeur de **2.87mm** pour le béton le moins allégé et elle atteint une valeur maximale de **15.31mm** pour le maximum de dosage en granulats de liège.

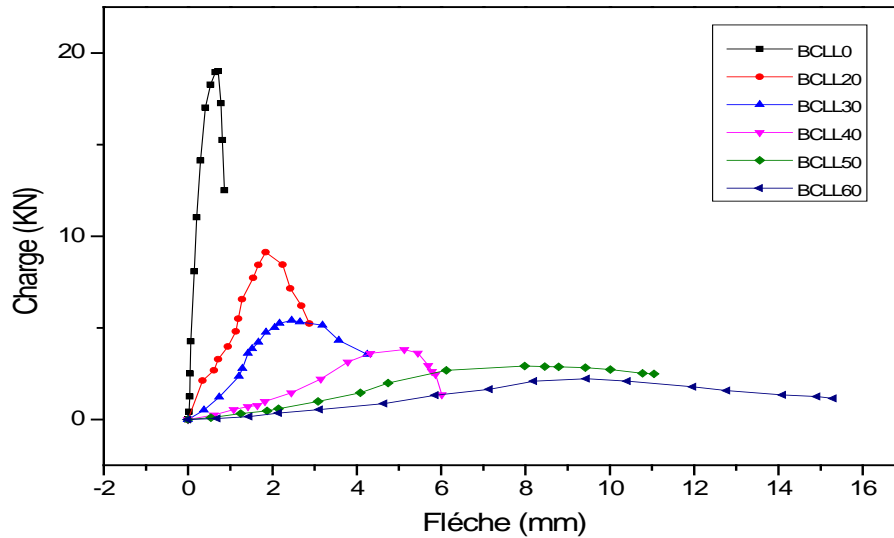


Figure IV.22: Evolution de la charge en fonction de la flèche

IV.2.5 Modélisation du comportement mécanique

Dans le but de comparer nos résultats expérimentaux avec des résultats théoriques, nous avons voulu faire une étude de modélisation du comportement mécanique en appliquant quelques modèles théoriques permettant la prédiction des caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux étudiés.

IV.2.5.1 Modèles de prédiction de la résistance à la compression

Plusieurs études de recherche ont été menées dans le domaine de modélisation du comportement mécanique. A cet effet un certain nombre de chercheurs ont mis en évidence une relation étroite entre la résistance et la porosité. Les premières recherches remontent à 1892 où Feret R a développé une loi empirique pour les bétons :

$$R_c = F [V_c / (V_c + V_w + V_a)]^2 \dots\dots\dots (IV.1)$$

où

R_c est la résistance à la compression à un âge donné,

F est une constante,

V_c , V_w , V_a sont les volumes respectifs de ciment, eau et air.

Cependant, cette relation ne prend pas en compte le degré d'avancement de l'hydratation qui est un facteur déterminant de la porosité. Les premiers travaux dans ce sens sont attribués à Power T. C. (1960), qui a établi la relation empirique suivante pour une pâte de ciment :

$$R_c = A' . X^k \dots\dots\dots (IV.2)$$

où R_c est la résistance à la compression à un âge donné, A' est une constante représentant la résistance intrinsèque de la pâte de ciment hydratée (porosité nulle),

X est une représentation de la porosité capillaire de la pâte donnée,
k varie entre 2.6 et 3.0 et est fonction du degré d'hydratation.

Depuis, de nombreuses relations ont été utilisées pour essayer de tenir compte de la relation entre la résistance mécanique et la porosité:

- **Bal'shin M. YU., (1949)** suggère, pour des matériaux céramiques poreux la relation suivante :

$$R_c = R_0 (1-\varepsilon)^k \dots\dots\dots(\text{IV.3})$$

Des équations de ce type ont été développées par Soroka J. et Sedera P.J. pour le plâtre, par Mindess S. (1970) pour des silicates de calcaires autoclavés.

- **Ryshkecvitch E. (1953)** propose, pour des matériaux frittés, une relation linéaire entre la porosité et le logarithme de la résistance à la compression:

$$R_c = R_0.e^{-k\varepsilon} \dots\dots\dots(\text{IV.4})$$

Des équations de ce type ont été développées par d'autres chercheurs comme Knofel D. (1968), pour des pâtes de ciment et Manning D. G. et Hope B. B. (1971), pour des bétons imprégnés de polymères.

- **Schiller K. K., (1960)**, a suggéré l'équation suivante pour les plâtres

$$R_c = R_0.\ln(\varepsilon_0/\varepsilon) \dots\dots\dots(\text{IV.5})$$

Selon cette équation, une relation linéaire existe entre la résistance et le logarithme de la porosité. Des équations de ce type sont utilisées par plusieurs chercheurs pour exprimer l'effet de la porosité sur les pâtes de ciment ou de béton (**Wischers G., 1961**).

- **Hasselmann D. P. H. (1963)**, a suggéré une relation linéaire entre la résistance et la porosité d'un matériau réfractaire polycristallin :

$$R_c = R_0(1 - K_H. \varepsilon) \dots\dots\dots(\text{IV.6})$$

Pour toutes ces relations :

R_c est la résistance à la compression à un âge donné,

R_0 est la résistance à la compression à porosité nulle,

ε est la porosité totale,

ε_0 est la porosité à résistance nulle,

K, K_H , sont des constantes empiriques.

Plus récemment, Watson K.L., (1980), a proposé pour des bétons cellulaires autoclavés l'expression :

$$R_c = k.[(V_s / V_p) - (V_s / V_p)_{cr}] \dots\dots\dots(\text{IV.7})$$

R_c est la résistance à la compression, V_s / V_p le rapport volumique solide / pore déterminé par pycnométrie à l'hélium, $(V_s / V_p)_{cr}$ le rapport volumique correspondant à une résistance nulle, k est une constante empirique.

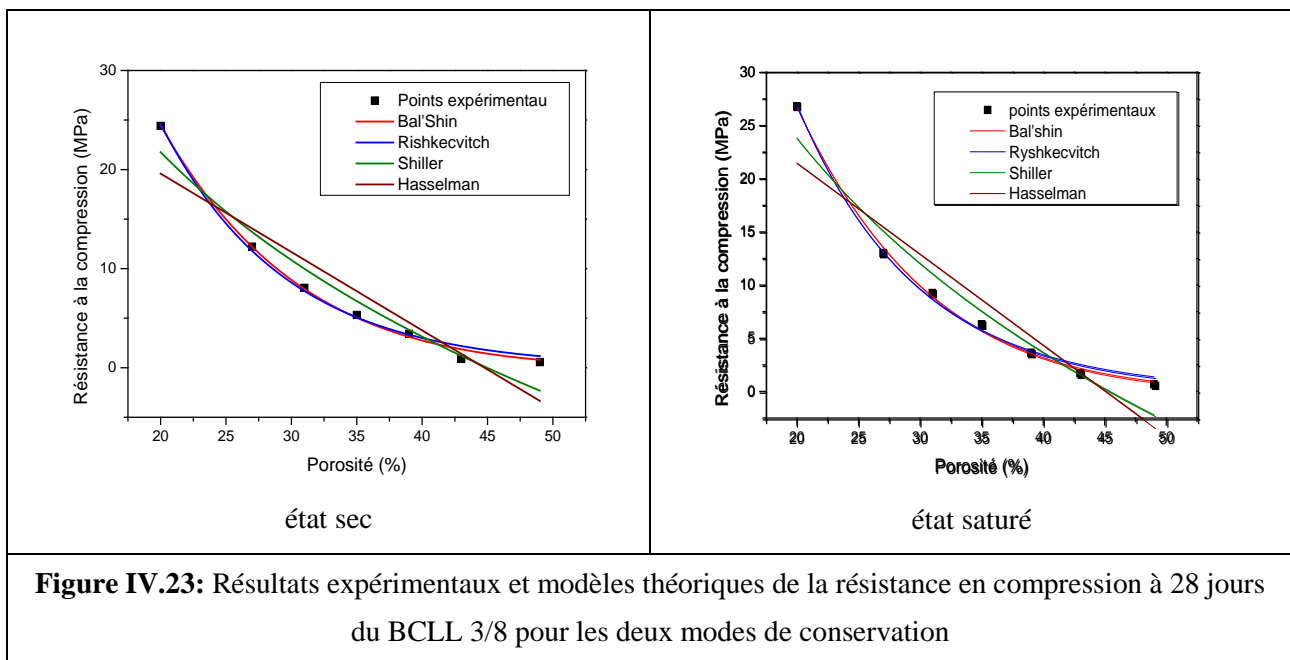
Nous avons essayé les trois modèles communément utilisés. Il s'agit des modèles de Bal'Shin, Ryshkewich ,Schiller et Hasselman.

On a regroupé dans le tableau VI.1 les expressions théoriques des différents modèles. Les coefficients sont calculés par régression sur la courbe expérimentale $R_c = f(\epsilon)$.

Les résultats expérimentaux en comparaison avec les modèles théoriques sont représentés dans la figure IV.23 pour les deux cas sec et saturé.

Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients utilisés dans les modèles théoriques

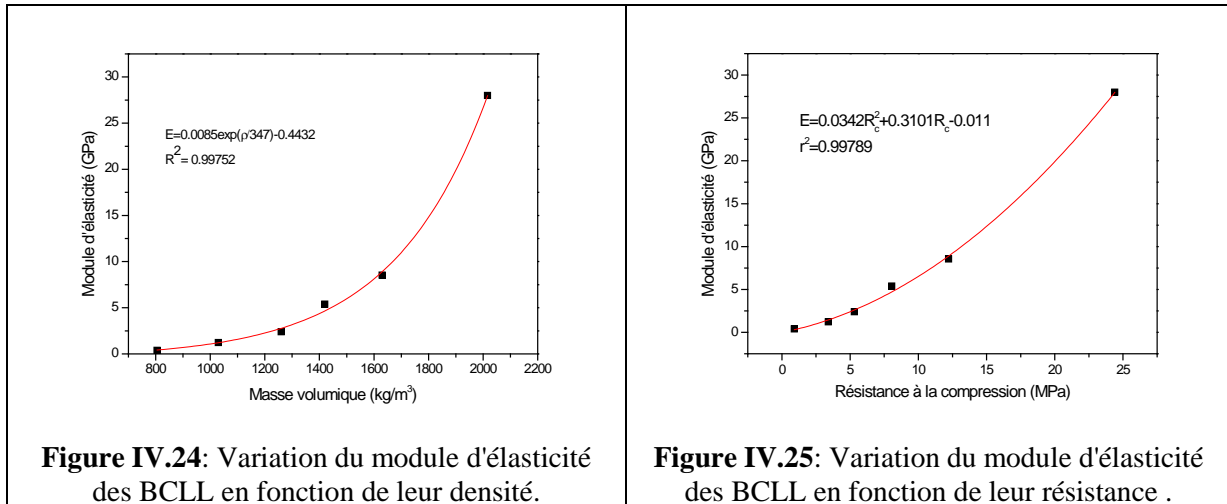
Modèles utilisés	Equation	Coefficient			
		Etat sec		Etat Saturé	
Bal'shin Matériaux céramiques	$R_c = R_0 (1-\epsilon)^k$	$R_0=133.282$	$k=7.59801$	$R_0=139.17$	$k=7.39817$
Hasselman Matériaux réfractères polycristallins	$R_c = R_0(1 - K_H \cdot \epsilon)$	$R_0=33.40$	$k_H=2.233$	$R_0=38.57$	$k_H=2.21621$
SHiller Plâtres	$R_c = R_0 \cdot \ln(\epsilon_0/\epsilon)$	$R_0=26.85$	$\epsilon_0=44.96$	$R_0=29.02$	$\epsilon_0=45.434$
Ryshkecvitch Matériaux frités	$R_c = R_0 \cdot e^{-k\epsilon}$	$R_0=201.74$	$k=10.52$	$R_0=209.26$	10.25726



D'après une observation sur les courbes théoriques des quatre modèles théoriques et en faisant une comparaison avec les résultats expérimentaux, nous pouvons remarquer que pour les deux modes de cure les valeurs expérimentales concordent avec le modèle de **Bal'Shin** et celui de **Ryshkecvitch**.

IV.2.5.1 Modèles de prédiction du module de Young

Les propriétés élastiques des granulats ont une influence prépondérante sur le module de Young du béton. Comme les propriétés élastiques du granulat sont liées à leur indice de vides et donc à leur densité. le module de Young du béton léger dépend non seulement de la résistance en compression, mais aussi de la masse volumique du béton. nous pouvons voir à titre démonstratif dans les figure IV.24 et IV.25 qu'il y a bien une relation entre le module de Young du béton léger et la densité d'une part et avec sa résistance à la compression d'autre part.



De nombreux modèles sont proposés pour relier le module d'élasticité à la densité ou à la résistance à la compression du béton (Neville,2000)

Les normes proposent différentes relations empiriques pour évaluer les modules élastiques des bétons légers, en fonction de leur masse volumique et de leur résistance à la compression. Le module de Young du granulat étant rarement connu, les formules tiennent compte du module au moyen d'un coefficient fonction de la masse volumique du béton. Il n'y a pas consensus sur ces relations (Bogas et Gomes, 2014; Ke,2008).

- l'Eurocode EN 1922-1-1 préconise

$$E_c = 22000 \left(\frac{R_{cm}}{10} \right)^{0.3} X \left(\frac{\rho_{bs}}{2200} \right)^2 \dots\dots\dots(IV.8)$$

où E_c est le module de Young du béton en MPa (module sécant entre $\sigma_c=0$ et $0,4 R_{cm}$) et ρ_{bs} est la masse volumique sèche du béton en kg/m^3

- La norme ACI propose la relation ci-dessous:

$$E_c = 0.043(\rho_{bs})^{1.5} \sqrt{R_{ck}} \dots\dots\dots(IV.9)$$

Cette dernière équation est considérée comme valable pour des valeurs de masse volumique comprises entre 1440 et 2480 kg/m³, et des valeurs de résistance à la compression comprise entre 21 et 35 MPa. Le module d'Young réel peut s'écarter jusqu'à 20 % de la valeur calculer.

- La norme **NS 3473** (Norwegian Standard) suggère une relation similaire à celle de la norme européenne mais avec des coefficients différents:

$$E_c = 9500(R_{cm})^{0.3} \times \left(\frac{\rho_{bs}}{2400}\right)^{1.5} \dots\dots\dots (IV. 10)$$

D'après la norme cette relation est valable pour des béton dont les résistances à la compression sont comprises entre 12 et et 80 MPa.

Malgré que les modèles de prédiction du module de Young des bétons de granulats légers concernent les bétons légers de structure, nous avons essayé d'appliquer ces trois modèle cités supra aux résultats expérimentaux relatifs à notre béton. les résultats de cette analyse sont représentés dans la **figure IV.24**.

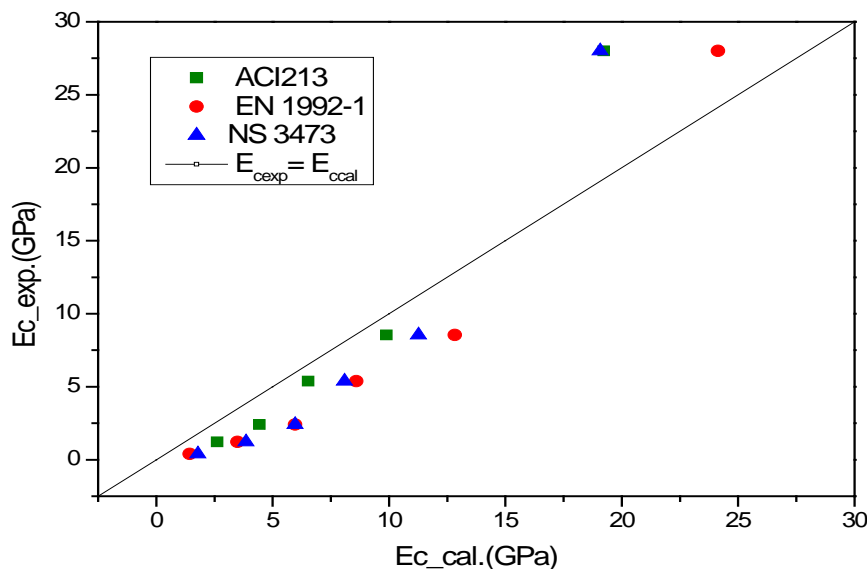


Figure IV.26: Confrontation des modules de Young de bétons légers obtenus par les formules empiriques et les résultats expérimentaux.

En comparant les valeurs du module de Young expérimentales aux valeurs calculées en appliquant les trois modèles on voit que les écarts entre ces valeurs sont respectivement de **24%** pour le modèle de l'ACI, **36%** pour le modèle de la norme EN 1992-1 et **42%** pour le modèle la norme NS3473.

La confrontation à nos résultats expérimentaux montre que l'ensemble des formules empiriques testées surestiment les modules de Young des bétons de liège mesurés

expérimentalement. Nous proposons de modifier les coefficients multiplicateurs dans les formules de façon à réduire les valeurs calculées. Les formules deviennent alors:

➤ l'Eurocode **EN 1922-1-1** : $E_c = 15000 \left(\frac{R_{cm}}{10}\right)^{0.3} \times \left(\frac{\rho_{bs}}{2200}\right)^2$ (IV.11)

➤ La norme **ACI**: $E_c = 0.03(\rho_{bs})^{1.5} \sqrt{R_{ck}}$ (IV.12)

➤ La norme **NS 3473** $E_c = 6500(R_{cm})^{0.3} \times \left(\frac{\rho_{bs}}{2400}\right)^{1.5}$ (IV.13)

les nouvelles valeurs calculées du modules de Young sont représentées avec les valeurs expérimentales dans la **figure IV.27**.

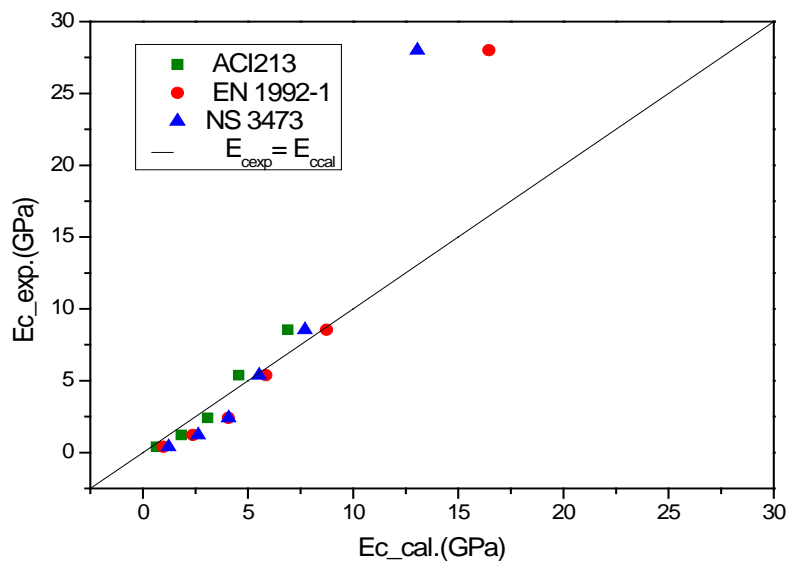


Figure IV.27: Confrontation des modules d'Young de bétons légers obtenus par les formules empiriques modifiées et les résultats expérimentaux.

D'après la **figure IV.27** on voit que les écarts entre les valeurs calculés et les valeurs expérimentales se sont réduit; ils sont de **7%** pour le modèle de l'ACI213, **9%** pour le modèle EN1922.1 et **15%** pour le modèle NS3473.

Nous pouvons alors adopter le modèle de l'ACI213 qui prédit des valeurs du module d'élasticité très proches des valeurs expérimentales.

IV.2.6 Comportement thermique

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existants dans le matériau (**Ollivier et Torrenti, 2008; Bories et Prat, 1995; ganjian, 1990; Nguyen, 2013**). Les propriétés d'isolation des matériaux de construction se quantifient à travers deux paramètres usuels : la conductivité thermique λ et la

diffusivité a . Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et des conditions de conservation (rôle de l'eau).

Les résultats des essais de caractérisation thermique sont représentés sur le tableau IV.2

Tableau IV.2 : Valeurs des caractéristiques thermiques.

Séries d'échantillon	Conductivité Thermique λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Chaleur Spécifique c ($Jkg^{-1}.K^{-1}$)	Diffusivité Thermique a ($10^{-6}.m^2/s$)
BCLL0	1,1103	1254,2	0,639
BCLL20	0,6894	1300,7	0,5399
BCLL30	0,5168	1350,2	0,4727
BCLL40	0,3912	1390,5	0,403
BCLL50	0,2348	1435,2	0,3641
BCLL60	0,1537	1510	0,34
BCLL70	0,1292	1708,1	0,3012

IV.2.6.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique est la principale caractéristique qui définit le pouvoir isolant d'un matériau, elle devrait être déterminé avec rigueur et avec le choix de la bonne méthode. Afin de suivre l'évolution de la conductivité thermique pour les composites élaborés; nous avons voulu voir l'effet du dosage en granulats sur la conductivité d'une part et l'effet de la cure d'une autre part (**figure IV.28**). Sur les **figures IV.29**, **IV.30** et **IV.31** nous avons représenté l'évolution de la conductivité en fonction de la densité, en fonction de la porosité et en fonction de la résistance à la compression.

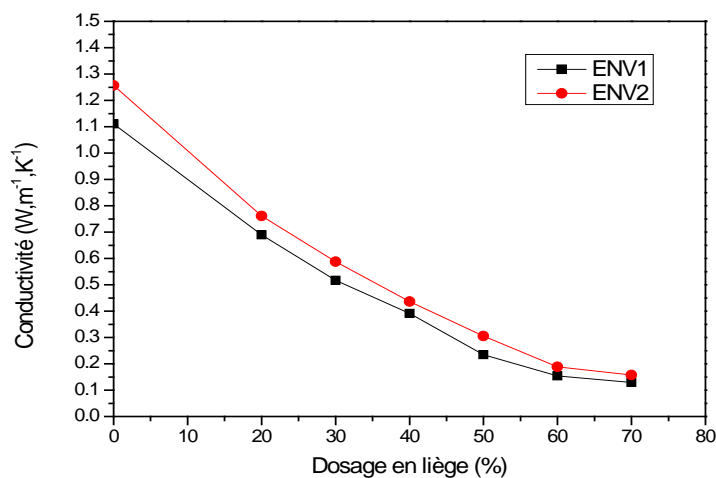


Figure IV.28: Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en granulats

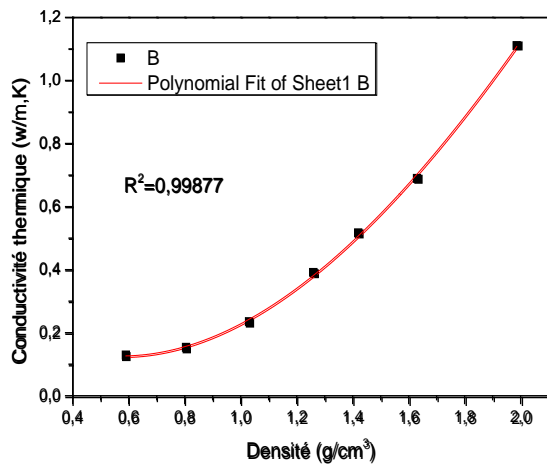


Figure IV.29: Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité.

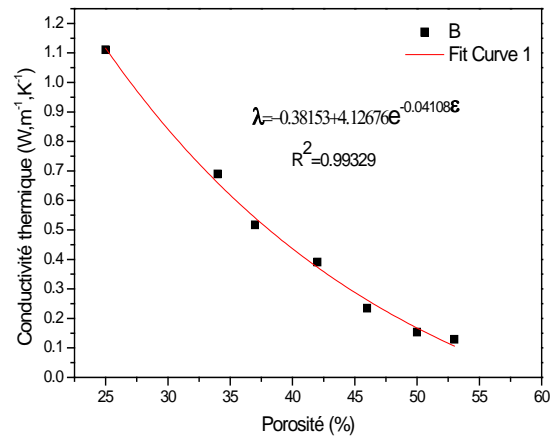


Figure IV.30: Variation de la conductivité thermique en fonction de la porosité.

Pour le dosage élevé en granulats de liège, la conductivité thermique atteint sa valeur la plus faible qui est de $0.13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et qui correspond à un taux de diminution de **88%**.

En explicitant l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité du composite (**figure IV.29**), nous remarquons qu'il y a une conclusion générale relevée par de nombreux auteurs (**W. V. Liuet al., 2014; Loudon, 1979; Topçu et Işıkdag, 2008; Ho, 2010**) confirmant que la conductivité thermique du béton diminue avec la réduction de sa densité. On peut étendre cette conclusion aux bétons incorporant des granulats de liège tout en gardant à l'esprit que dans ce dernier cas, la chute de la densité n'est pas seulement due à l'augmentation de la porosité, mais aussi à la faible densité du liège.

De même, nous pouvons voir sur **la figure IV30** les variations de la conductivité thermique en fonction de la porosité. Ces deux paramètres étroitement liés varient en sens inverse. Plus la porosité du matériau est grande et plus sa conductivité est faible et plus il est isolant (**Ziregue et al.,2015; Adler, 2013; Bessenouci, et al., 2011; Khelifi et Belouettar, 2012**).

Afin de visualiser la relation entre les caractéristiques mécaniques et les propriétés thermiques de nos composites, nous avons étudié la variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression (**figure IV.31**).

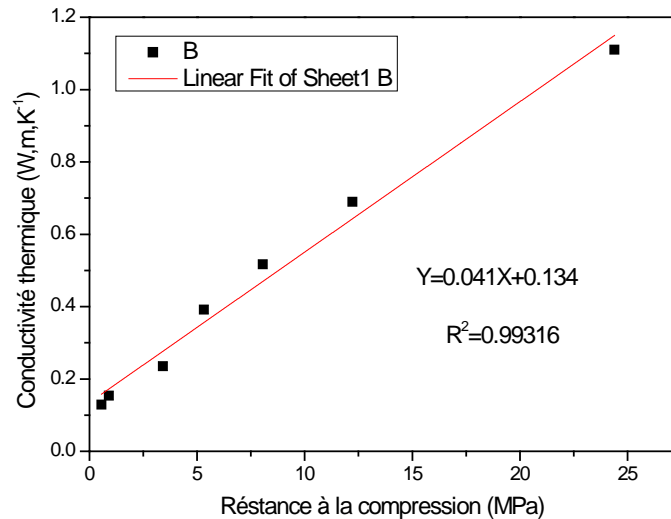


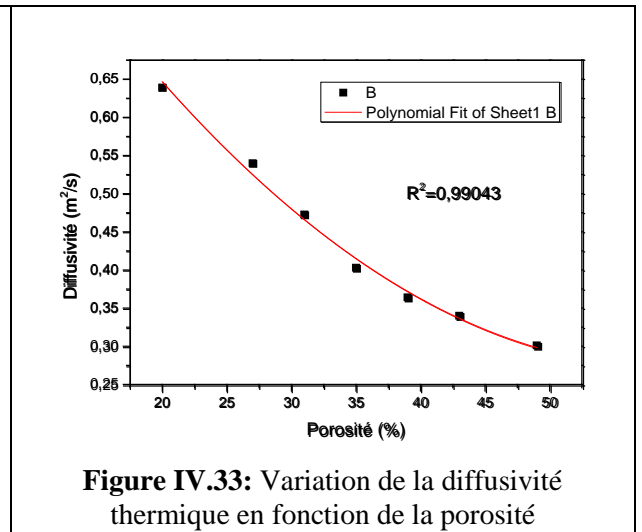
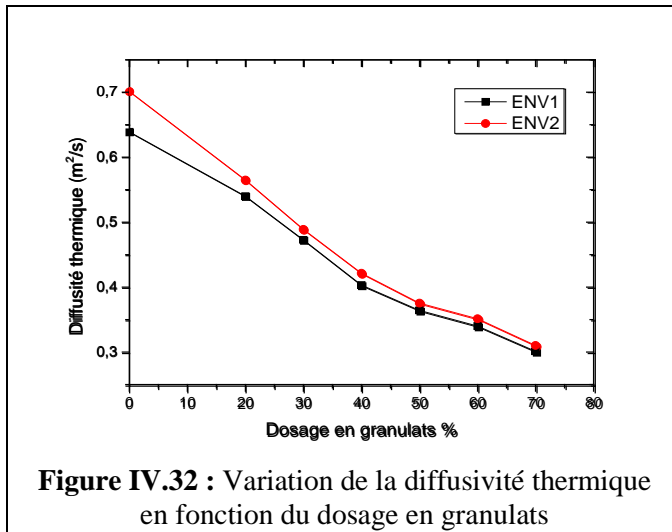
Figure IV.31: Variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression

La courbe ainsi obtenue montre une corrélation très intéressante entre la conductivité thermique et la résistance à la compression qui est l'une des caractéristiques les plus importantes dans le choix d'un matériau de construction. En termes de matériau isolant et porteur, la qualité recherchée pour un matériau de construction est une résistance thermique maximale à laquelle s'ajoute une résistance mécanique élevée (Ziregue et al.,2016). Notre but est principalement l'amélioration des qualités thermiques du béton en lui intégrant des matériaux isolants tout en conservant des performances mécaniques suffisantes. Cela est pratiquement impossible pour pratiquement tous les bétons de granulats légers parce qu'en générale les performances mécaniques varient en sens inverse des performances thermiques et donc, il est plus convenable de trouver un compromis entre ces performances. Le critère lié à l'utilisation du béton doit être pris en considération; pour notre cas d'étude, il s'agit de matériaux isolants porteurs et matériaux isolants dont les performances sont établis par la commission Rilem.

IV.2.6.2 Diffusivité thermique

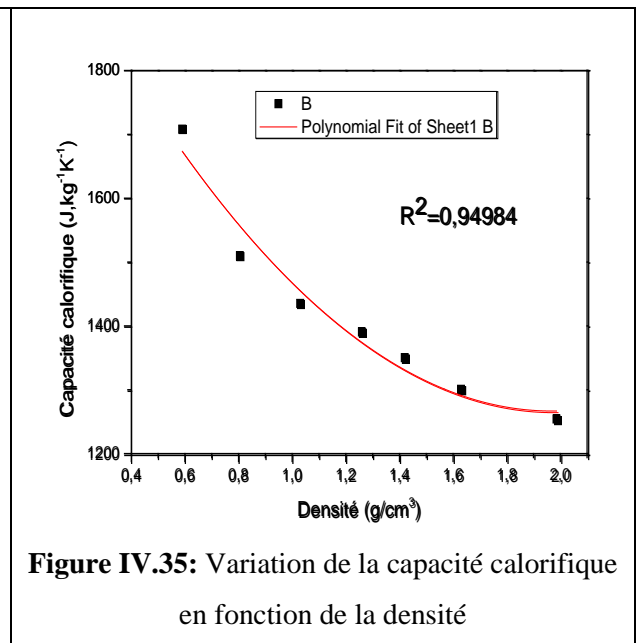
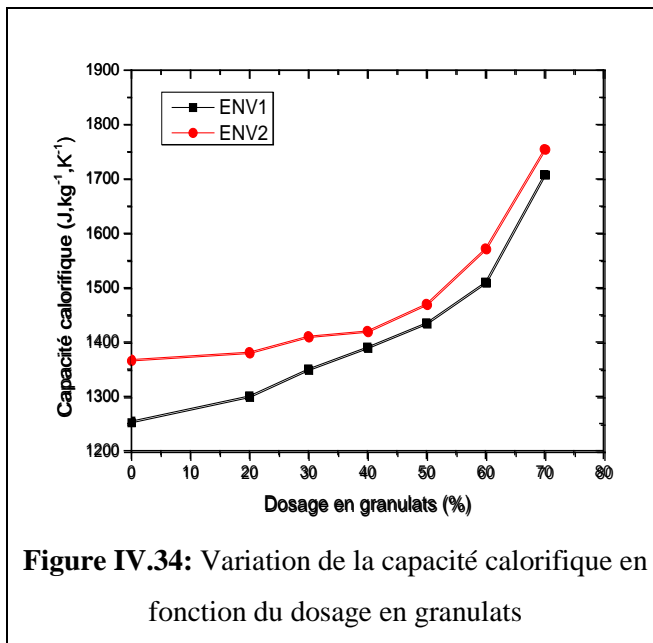
Les valeurs de la diffusivité des BCLL sont représentées sur la figure IV.32 en fonction du dosage en granulats et selon le mode de cure. L'allure de la courbe montre que la diffusivité décroît lorsque le dosage en granulats de liège augmente. Elle est de $0.639\text{mm}^2/\text{s}$ pour le béton témoin puis prend la valeur de $0.5399\text{mm}^2/\text{s}$ pour le béton le BCLL20 puis chute brutalement pour arriver à une valeur minimale de $0.3012\text{mm}^2/\text{s}$ marquant un taux de réduction de 53%. L'effet de la cure est aussi remarquable. En raison de la relation dépendante de la diffusivité et de la porosité, nous avons voulu représenter leur valeur dans la

courbe de la **figure IV.33** et on voit bien qu'il y a une très bonne corrélation entre ces deux paramètres.



IV.2.6.3 Capacité calorifique

Les capacités calorifiques des composites étudiés sont représentées, en fonction des teneurs en granulats de liège et la masse volumique, sur les **figures IV.34 et IV.35**



La courbe obtenue dans la **figure IV.34** montre que la capacité calorifique du composite augmente avec l'augmentation du dosage en granulats de liège et cela est expliqué par le fait que le liège possède une capacité calorifique importante par rapport à celle de la matrice et par conséquent l'incorporation d'avantage de granulats de liège ne fait qu'augmenter la capacité calorifique du composite. D'autre part, on remarque toujours l'effet positif de la cure dans l'eau sur la capacité calorifique.

Puisque, comme pour tous les bétons légers, les propriétés thermiques des bétons de liège sont liées à leurs masses volumiques, il était intéressant de tracer la courbes reliant la capacité calorifique des composites étudiés et sa densité. Dans **la figure IV.35** nous voyons bien qu'il y a une bonne corrélation entre ces deux paramètres.

IV.3 Synthèse de l'étude de Faisabilité

L' étude de faisabilité réalisée sur le béton de calcaire allégé par des granulats de liège avait comme objectif d'étudier la compatibilité de la matrice cimentaire avec le liège et la possibilité de mise en œuvre de ce type de béton et d'étudier ces propriétés à l'état frais et à l'état durci afin de tirer les conclusions concernant l'utilisation de ce type de matériau dans la construction.

A terme de cette étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

➤ Sur le plan des propriétés du liège et de son éventuelle utilisation comme granulats légers, nous pouvons dire que le liège, en particulier le liège expansé, présente plusieurs propriétés physiques et thermiques qui le qualifie parmi les meilleurs matériaux utilisés en construction. En effet il est apprécié pour son origine entièrement naturelle et ses qualités physiques: faible poids, grande résistance mécanique, élasticité, imperméabilité à l'eau, imputrescible, antistatique, isotherme, résiste relativement bien au feu, bon isolant thermique, acoustique et vibratoire et résistant à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Il est difficilement inflammable, souple et se décompose lentement. Il est résistant en compression et indéformable. Il résiste très bien au temps et il est largement utilisé dans le domaine de construction.

➤ En matière de préparation et de mise en œuvre et comme tous les matériaux à base de granulats d'origine végétale, la préparation de béton ou de mortier à base de liège nécessite un pré-mouillage des granulats avant l'opération de malaxage. Ceci évitera qu'une partie de l'eau destinée à l'hydratation du ciment soit absorbée par les granulats de liège. L'élaboration des bétons calcaires allégés par les granulats de liège à des pourcentages volumiques allant de 20 à 70% avec un pas de 10% a montré qu'au delà de 60%, le béton perd totalement sa maniabilité et il est pratiquement difficile de le mettre en moule. Pour des pourcentages inférieurs à 60%, la maniabilité est faible et nécessite l'ajout d'un superplastifiant.

➤ Sur l'aspect de la liaison granulat-matrice, l'analyse structurale et l'analyse au MEB réalisées sur des échantillons élaborés a permis d'observer une bonne adhérence des granulats avec la matrice et ceci à cause de la rugosité de la surface extérieure des granulats.

➤ Sur le plan compatibilité du liège avec le ciment, l'analyse spectroscopique a permis de remarquer que l'incorporation des granulats de liège dans la matrice cimentaire n'a pas

d'effet sur l'hydratation du ciment et par conséquent il est parfaitement compatible avec le ciment.

➤ L'étude des propriétés physiques du béton durci a permis de mettre en valeur l'apport considérable du liège en matière d'allègement des bétons élaborés en réduisant la densité d'un taux de **70%**. L'aspect négatif de l'incorporation des granulats de liège réside dans le retrait total qui s'avère important.

➤ Les essais thermo-mécaniques révèlent le pouvoir isolant des bétons de liège; en effet, l'incorporation des granulats de liège a permis de réduire la conductivité thermique à des faibles valeurs atteignant **0.13W/m.°K** et permettant ainsi l'amélioration du pouvoir isolant de **88%**. En revanche et malgré que les résistances mécaniques ont chuté considérablement, elles restent au dessus des seuils limites permettant ainsi leur utilisation comme matériaux isolants porteurs et isolants.

Chapitre V:

Etude de l'effet de taille sur les
propriétés du béton de liège

V.1. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à l'étude de l'effet de taille des granulats de liège sur les caractéristiques physicomécaniques et thermiques. Trois classes granulaires sont utilisées : 0/3, 3/8 et 8/15mm. Il s'agit de voir l'influence de la grosseur des grains sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci, en particulier l'affaissement et l'ouvrabilité pour le béton frais et les résistances mécaniques et les performances thermiques pour le béton durci. Bien évidemment le dosage en granulats est toujours pris en considération.

V.2. Dosages et différentes compositions des bétons de liège

Les dosages en différents matériaux utilisés dans l'élaboration des bétons ont été établis précédemment. Il faut noter que dans l'étude de faisabilité il a été remarqué qu'il y avait perte de maniabilité des bétons frais au fur et à mesure qu'on ajoute d'avantage de liège; cela est pratiquement observé dans tous les bétons légers (Al-Noury et al., 1990; Spiesz et al., 2013; Topçu et Işıkdag, 2008; Sim et al., 2013). Pour y remédier, on a utilisé un super plastifiant Granitex SP 40 à des dosages croissant SP/Ciment et en commençant par un dosage minimum de 0.5% pour le béton le moins allégé jusqu'à une valeur maximale de 3% pour le béton le plus allégé.

En se reposant sur les problèmes rencontrés dans l'étude de faisabilité, nous avons vu qu'il est impossible de dépasser le dosage en granulats de 70%; à cet effet on s'est limité dans ce chapitre au dosage maximum de 60%.

V.3. Interprétation des résultats

Dans tout ce qui suit, on adoptera les abréviations suivantes :

BCL0 : Béton de calcaire léger relatif au dosage 0% ou encore Béton témoin.

BCLL0/3 : Béton de calcaire léger au liège de granulométrie 0/3

BCLL3/8 : Béton de calcaire léger au liège de granulométrie 3/8

BCLL8/15 : Béton de calcaire léger au liège de granulométrie 8/15

BCLL 3/8 50%: Béton au calcaire léger au liège de granulométrie 3/8 allégé de 50%.

V.3.1. Caractérisation du Béton à l'état frais

V.3.1.1 Maniabilité

Les mesures de l'affaissement du béton à l'état frais au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au manibilimetre LCPC sont illustrés dans le et sur la figure V.1

Les BCLL présentent des valeurs de l'affaissement assez faibles. L'affaissement est nul pour les dosages les plus élevés et les temps d'écoulement au manibilimetre LCPC sont de plus en plus longs.

Tableau V.1: Valeurs de l'affaissement et du temps d'écoulement des BCLL

	Affaissement (cm)			Temps de maniabilité (s)		
	Granulo 0/3	Granulo 3/8	Granulo 8/15	Granulo 0/3	Granulo 3/8	Granulo 8/15
0	7			6		
20	6,5	6	5	7	8	8
30	5	4	3,5	9	10	12
40	3	2	1,5	13	17	21
50	1,5	1	1	20	23	26
60	0	0	0	25	27	30

Sur la **figure V.1** représentant l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en granulats de liège, on voit bien qu'il y a perte de maniabilité au fur et à mesure qu'on augmente le dosage en granulats de liège, cela est pratiquement observé pour tous les types de béton de granulats légers (Farghal et Hilal, 2014; Chi et al., 2003; Kim et al.,2012; Boudchicha, 2007; Miled 2005; Magniont et al. 2011). Les variations de l'affaissement en fonction du dosage en granulats de liège montrent que les BCLL0/3 présentent une meilleure maniabilité par contre les BCLL8/15 sont les plus difficilement à mettre en œuvre.

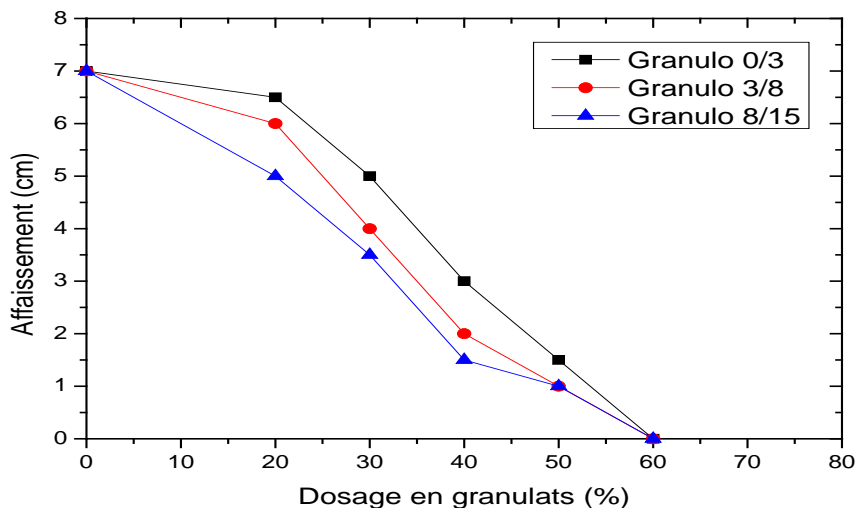


Figure V.1: Variation de l'affaissement des bétons frais en fonction du dosage en granulats

L'effet de taille sur la maniabilité des bétons de granulats liège est similaire à celui observé pour tous les types de béton de granulats légers selon plusieurs auteurs (De Larrard 2000; Short et Kinniburgh 1963; Ćosić et al. 2015; Karade, Irle, et Maher 2006; N. Liu et

Chen 2014; Amoroso et Bacatselos 1979; Barrioulet et Legrand 1978); plus la taille des granulats légers est petite plus la maniabilité des bétons est bonne.

V.3.1.2 Densité des BCLL à l'état frais

Les variations de la densité à l'état frais en fonction du dosage en granulats et selon la granulométrie sont représentées sur la figure V.2. Elles montrent qu'elle diminue toujours en fonction du dosage en granulats; ceci est observé pour tous les types de béton de granulats légers (Al-Noury, Mirza, et Huq 1990; Breyse et al. 1997; Chi et al. 2003; Berra et Ferrara 1984). D'autre part, on voit que les BCLL8/15 présentent les densités les plus faibles en particulier pour les dosages les plus grand en granulats, ensuite les BCLL3/8 et en fin les BCLL0/3 avec des densités relativement supérieures. Cela est du à la différence de porosité entre les différentes tailles de granulat et à la maniabilité des BCLL. Effectivement les BCLL8/15 qui sont les moins maniables présentent des vides, visibles à l'œil nu pour le dosage élevé en granulats. En revanche les BCLL0/3 sont les plus denses grâce à leur bonne maniabilité; elles donnent des valeurs comprises entre 1769 et 670 kg/m³.

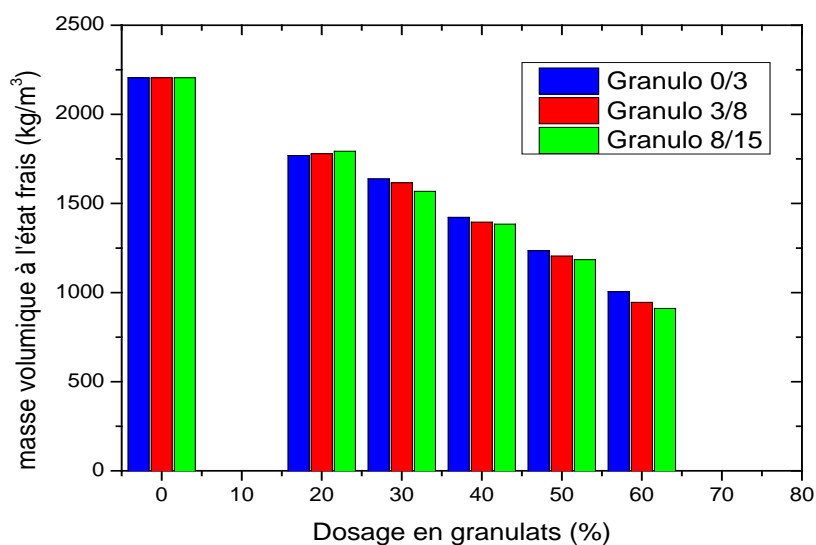


Figure V.2: Variation de la masse volumique des BCLL en fonction du dosage en granulats de liège.

V.3.2. Caractérisation du béton durci

V.3.2.1 Répartition et liaison matrice- granulats

Les photos prises sur des coupes d'échantillons avant écrasement montrent une répartition plus ou moins bonne des granulats dans la matrice (figure V.3). Elle est assez bonne pour les dosages élevés en granulats et qui revient à la technique de malaxage adoptée. On remarque que les BCLL3/8 présentent une meilleure homogénéité que les BCLL0/3 et les BCLL8/15

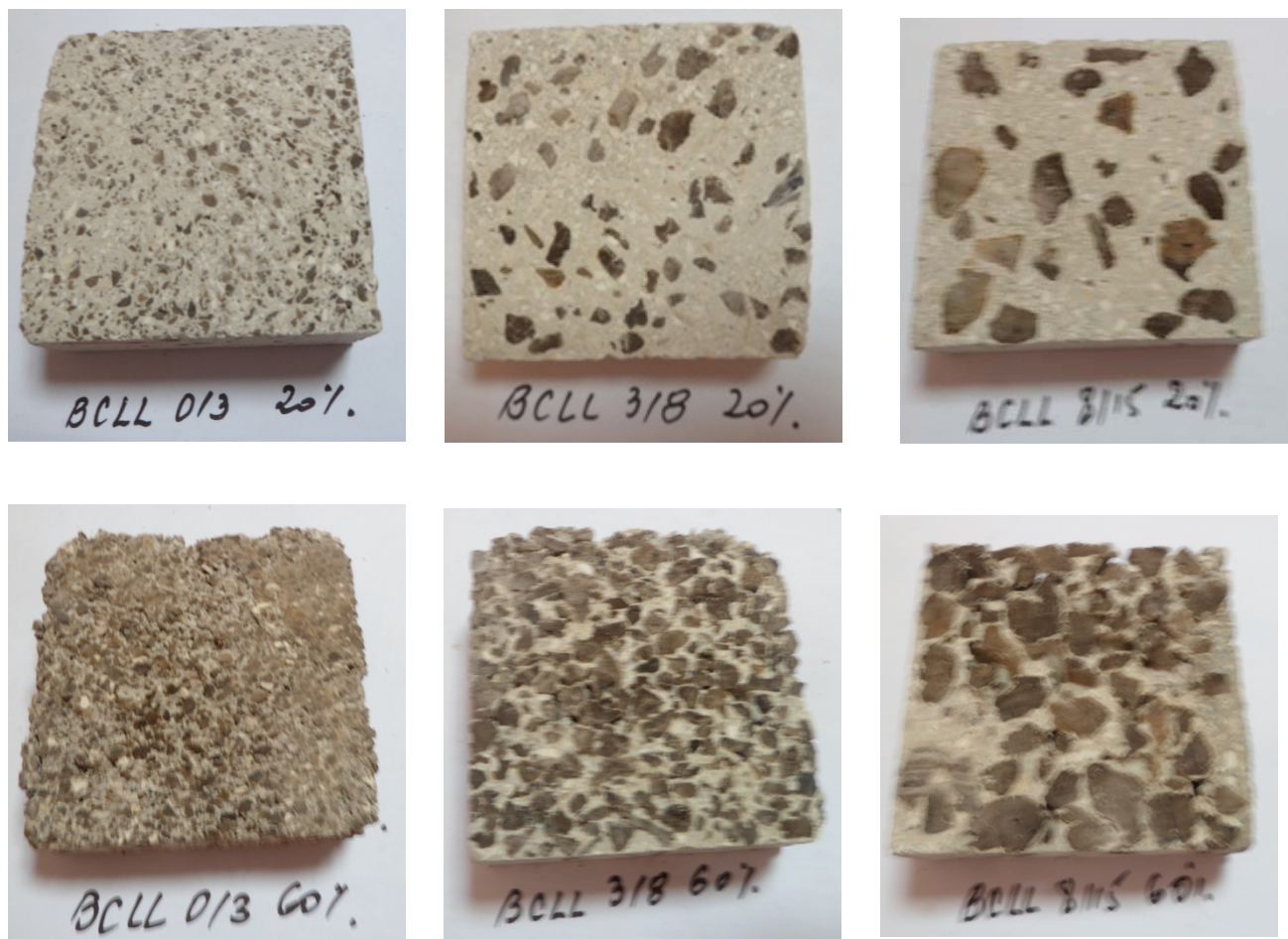


Figure V.3: Photos des coupes des échantillons de BCLL

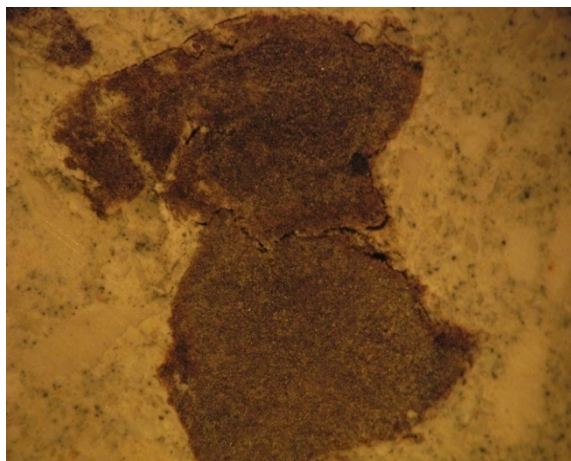
Afin de bien voir la liaison matrice-granulats de liège, des coupes d'échantillons ont été visionnées à l'aide d'un microscope Zeiss 80X avec un agrandissement 40X (**figure V.4**)



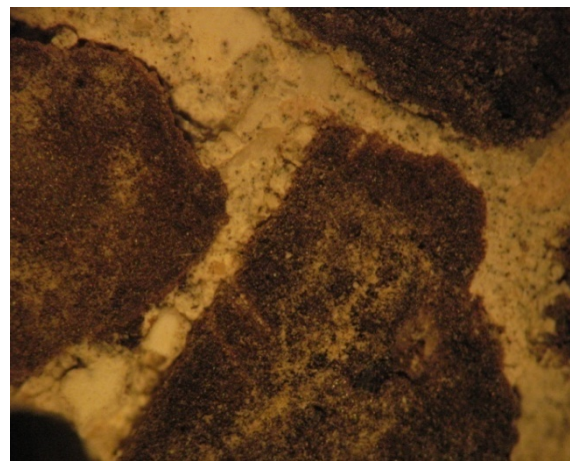
BCLL 0/3 20% X40



BCLL 0/3 50% X40



BCLL 3/8 20% X40



BCLL 3/8 50% X40



BCLL 8/15 20% X40



BCLL 8/15 50% X40

Figure V.4: photos des vues des échantillons de BCLL au microscope X40

D'après les photos des vues au microscope, on peut voir que la liaison granulats-matrice est plus ou moins assez bonne; on peut voir aussi les petites fissures des granulats qui représente la porosité interconnectée des granulats de liège. Ces observation pourront certainement expliquer par la suite l'évolution du phénomène de retrait ainsi que les aspects de rupture des échantillons de BCLL.

V.3.2.2 Caractéristiques physiques et thermiques

➤ Densité

Les variations des densités des bétons élaborés en fonction du dosage et de la granulométrie sont présentées dans le **tableau V.2** et sur la **figure V.5**.

Tableau V.2: Valeur des densités des BCLL

dosage	Granulométrie 0/3	Granulométrie 3/8	Granulométrie 8/15
0	1,986	1,986	1,986
20	1,69	1,63	1,61
30	1,53	1,42	1,33
40	1,21	1,26	1,18
50	1,1	1,03	0,89
60	0,92	0,805	0,69

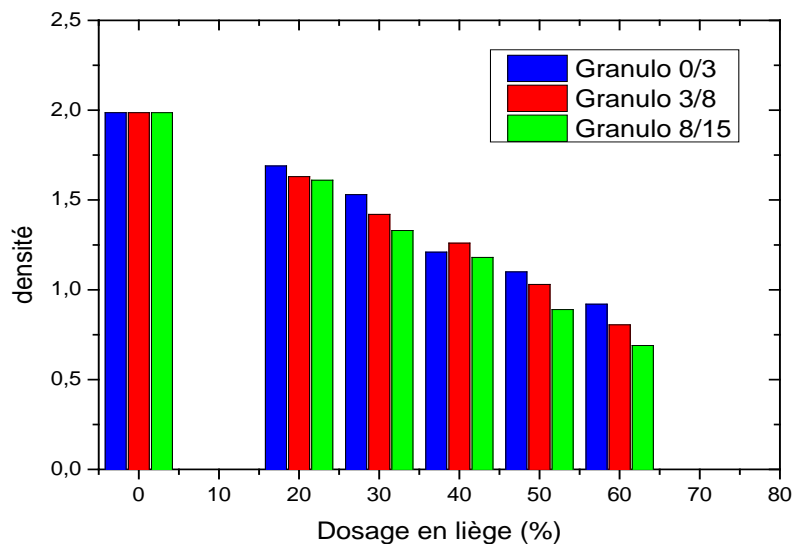


Figure V.5: Variation de la densité des BCLL en fonction du dosage

Les variations de la densité des BCLL en fonction du dosage en granulats de liège et selon la granulométrie montrent que la densité diminue en fonction du dosage; l'allure est pratiquement linéaire la densité atteint sa valeur minimale de **0.690** pour le dosage maximale de 60% avec une réduction de **65%** de la densité du BCLL0. Les BCLL8/15 présentent des faibles densités relativement à celles des BCLL0/3 et des BCLL3/8. Cela est dû probablement à leur faible compacité liée à leur mauvaise maniabilité et à la grande porosité des granulats 8/15 par rapport à celle des 3/8 et 0/3. Plus la granulométrie des grains est grande et moins la densité est faible. Cette variation est observée pratiquement pour tous les bétons de granulats légers selon plusieurs auteurs (Ćosić et al. 2015; Karade, Irle, et Maher 2006; N. Liu et Chen 2014; Topçu et Işıkdag 2008).

➤ **Conductivité thermique**

Les Variations des conductivités thermiques des BCLL en fonction du dosage et de la taille des granulats de liège et pour les deux environnements sont présentées dans le **tableau V.3**. Il se montre que les valeurs sont comprises entre une valeur maximale de **0.760 W.m⁻¹.K⁻¹** et une valeur minimale de **0.1306 W.m⁻¹.K⁻¹**.

Tableau V.3: Valeurs des conductivités thermiques des BCLL

dosage	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)					
	Granulométrie 0/3		Granulométrie 3/8		Granulométrie 3/8	
	Sec	Sat	Sec	Sat	Sec	Sat
0	1,1103	1,25646	1,1103	1,25646	1,1103	1,25646
20	0,7313	0,8745	0,6894	0,76086	0,582	0,6451
30	0,5649	0,6768	0,5168	0,5879	0,4519	0,4956
40	0,4532	0,5892	0,3912	0,4363	0,316	0,3385
50	0,3427	0,4115	0,2348	0,3051	0,2089	0,27594
60	0,2638	0,3251	0,1537	0,1883	0,1306	0,2047

Les variations des conductivités thermiques des BCLL en fonction des dosages en granulats et selon le mode de cure sont présentées sur les **figures V.6-7-8**.

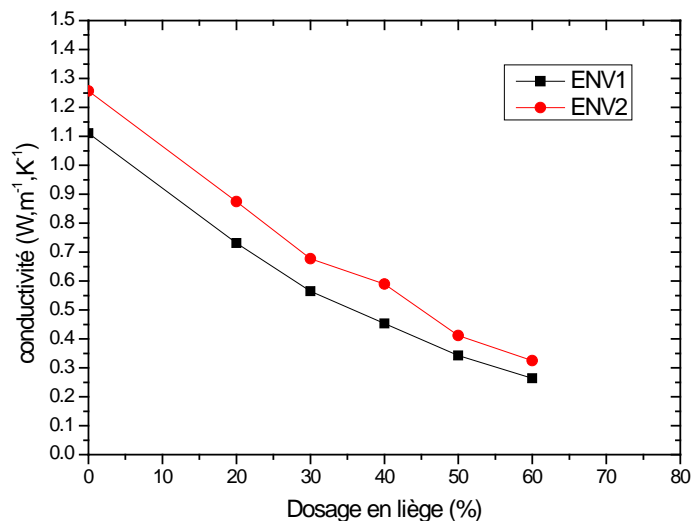


Figure V.6: Variation de la conductivité des BCLL0/3 en fonction du dosage

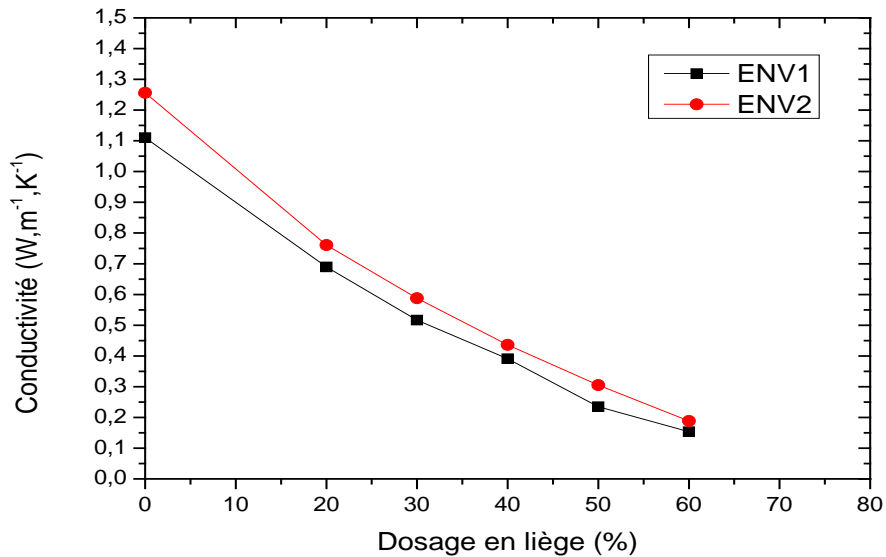


Figure V.7: Variation de la conductivité des BCLL3/8 en fonction du dosage

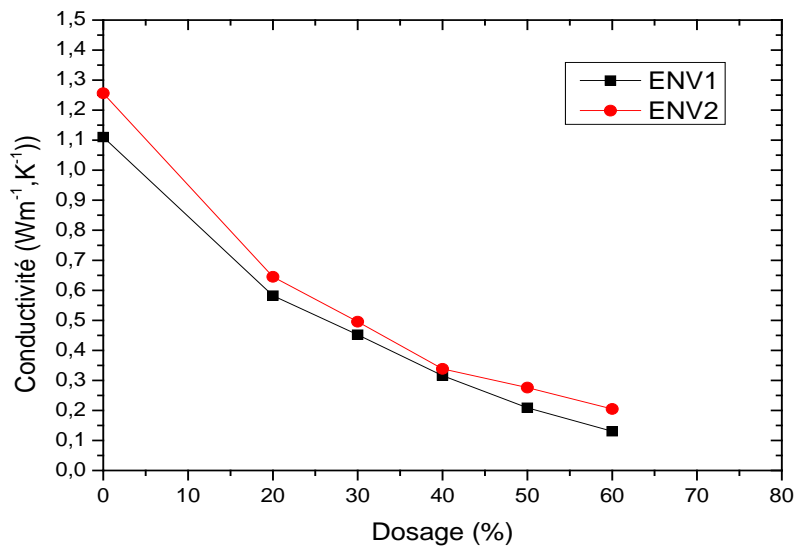


Figure V.8: Variation de la conductivité des BCLL8/15 en fonction du dosage

Pour les trois types des granulats on voit que la conductivité thermique décroît en fonction du dosage en granulat, cela est dû au fait qu'on a remplacé de plus en plus une entité de matrice qui est moins isolante par une entité en granulats légers plus isolante. Une chute de conductivité thermique est remarquée entre le béton témoin et les bétons les moins allégés, elle représente des taux respectivement pour 0/3, 3/8, 8/15 de **34%, 38%, 48%**. Les BCLL saturés ont des conductivités supérieures à celles à l'état sec. Cela est générale pour tous les types de matériaux (Short et Kinniburgh 1963; Bessenouci et al. 2011; Pretot et al. 2009; Degiovanni 1994). Si on présente les variations des conductivités thermiques selon la

granulométrie (**figure V.9**), on voit que les BCLL8/15 ont les valeurs des conductivités thermiques les plus faibles avec une valeur minimale de $0.1306 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ avec une réduction de **88%**, ensuite les BCLL 3/8 avec des conductivités plus grandes et les BCLL 0/3 ont les plus grandes conductivités thermiques. En se référant à plusieurs auteurs (**N. Liu et Chen 2014; Nepomuceno et Silva 2014; Sim, Yang, et Jeon 2013; Tang, Cui, et Wu 2014**), plus les granulats sont de grande taille plus la conductivité thermique est faible. Cela s'explique par le fait d'une part que les plus gros granulats présentent des porosités plus grandes et d'autre part de la faible compacité des bétons élaborés avec des gros granulats.

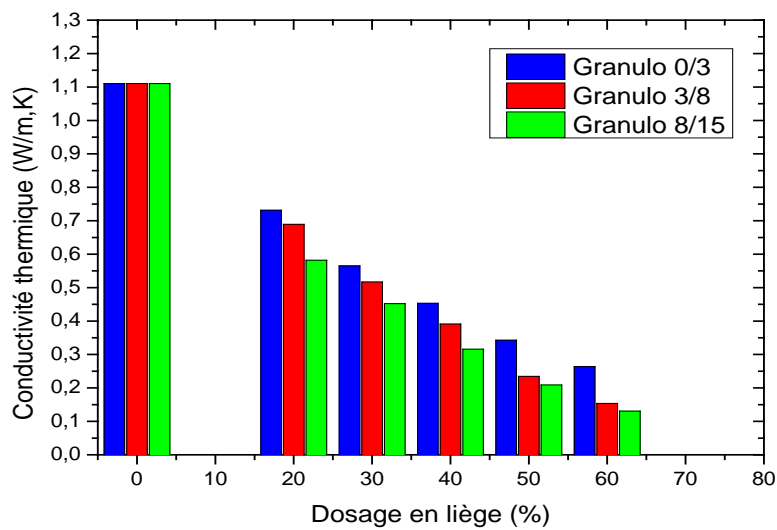


Figure V.9: Variation des conductivités thermiques des BCLL en fonction du dosage

Il est intéressant de voir les variations des la conductivité thermique en fonction de la densité et qui sont présentées sur la **figure V.10**.

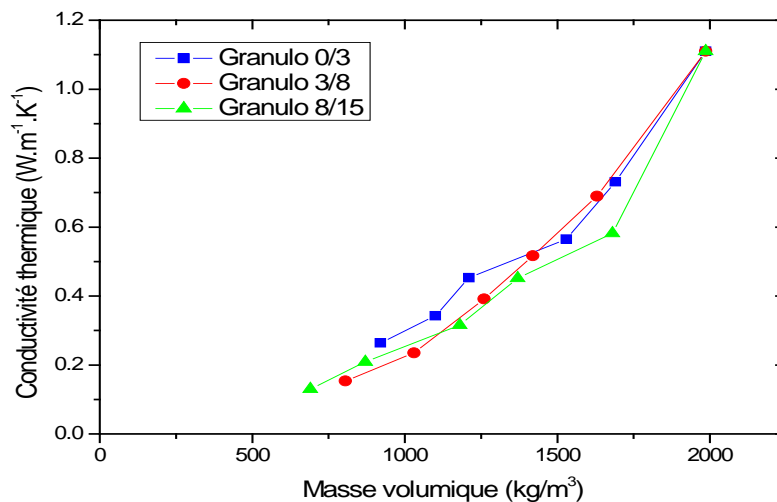


Figure V.10: Variation de la conductivité thermique des BCLL en fonction de leurs masses volumiques

Nous pouvons aisément remarquer que quelque soit l'état des bétons étudiés sec ou saturé, leur conductivité thermique s'accroît proportionnellement avec la masse volumique (**Bories et Prat, 1995; Izard 2006; De-Carvalho et al., 2013; Kan et Demirboğa, 2009**). En effet, d'une part la densification croissante des matériaux bouche les pores et élimine l'air qui s'y trouve. Ce dernier possède une conductivité thermique inférieure aux conductivités thermiques des matrices solides, et d'autre part, plus le matériau est compact (dense), plus il comporte des particules élémentaires susceptibles de transporter de l'énergie thermique. Or, la conductivité thermique représente la somme algébrique de la contribution de chacune de ces particules à la conduction au sein du matériau.

➤ **Capacité calorifique**

Les variations des capacités calorifiques sont présentées dans le **tableau V.4**. Les valeurs des capacités calorifiques des BCLL sont supérieures à celle du béton témoin pour les deux environnements; cela est due au pouvoir d'emmagasinement de la chaleur de la matière cellulosique qui empêche la diffusion de la chaleur. Au fur et à mesure que la quantité de matrice diminue la capacité calorifique augmente (**Bur 2012; Lakreb 2015; Haynes 1978; Chandra et Berntsson 2002; Lecourt, Petri Jetsu, et Vincent Barraud 2014**). Les valeurs affichent une capacité calorifique minimale de **1295.3 $J.kg^{-1}.K^{-1}$** correspondant à un taux d'augmentation de **4%** et d'une capacité maximale de **1890.5 $J.kg^{-1}.K^{-1}$** correspondant à un taux d'augmentation de **48%**.

Tableau V.4: Valeur des capacités calorifiques des BCLL

dosage	Valeurs des capacités calorifiques ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)					
	0/3		3/8		8/15	
	Sec	Sat	Sec	Sat	Sec	Sat
0	1254,2	1310,2	1254,2	1367,7	1254,2	1367,7
20	1295,3	1330,7	1300,7	1381,2	1403,4	1465,2
30	1320,5	1389,5	1350,2	1410,5	1489,2	1530
40	1360	1420,5	1390,5	1470,2	1501,7	1560,3
50	1398,4	1507,1	1435,2	1470	1540,5	1600,8
60	1495	1611,4	1510	1571,9	1709,4	1730,4

Afin de voir l'influence de la granulométrie sur la capacité calorifique, les valeurs de cette dernière en fonction du dosage et selon la granulométrie sont présentées sur la **figure V.11**

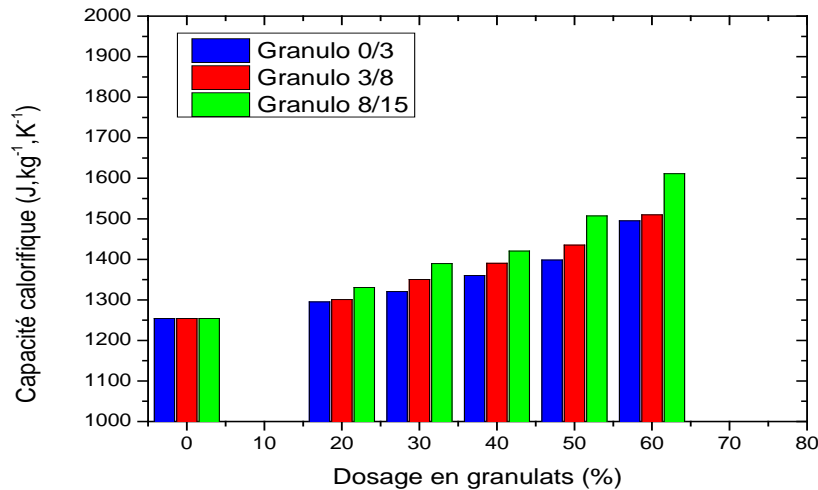


Figure V.11: Variation de la capacité calorifique en fonction du dosage

Ces Variations montrent que La capacité des BCLL augmente avec le dosage en granulats de liège. Les BCLL8/15 présentent les plus grandes capacités et les BCLL0/3 les plus faibles. La capacité calorifique varie en sens inverse avec la conductivité thermique, c'est-à-dire que le matériau est d'autant plus isolant que sa capacité calorifique est grande (Ollivier et Torrenti 2008; Short et Kinniburgh 1963; Degiovanni 1994; Izard 2006).

➤ **Diffusivité thermique**

Les valeurs des diffusivités thermiques des BCLL sont présentées dans le **tableau V.5**.

Tableau V.5: Valeurs des diffusivités thermiques des BCLL

dosage	Valeurs des diffusivités thermiques (m^2/s)					
	0/3		3/8		8/15	
	Sec	Sat	Sec	Sat	Sec	Sat
0	0,639	0,8042	0,639	0,8042	0,639	0,8042
20	0,5123	0,5312	0,5399	0,5648	0,5391	0,5489
30	0,4519	0,5123	0,4727	0,4889	0,4612	0,4932
40	0,3677	0,421	0,403	0,5913	0,3815	0,4246
50	0,3275	0,3816	0,3641	0,3897	0,3459	0,3714
60	0,3089	0,3412	0,34	0,3712	0,3298	0,3312

Ces valeurs montrent que la diffusivité Des BCLL diminue lorsque le dosage en granulats de liège augmente et que les conditions de cure ont un effet sur la diffusivité; la cure à l'eau augmente celle-ci. En passant du dosage minimum au dosage maximum en granulats, la diffusivité chute en moyenne de 55%.

Afin de voir l'effet de la granulométrie, les valeurs des diffusivités des BCLL en fonction du dosage en granulats et selon la granulométrie sont représentées sur la **figure V.12**.

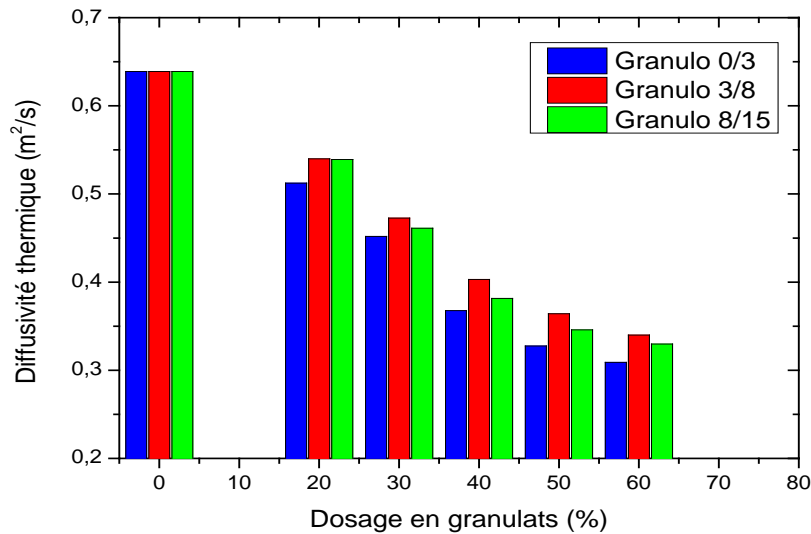


Figure V.12: Variation de la diffusivité thermique des BCLL en fonction du dosage

Les BCLL0/3 présentent les diffusivités les plus faibles, cela peut être du à la présence des particules fines qui ont tendance à ralentir le passage du flux de chaleur dans le matériau

V.3.2.3 Caractéristiques mécaniques

➤ Résistance à la compression

Les valeurs des résistances à la compression des BCLL élaborés en fonction du dosage en granulats de liège et selon la granulométrie sont présentées dans le **tableau V.6**.

Tableau V.6: Valeurs des résistances à la compression des BCLL

dosage	Valeurs des Résistance à la compression des BCLL (MPa)					
	Granulo 0/3		Granulo 3/8		Granulo 8/15	
	Sec	Sat	Sec	Sat	Sec	Sat
0	24,4	27,8	24,4	27,8	24,4	27,8
20	8,25	9,81	12,22	13,86	9,97	11,32
30	4,02	5,22	8,06	9,31	6,04	6,43
40	2,05	2,41	5,32	5,06	3,89	4,38
50	1,13	1,56	3,41	3,65	2,47	2,69
60	0,72	0,52	0,91	1,12	0,82	1,02

D'après le **Tableau V.6** on voit que Les BCLL ont des résistances à la compression nettement inférieurs à celle du béton témoin avec un taux de réduction minimum de 50%. Le dosage maximum en granulats fait chuter la résistance d'un taux maximum de 96%.

Les graphes présentés sur les **figures V.13, 14, 15** montrent l'effet de la cure des BCLL sur la résistance à la compression. On voit bien que la cure à l'eau améliore la résistance, cette amélioration est significative pour les dosages faibles et cela parfaitement logique du faite que la cure à l'eau à un effet sur la matrice.

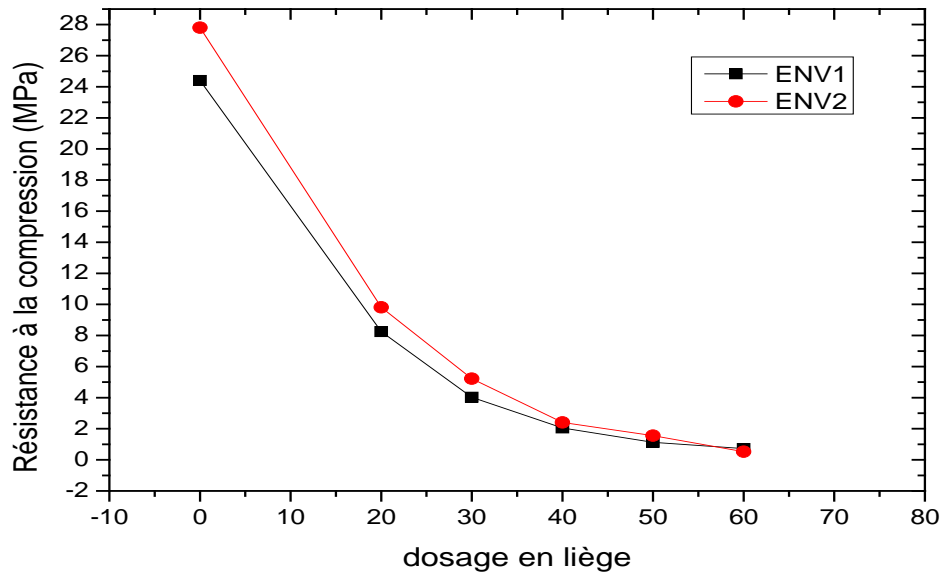


Figure V.13: Variation de la résistance à la compression des BCLL 0/3 en fonction du dosage

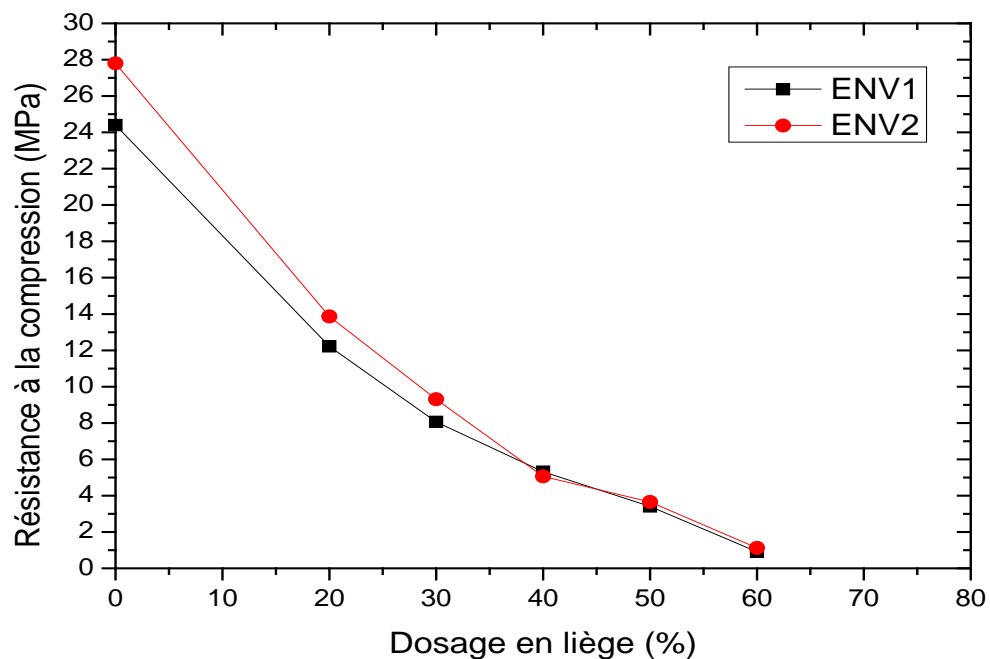


Figure V.14: Variation de la résistance à la compression des BCLL 3/8 en fonction du dosage

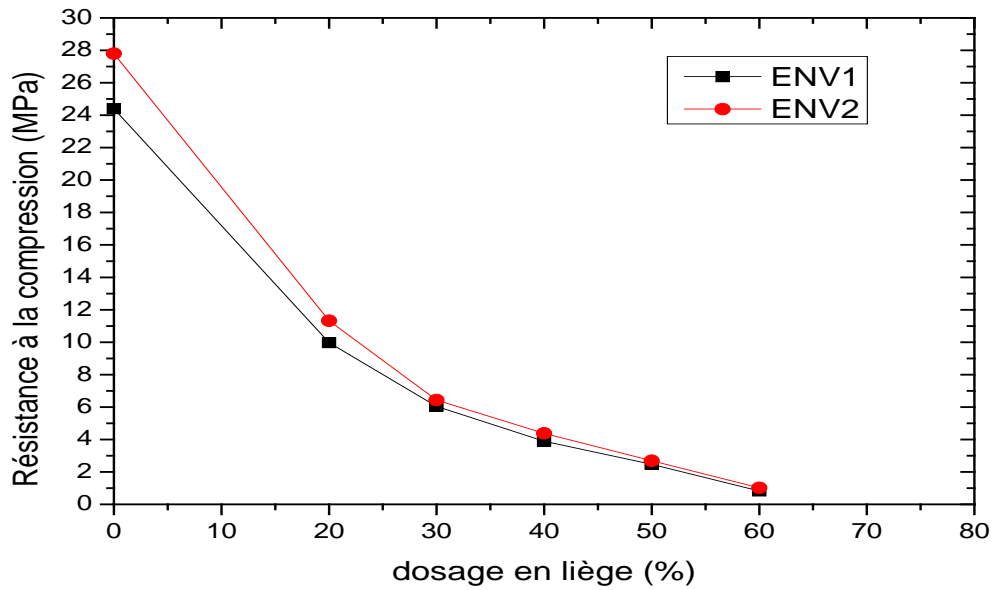


Figure V.15: Variation de la résistance à la compression des BCLL 8/15 en fonction du dosage

La figure V.16 présente les variations de la résistance à la compression en fonction du dosage en granulats et selon la granulométrie. On voit bien que la résistance décroît en fonction du dosage et l'effet de taille est bien visible. La granulométrie 3/8 présente les meilleures résistances que celles des 0/3 ou 8/15. D'après la littérature la résistance à la compression des bétons de granulats légers est inversement proportionnelle à la taille des granulats. Pour notre cas la résistance des BCLL3/8 est supérieure à celle des BCLL8/15 mais cette constatation n'est pas vérifiée pour les BCLL 0/3 ceci est due probablement à la quantité de particules fines dans les granulats 0/3 qui ont un effet négative sur la résistance.

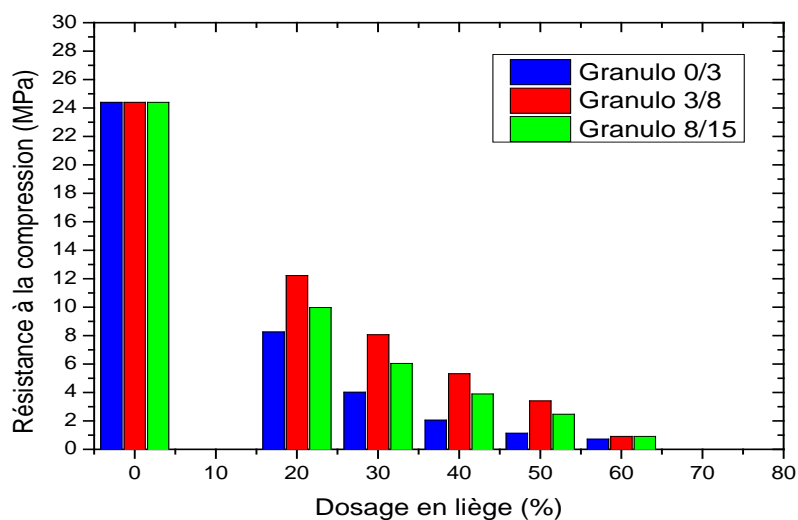


Figure V.16: Variation de la résistance à la compression des BCLL en fonction du dosage

Nous pouvons établir la relation entre la résistance à la compression et la masse volumique sur la figure V.17

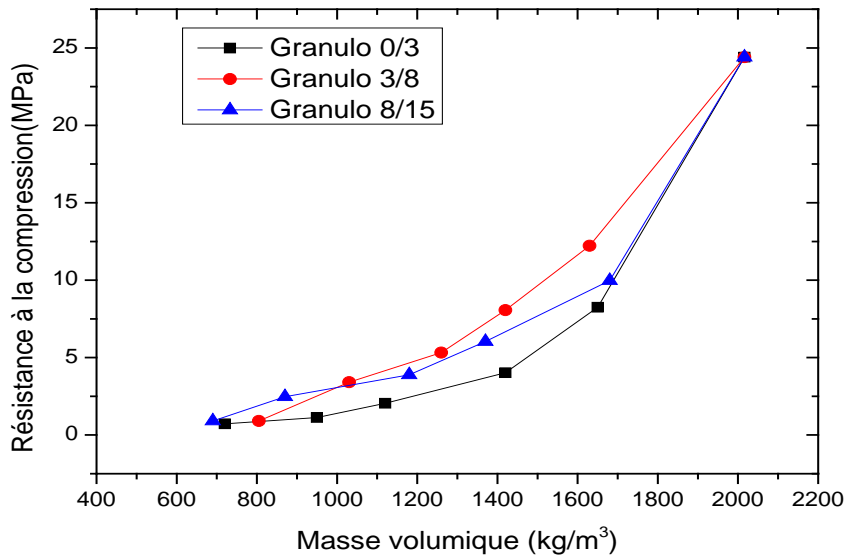


Figure V.17: Variation de la résistance à la compression des BCLL en fonction de la masse volumique

L'allure des courbes des résistances est parabolique et on voit bien que la résistance à la compression augmente avec la masse volumique.

➤ **Résistance à la flexion :**

Les valeurs des résistances à la flexion des BCLL sont présentées dans le **tableau V.7**

Tableau V.7: Valeurs des résistances à la flexion des BCLL

	Valeurs des Résistance à la flexion des BCLL (MPa)					
	Granulo 0/3		Granulo 3/8		Granulo 8/15	
dosage	Sec	Sat	Sec	Sat	Sec	Sat
0	4,48	4,92	4,48	4,92	4,48	4,92
20	1,59	1,76	2,18	2,59	2,61	2,86
30	0,78	0,66	1,27	1,41	1,48	1,58
40	0,508	0,56	0,91	0,98	0,95	1,19
50	0,37	0,49	0,69	0,89	0,67	0,95
60	0,25	0,32	0,53	0,63	0,42	0,58

Identiquement à la résistance à la compression, La résistance à la flexion des BCLL diminue en fonction du dosage en granulats. Elle chute d'une valeur de **4.48 MPa** pour le béton témoin à une valeur de **1.59 MPa** pour les BCLL 0/3 avec un taux de réduction de **65%** pour atteindre une valeur minimum de **0.14 MPa** avec un taux de réduction de **97%**. La cure à

l'eau améliore la résistance à la flexion. En présentant les variations de la résistance à la flexion en fonction du dosage sur la **figure V.18**, on peut voir l'effet de la granulométrie sur cette résistance.

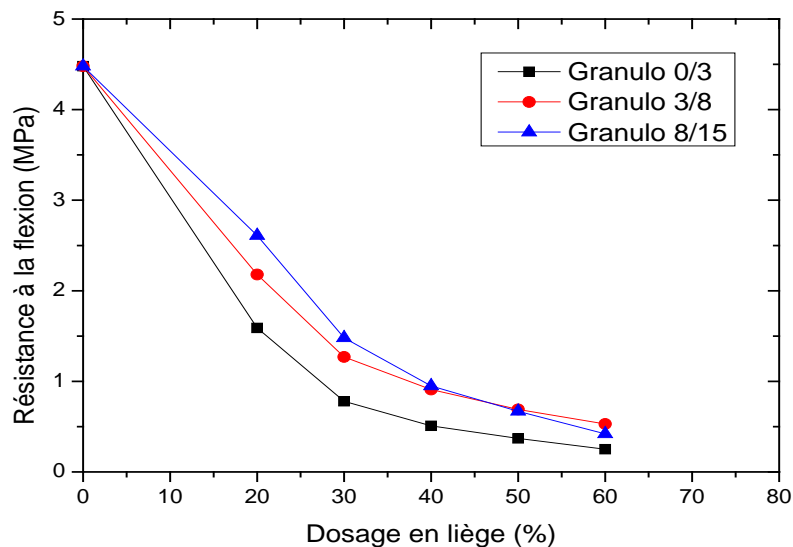


Figure V.18: Variation de la résistance à la flexion des BCLL

La figure montre que les BCLL8/15 ont les meilleures résistances à la flexion par rapport aux BCLL3/8 et les BCLL0/3, mais à partir des dosages de 40% en liège on remarque que les BCLL3/8 ont un gain de résistance. Ceci est probablement dû à la compacité des BCLL8/15 pour les grands dosages.

V.3.2.4 Analyse thermomécanique

L'une des caractéristiques les plus importantes dans le choix d'un matériau de construction est évidemment la résistance mécanique. En termes de matériau d'isolation et de construction -isolation, la qualité recherchée pour un matériau de construction est une résistance thermique maximale, à laquelle s'ajoute une résistance mécanique élevée. Notre but est principalement l'amélioration des qualités thermiques du béton en lui intégrant des matériaux isolants, tout en conservant des performances mécaniques suffisantes. Cela est pratiquement impossible pour pratiquement tous les bétons de granulats légers parce qu'en générale les performances mécaniques varient en sens inverse avec les performances thermiques. Donc, il est convenable de trouver un compromis entre ces deux types de performances. Le critère lié à l'utilisation du béton doit être pris en considération. Pour notre cas d'étude, il s'agit de matériau de construction et d'isolation et un matériau d'isolation dont les performances sont établis par la commission Rilem (**tableau V.8**).

Tableau V.8: Classification fonctionnelle des bétons légers selon la Rilem

Classe	I	II	III
Type de béton léger	Béton léger de construction	Béton léger de construction et d'isolation	Béton léger d'isolation
Masse volumique (kg/m ³)	< 1800	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	—	< 0.75	< 0.30

Afin de parvenir aux objectifs de cette étude on peut résumer l'ensemble des caractérisations des BCLL pour le dosage moyen 40% et le dosage maximum 60% dans le **tableau V. 9**

Tableau V.9: Caractéristiques des BCLL

Dosage	Masse volumique (Kg/m ³)		Résistance à la compression (MPa)		Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	
	40%	60%	40%	60%	40%	60%
BCL0	1986		24.4		1.1103	
BCLL 0/3	1210	920	2.05	0.72	0.4532	0.2638
BCLL 3/8	1260	805	5.32	0.91	0.3912	0.1537
BCLL 8/15	1180	690	3.89	0.91	0.3106	0.1306

En se référant aux interprétations précédentes des différentes caractéristiques ainsi qu'aux valeurs du **tableau V.9** on peut dire que les BCLL dont le dosage est inférieur à 40% peuvent être utilisés comme matériaux isolants de construction. Dans ce cas, les BCLL 3/8 présentent des performances mécaniques largement meilleures que celles des BCLL 0/3 et des BCLL 8/15, mais en matière de performances thermiques elles ne sont pas assez mauvaises. Pour les BCLL dont le dosage est supérieur à 40% et en se référant à leurs caractéristiques physico-mécaniques on peut les utiliser comme matériaux isolants. Leurs caractéristiques mécaniques sont dans la norme. Les BCLL3/8 ont toujours les meilleures résistances. En revanche leurs performances thermiques restent acceptables.

Afin de voir bien cette comparaison, nous donnons la variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique (**Figure V.19**) dans l'objectif de comparer les différents BCLL et caractériser un domaine où les valeurs de ces deux caractéristiques sont acceptables.

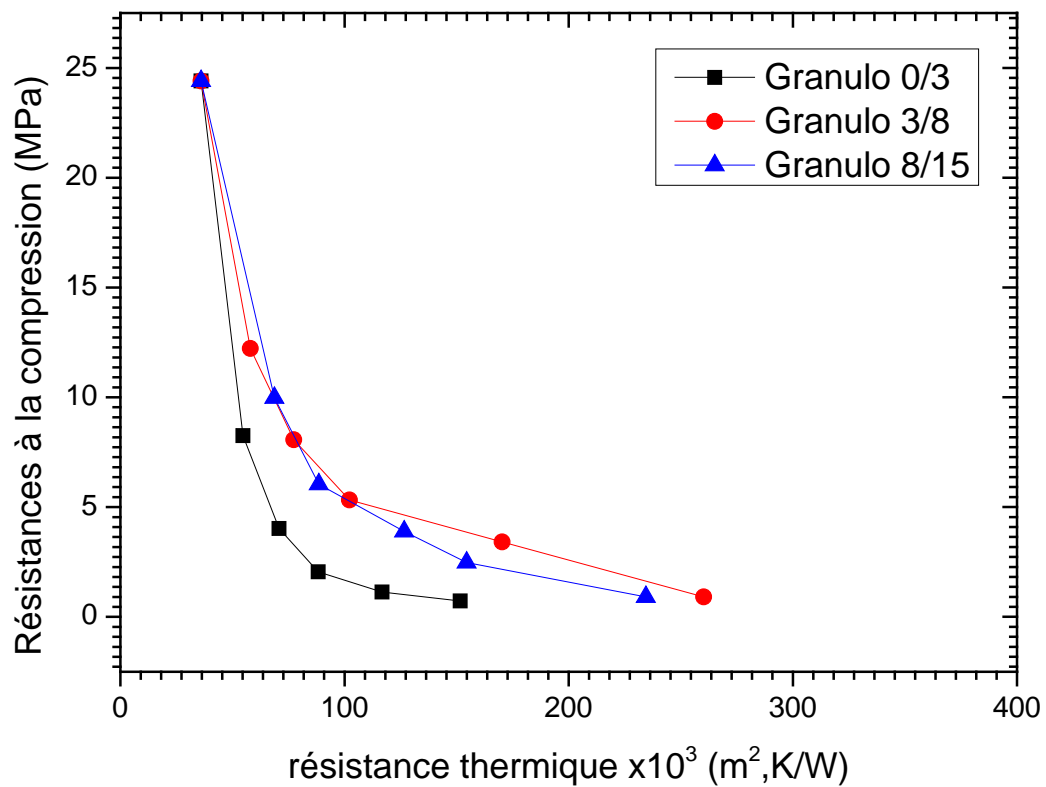


Figure V.19: Variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique

Sachant qu'un matériau est d'autant plus isolant que sa résistance thermique est grande, on peut voir clairement que la courbe des BCLL 3/8 est en dessus de celles des BCLL 0/3 et des BCLL 8/15. En résumé les BCLL 3/8 présentent le meilleur compromis entre performances mécaniques et performances thermiques et par conséquent ils seront les plus recommandés pour une éventuelle utilisation comme matériaux isolants et isolants porteurs.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette étude est de montrer les capacités et les potentialités de développement des matériaux de construction par la valorisation des déchets industriels. Ces déchets sont le sable calcaire et les granulats de liège expansé. L'idée est de substituer des sables siliceux par des sables calcaires issus des résidus de concassage des roches et l'allègement du matériaux par incorporation de granulats de liège expansé. la voie envisagée est l'élaboration d'un béton léger thermiquement isolant susceptible de répondre aux besoins socio-économiques et de satisfaire les objectifs d'économie d'énergie et de la protection de l'environnement. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, dont l'objectif principal est l'étude du comportement physico-mécanique et thermique d'un Béton Calcaire Léger de Liège (BCLL) dans le but d'élaborer un matériau léger isolant qui pourrait être utilisé comme élément de remplissage ou d'isolation.

Ce travail, et en plus d'une synthèse bibliographique, comprend deux parties essentielles, la première consacrée à une étude de faisabilité d'un béton calcaire allégé par des granulats de liège, la seconde porte sur l'étude de l'effet de taille des granulats de liège sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons élaborés. Nous avons consacré la première partie de cette thèse à une étude bibliographique qui a porté en premier lieu sur une revue sur les bétons de granulats légers, en général et les bétons de granulats de liège en particulier. Une synthèse des travaux antérieurs nous a permis de comprendre un certain nombre de phénomènes liés aux composites de granulats de liège. Une étude théorique sur les milieux poreux et le transfert thermique nous a permis par la suite de mieux interpréter nos résultats.

Sur le plan faisabilité de ce type de béton, les essais réalisés sur le béton à l'état frais montrent une mise en œuvre facile pour des dosages faibles en granulats, mais de plus en plus difficile pour des dosages élevés. Cela a nécessité l'utilisation d'un super-plastifiant afin d'augmenter la maniabilité des bétons élaborés. Malgré cela les affaissements au cône d'Abrams sont restés assez faibles et la mise en moule est pratiquement difficile au delà de 60% de granulats. Les analyses chimiques des composites grâce à la spectroscopie infra-rouge ont permis de conclure que liège n'affecte pas l'hydratation du ciment.

Les résultats des essais sur le béton durci nous ont permis de révéler l'apport positif des granulats de liège en matière d'allègement des composites. En effet l'incorporation de 20% en volume de granulats de liège permet de réduire la densité du composite de **18%** et

décroit au fur et à mesure qu'on incorpore du liège. Elle atteint une valeur minimale pour un dosage de 70% de **0.59** correspondant à un taux de réduction de **70%**.

L'incorporation des granulats de liège s'avère beaucoup plus bénéfique sur le plan thermique. Les conductivités thermiques sont de plus en plus faibles relativement au béton de référence. En incorporant d'avantage de granulats on atteint une valeur de **0.13 W.m⁻¹.K⁻¹** correspondant au composite le plus allégé représentant un taux de réduction de **88%** par rapport à celle du béton témoin qui est de **1.11 W.m⁻¹.K⁻¹**. Ajouté à cela des capacités calorifiques assez importantes avec des taux d'amélioration de **36%** par rapport à celle du béton témoin. Quant aux diffusivités thermiques, elles sont de plus en plus faibles atteignant **0,3012x10⁻⁶.m²/s** pour le béton le plus allégé un taux de réduction de **53%** par rapport à celle du béton témoin qui est de **0.639 x10⁻⁶.m²/s**. Des faibles conductivités et diffusivités thermiques associées à des fortes capacités calorifiques sont signe déterminant d'un matériau thermiquement performant et donc pouvant être utilisés comme des éléments de construction isolants et des éléments isolants.

Par ailleurs, l'impact des granulats de liège est négatif sur le retrait et sur les résistances mécaniques, en effet nous avons enregistré des valeurs minimales du retrait final dépassant les **720µm/m** et des valeurs maximales de **1017µm/m** qui représente presque le double de celui du retrait du béton témoin. Néanmoins ces valeurs restent acceptables relativement à celles des bétons à base de granulats végétaux.

Par contre, l'incorporation des granulats de liège a eu un impact considérable sur les résistances mécaniques, en effet nous avons enregistré des chutes de résistance à la compression au fur et à mesure que le taux de liège augmente. Les valeurs de résistance chutent d'une valeur de **24,4MPa** correspondante au béton témoin à une valeur de **12.22MPa** correspondant au béton le moins allégé avec un taux de réduction de **50%**. La valeur minimale de la résistance à la compression est enregistrée pour le dosage maximum de 70%, elle est de **0,56MPa** avec un taux de réduction de **97%**. Toutefois ces résistances restent supérieures aux valeurs limites tolérées par les normes relatives aux bétons légers.

Les essais de mesure du module d'élasticité ont révélé l'effet de l'apport des granulats de liège en matière d'élasticité sur les composite élaborés. Les valeurs obtenues pour les différentes composites montrent que le module d'élasticité diminue au fur et à mesure qu'on ajoute du liège. Elles passent de **28000 MPa** pour le béton de référence (BCLL0) à **8540 MPa** pour le béton le moins allégé (BCLL20) avec un taux de réduction de **69%**. Elle atteint enfin une valeur minimale de **307MPa** correspondante au (BCLL60) avec un taux de réduction de **98%**.

Les résultats de la deuxième partie de cette étude, consacrée à l'étude l'effet de taille s'accordent avec ceux de la littérature. Ils montrent que plus la taille des granulats est petite est plus le béton est maniable. Les photos réalisées sur des coupes d'échantillon ont montré que les bCLL3/8 présentent une bonne répartition et homogénéisation des granulats dans la matrice. Pour les trois granulométries, la liaison matrice-granulats est assez bonne et l'effet de taille sur la densité est parfaitement logique; plus la taille augmente plus la densité diminue.

Pour les caractéristiques thermiques, les résultats ont montré que la conductivité thermique décroît en fonction de la taille des granulats. Les BCLL8/15 ont les valeurs les plus faibles des conductivités thermiques correspondant à une réduction de **88%**, ensuite les BCLL 3/8 avec des conductivités plus grandes. Les BCLL 0/3 ont les plus grandes conductivités thermiques.

Les valeurs des résistances à la compression montrent que les BCLL3/8 ont les résistances les plus élevées avec un taux de réduction de **50%** par rapport au béton témoin, puis les BCLL8/15 correspondant à **59%** de réduction et enfin les BCLL0/3 ont les résistances les plus faibles avec un taux de réduction de **66%**..

Pour la résistance à la flexion les résultats montrent qu'elle diminue lorsque la granulométrie diminue.

Enfin de cette conclusion nous pouvons dire que les matériaux élaborés présentent un profit très intéressant en matière d'isolation. Les propriétés physico-mécaniques et thermique obtenues encouragent le développement de ces matériaux et ouvrent de grandes possibilités de les utiliser comme éléments isolants, que ce soit au niveau des éléments de remplissage ou des éléments préfabriqués d'isolation.

Toutefois, même si cette étude apparait comme un point de départ, d'autres études sont souhaitables et qui peuvent porter sur les axes suivants :

- La modélisation du comportement thermique.
- L'étude approfondie de la structure poreuse du matériau et son influence sur le transfert de masse et de chaleur.
- Le comportement au feu du matériau.
- L'étude de l'isolation phonique des bétons à base de granulats de liège.

Références bibliographiques

- [1] **ACI 213R-87.**(1994). Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan.
- [2] **Abdelhadi, H., Boualla, N., et Guezouli, A. (2013).** Béton léger à base de granulats Pouzzolaniques de Beni Saf et de Polys Béto . Science Li 5 (130406): 1 - 10.
- [3] **Adler, P. (2013).** Porous media: geometry and transports. Elsevier.
- [4] **Al -Noury, So., Wajahat, I., Mirza, H., et Shamsul H. (1990).** Density and strength characteristics of lightweight mortar . Cement and Concrete Composites 12 (2): 79–86.
- [5] **Alshahwany,RBA (2011).** Effect of Partial Replacement of Sand with Limestone Filler on Some Properties of Normal Concrete. Engineering Journal, 19 (3):37-48. 12p.
- [6] **Amorin, S. D.** corecork. www.corecork.amorin.com.
- [7] **Amoroso, G. G., et Bacatselos, D. (1979).** Recherche d'un béton léger à base de polystyrène expansé facile à mettre en œuvre . Matériaux et Construction, 12 (5): 385–392.
- [8] **Aquino, M.J., Zongjin, Li., et Surendra, P. S. (1995).** Mechanical properties of the aggregate and cement interface . Advanced Cement Based Materials, 2 (6): 211–223.
- [9] **Arnould, M., Virlogeux, M., Albenque, M., Cougny, G., Bertrand, R., Gaudon, P., et al. (1986).** Granulats et bétons légers.
- [10] **Aziz, M.A., Murphy, C. K., et Ramaswamy, S. D. (1979).** Lightweight concrete using cork granules. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1 (1): 29–33.
- [11] **Barrioulet, M., et Legrand, C. (1977).** Influence de la pâte interstitielle sur l'aptitude à l'écoulement du béton frais. Matériaux et Construction, 10 (6): 365–373.
- [12] **Barrioulet, M., et Legrand, C. (1978).** Contribution à l'étude du comportement rhéologique des bétons légers frais. Matériaux et Construction, 11 (5): 329–337.
- [13] **Bastgen, K.J., et Hermann, V. (1977).** Experience made in determining the static modulus of elasticity of concrete. Matériaux et Construction, 10 (6): 357–364.
- [14] **Bederina, M. (2007).** Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de Déchets de bois. Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique Alger.
- [15] **Bederina, M., makhloufi, Z., et Quéneudec, M. (2009).** Allégement des bétons de sables locaux par ajout de copeaux de bois traités et non traités - caractérisation physico-mécanique et microstructure. 1st international conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, Enset Oran.
- [16] **Belhadj, B., Bederina, M., Montrelay, N., Houessou J., et Quéneudec M. (2014).** Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete. Construction and Building Materials 66: 247–258.
- [17] **Benachour, Yacine. (2017).** Analyse de l'influence de l'ajout de taux élevé de fillers calcaires sur les propriétés physiques, mécaniques, microscopiques, de transfert et de durabilité des mortiers. thèse de doctorat: université de Constantine.
- [18] **Benazzouk, A., Douzane, O., Thierry, L., Mezreb, K., Labbani, F., et Roucoult, J.M., (2008).** Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment. In XIV Colloque National de la Recherche dans les IUT (*CNRIUT 2008*).

- [19] **Bensted, J. (1983)**. Further hydration investigations involving Portland cement and the substitution of limestone for gypsum. *World cement*, 14(10), 383-392.
- [20] **Berra, M., et Gerardo, F. (1984)**. Propriétés des bétons réalisés avec des granulats de différentes densités. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 30 (1): 339–343.
- [21] **Bessenouci, M. Z., Triki, E. B., Khelladi, S., & Abene, A. (2011)**. Approches théoriques de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l'aide d'une modélisation des matériaux poreux. *Revue des Energies Renouvelables* 14 (3): 427–440.
- [22] **Bessenouci, M. Z. (2010)**. Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
- [23] **Biarez, J., et Hicher, P.Y. (1997)**. Influence de la granulométrie et de son évolution par ruptures de grains sur le comportement mécanique de matériaux granulaires. *Revue française de génie civil*, 1 (4): 607–631.
- [24] **Boaventura, R. A. (2012)**. Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: a review. *Water research*, 46(10), 3152-3166.
- [25] **Bogas, J. A., & Gomes, A. (2014)**. Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica—characterization and normalization. *International Journal of Civil Engineering*, 12(2), 170-180.
- [26] **Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (1994)**. The effect of stone dust content in sand». *Cement and Concrete Research*, 24(3), 580-590.
- [27] **Bonnet, S. (2003)**. Effet de l'incorporation des granulats caoutchouc sur la résistance à la fissuration des mortiers. *XXiemes Rencontres Universitaires de Génie*, 155: 59–70.
- [28] **Bories, S., et PRAT, M., (1995)**. Transferts de chaleur dans les milieux poreux. *Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique 2, (B8250): B8250–1*.
- [29] **Boudchicha, A. (2007)**. Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons . Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [30] **Bouguerra, A. (1997)**. Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux: comportement hygrothermique des matériaux élaborés. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- [31] **Branco, F.G., Tadeu, A., et De Lurdes Belgas, M.C.R. (2007)**. Can cork be used as a concrete aggregate?. *International Journal for Housing Science and Its Applications* 31 (1): 1.
- [32] **Branco, F.G., Tadeu, A., et De Lurdes Belgas, M.C.R.(2006)**. Experimental Analysis of Cork as a Concrete Aggregate. In *International Symposium Polymer sinConcrete*, 2:131.
- [33] **Brás, A., Márcio, L., et Paulina, F., (2013)**. Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials*, 49: 315–327.
- [34] **Breysse, D., Denis, A., Attar, A., et Chauvin, J.J. (1997)**. Contribution des granulats au comportement mécanique des bétons de sable chargés. *Revue française de génie civil*, 1 (1): 89–114.
- [35] **Bur, N. (2012)**. Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- [36] **Castro, O., Silva, J.M., Devezas, T., Silva, A et Gil, L. (2010)**. Cork agglomerates as

- an ideal core material in lightweight structures. *Materials & Design* 31 (1): 425–432.
- [37] **Cérézo, V. (2005)**. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat, lyon: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- [38] **CEB-FIB. (1977)**. Lightweight Aggregate Concrete. The Construction Press.
- [39] **Chamoïn, J. (2013)**. Optimisation des propriétés physiques, hydriques et mécaniques de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. Thèse de Doctorat, Insa de Rennes.
- [40] **Chandra, S., et Berntsson, L. (2002)**. Lightweight aggregate concrete. Elsevier.
- [41] **Chi, J. M., R. Huang, C., Yang C., et Chang J. J. (2003)**. Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25 (2): 197–205.
- [42] **Contant, Marc. (2001)**. Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux. Thèse de doctorat, Université du Québec.
- [43] **Coquillat, G., Delfau, M., & Lesage, R. (1984)**. Possibilités d'emploi des calcaires de dureté moyenne a faible dans les betons hydrauliques. *Bull Liaison Lab Ponts Chauss, (Spec XIV)*.
- [44] **Cormon, Pierre. 1972**. Bétons légers d'aujourd'hui. Eyrolles.
- [45] **Cosić, K., Korat, L., Ducman, V., & Netinger, I. (2015)**. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 78: 69–76.
- [46] **Courard L., Michel F., Martin M., (2008)**. Valorisation des fillers calcaires dans la construction et le génie civil. *Reflexions, le site de vulgarisation de l'Université de Liège*.
- [47] **Cuong Ho, A. (2010)**. Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [48] **Del Coz Díaz, J. J., Rabanal, F. P. Á., Nieto, P. J. G., Hernández, J. D., Soria, B. R., et De Larrard, F. (2000)**. Structures granulaires et formulation des bétons. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.
- [49] **De-Carvalho, R., Teixeira-Dias F., et Varum H. (2013)**. Cyclic behaviour of a lightweight mortar with cork granulates composite. *Composite Structures*, 95: 748–755.
- [50] **Degiovanni, A. (1994)**. Conductivité et diffusivité thermique des solides. Ed. *Techniques de l'ingénieur*.
- [51] **Dehane, B., Bouhraoua, R., Latifa, B., et Hamani, F. Z. (2013)**. La filière liège algérienne, entre passé et présent. *Forêt méditerranéenne*, 34 (2): 143–152.
- [52] **Diederich, P. 2010**. Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [53] **Dreux, G., et Festa, J. (1998)**. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles.
- [54] **Dullien, F. A. (2012)**. Porous media: fluid transport and pore structure. Academic press.
- [55] **El Bakkouri, A., Ezbakhe, H., Ajzoul, T., et El Bouardi, A. (2005)**. Etude thermomécanique du béton allège avec du liège et du beton allège avec des grignons dolive. *12èmes Journées Internationales de Thermique*, 307–310.
- [56] **EN 1097-3**. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire. Aout 1998.

- [57] **EN 1097-6**. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. Janvier 2014.
- [58] **EN 1992-1-1 Eurocode 2**. Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005.
- [59] **EN 12620**. Granulats pour béton. Juin 2008.
- [60] **EN 12390-7**. Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci. Avril 2012.
- [61] **Eyglunet, B. (1997)**. Manuel de thermique: théorie et pratique. Hermes.
- [62] **Farghal Maree, A., et Hilal Riad, K. (2014)**. Analytical and experimental investigation for bond behaviour of newly developed polystyrene foam particles lightweight concrete. *Engineering Structures*, 58: 1–11
- [63] **Ferrandiz-Mas, V., Bond, T., Garcia-Alcocel, E., et Cheeseman, C. R. (2014)**. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, 61: 285–292
- [64] **Franco, A. (2007)**. An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 27 (14): 2495–2504.
- [65] **Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito J., et V. Calderón. (2010)**. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 32 (9): 672–677.
- [66] **Ganjian, E. (1990)**. The relationship between porosity and thermal conductivity of concrete. Thèse de doctorat, The University of Leeds
- [67] **Gibson, L. J., Easterling K. E., et Ashby M. F. (1981)**. The structure and mechanics of cork. In *Proceedings of the Royal Society of London. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377:99–117. The Royal Society.
- [68] **Gibson, L.J., et Ashby M.F. (1999)**. *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge university press.
- [69] **Gil, L. (2007)**. Cork as a building material. Technical manual. APCOR–Portuguese Cork Association.
- [70] **Gil, L., et Moiteiro C. (2000)**. Cork, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [71] **Gil, L. 2009**. Cork composites: a review ». *Materials* 2 (3): 776–789.
- [72] **Goual, M. S. (2001)**. Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'Aluminium pulvérulent: caractérisation et comportement thermo hydrique. Thèse de Doctorat d'État, département de Génie civil, École Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie.
- [73] **Guédon-Dubied, J. S., Cadoret, G., Durieux, V., Martineau, F., Fasseu, F., et Van Overkeke, V. (2000)**. Etude du calcaire Tournaisien de la carrière Cimescaut à Antoing (Belgique). Analyse pétrographique et chimique et réactivité aux alcalins. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 226: 57–66.
- [74] **Guerra, M. I., Mordf, J., Garcia, J., & Rodriguez, D. (2012)**. Testing concrete made with cork powder and steel fibres. *Scientific Research and Essays*, 7 (46): 3974–3982.

- [75] **Gustaffson, S.E. (1991)**. Transient plane source technique for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solids materials. *Review of scientific instruments*, 62: 797-804.
- [76] **Hernández-Olivares, F., Bollati M. R., Del Rio M., et Parga-Landa B. (1999)**. Development of cork–gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13 (4): 179–186.
- [77] **Hu, J., Xiao, R., Shen, D., & Zhang, H. (2013)**. Structural analysis of lignin residue from black liquor and its thermal performance in thermogravimetric-Fourier transform infrared spectroscopy. *Bioresource technology*, 128: 633–639.
- [78] **Irle, M., Karade S.R., et Maher, K. (2004)**. Floating concrete! Light-weight concrete from granulated cork waste. In *Proceedings of ICECFOP1: 1st International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products*, 235–243.
- [79] **ISO22007-2.(2008)**. Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity — Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method. First edition, 2008-12-15.
- [80] **Izard, J.L. (2006)**. L'inertie thermique dans le bâtiment.
- [81] **Jalali, S., Eires R., et Aires Camões. (2005)**. Experimental characterization of granulated cork lightweight concrete. Minerals and energy economy research institute.
- [82] **Kan, A., et Demirboğa, R. (2009)**. A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 31 (7): 489–495.
- [83] **Karade, S.R., Irle, M., et Maher, K. (2006)**. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 64 (4): 281–286.
- [84] **Ke, Y., Beaucour A. L., Ortola S., Dumontet, H., et Cabrillac R. (2006)**. Comportement mécanique des bétons de granulats légers; étude expérimentale et modélisation. *Rencontres Du Génie Civil Et Urbain, Construire, Les Nouveaux Défis* 24.
- [85] **Ke, Yang. 2008**. Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers: expérience et modélisation. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Paris.
- [86] **Kellati, N., El Bouardi, A., Ajzoul, T., et Ezbakhe, H. (2007)**. Etude des propriétés thermophysiques et acoustiques du liège compact et granulaire. *Revue des Energies Renouvelables, CER 7*: 241–44.
- [87] **Khelifi, W., et Belouettar, R. (2012)**. Influence de la nature des copeaux de bois sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons à base de copeaux de bois. *XXe Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 1-10. Chambéry, France.
- [88] **Kim, H. K., Jeon, J. H., et Lee, H. K. (2012)**. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. *Construction and Building Materials*, 29: 193–200.
- [89] **Klarsfeld, S, et De Ponte, F. (2012)**. Conductivité thermique des isolants, *Technique de l'ingénieur*, , n° r2930 (mars): 1-21.
- [90] **Langlais, C., Klarsfeld, S., et. (2004)**. Isolation thermique à température ambiante. Classification des isolants, *Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique*, (BE9858).
- [91] **Lagorce-Tachon, A. (2015)**. Propriétés mécaniques, structure interne et mécanismes de transfert de l'oxygène dans le liège. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne.
- [92] **Lakreb, N. (2015)**. Elaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage. Thèse de doctorat, Université de Bouverdes, Algérie.

- [93] **Laoud, Brahim. (2012).** Comportement physico-mécanique et thermique d'un béton à base de sable calcaire allégé par des granulats de liège. Thèse de Magister, Université Amar Telidji de Laghouat.
- [94] **Le Hung, N. (2013).** Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées: approche expérimentale et modélisation numérique. Thèse de doctorat. Université de Cergy-Pontoise.
- [95] **Lecourt, M., Petri, J., et Barraud, V. (2014).** Matériaux isolants Développement d'un produit expansé à base de cellulose. In. Eco matériau. Montpellier, France.
- [96] **Ledhem, A., Dheilley, R. M., Benmalek M. L., et Quéneudec, M. (2000).** Properties of wood-based composites formulated with aggregate industry waste. *Construction and Building Materials*, 14 (6): 341–350.
- [97] **Lijiu, W., Shuzhong, Z., et Guofan, Z. (2005).** Investigation of the mix ratio design of lightweight aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 35 (5): 931–935.
- [98] **Lim, J. C., & Ozbakkaloglu, T. (2014).** Stress–strain model for normal-and light-weight concretes under uniaxial and triaxial compression. *Construction and Building Materials*, 71: 492–509.
- [99] **Liu, N., & Chen, B. (2014).** Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. *Construction and Building Materials* 68: 227–232.
- [100] **Lo, T Y., Tang, W. C., et Cui, H. Z. (2007).** The effects of aggregate properties on lightweight concrete . *Building and Environment* 42 (8): 3025–3029.
- [101] **Lopes, Marta H., A. S. Barros, C. Pascoal Neto, D. Rutledge, I. Delgadillo, et A.M.Gil. (2001).** Variability of cork from Portuguese *Quercus suber* studied by solid-state ¹³C-NMR and FTIR spectroscopies. *Biopolymers*, 62 (5): 268–277.
- [102] **Loudon, A. G. (1979).** The thermal properties of lightweight concretes. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 1 (2): 71–85.
- [103] **Ltifi M, Benjamaa N, Belhadj AN, Akrouf K.(2005).** Etude comparative des bétons hydrauliques à base de sable siliceux et sable calcaire de concassage. Colloque CMEDIMAT, Oran, Algeria.
- [104] **Magniont, C., Escadeillas, G., Oms-Multon, C., et Coutand, M. (2011).** Valorisation de granulats végétaux pour la formulation d'éco matériaux de construction. XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 mai 2011.
- [105] **Makhloufi, Z., Bederina, M., Tayeb, B., Kadri, E. H., & Bouhicha, M. (2013).** Formulation of superplasticized limestone concrete of Turonian. *International Review of Mechanical Engineering*, 7(6), 1103-1114.
- [106] **Miled, K. (2005).** Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé. Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [107] **Mohellebi, S. (2014).** Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [108] **Moreira, A., António, J., et Tadeu, A. (2014).** Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. *Cement and Concrete Composites*, 49: 1–8.

- [109] Negro, A., Abbiati, G., et Cussino, L. (1986). Sur l'emploi du filler calcaire comme régulateur de prise. In Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cements, Rio de Janeiro, (pp. 22-27).
- [110] Nepomuceno, M.C.S., et D. Silva, P. (2014). Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials* 63: 89–96.
- [111] Neville, A. M. (2000). *Propriétés des bétons*. Eyrolles.
- [112] NF EN 933- 1. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage Mai 2012.
- [113] NF EN 933-2. Détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2. Mai 1996.
- [114] NF EN 12350-2. Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement. Avril 2012.
- [115] NF EN 18-459 Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique.
- [116] NF P18-309. Granulats - Granulats d'argile ou de schiste expansés fabriqués en four rotatif destinés à la confection de bétons décembre 1982.
- [117] NF P.18-400. Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques. Décembre 81.
- [118] NF P 18-555 Mesure de la masse volumique, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux. Décembre 80.
- [119] NF P18 598. Equivalent de sable. Novembre 79.
- [120] Nguyen, L. H., Beaucour, A.L., Ortola, S., et Noumowé, A. (2014). Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. *Construction and Building Materials*, 51: 121–132.
- [121] Nguyen, T.D. (2013). Étude de la zone d'interphase «granulats calcaires poreux-pâte de ciment»: Influence des propriétés physico-mécaniques des granulats; Conséquence sur les propriétés mécaniques du mortier. Thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne.
- [122] Nóvoa, P., Ribeiro, M., C. S., Ferreira, A. J. M., et Marques, A.T. (2004). Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates. *Composites science and technology*, 64 (13): 2197–2205.
- [123] Nozahic, V. (2012). Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal: application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- [124] NS 3473. Design of Concrete Structures, Norwegian Standard, Edition 4, 1992.
- [125] Ollivier, J.P., et J.M. Torrenti. (2008). La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert. *La durabilité des bétons* 1.
- [126] Panesar, D. K., et Shindman, B. (2012). The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork . *Cement and Concrete Composites* 34 (9): 982–992.
- [127] Pereira, H. (1988). Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber*. *Wood science and technology*, 22 (3): 211–218.
- [128] Pereira, H. (2011). *Cork: biology, production and uses*. Elsevier.

- [129] **Pereira, S. M., Oliveira, J. R., Freitas, E. F., et Machado, P. (2013)**. Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes. *Construction and Building Materials* 41: 209–215.
- [130] **Pérez-Bella, J. M. (2013)**. Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study. *Construction and Building Materials* 40: 543–555.
- [131] **Pimienta, P., Chandellier, J., Rubaud, M., Dutruel, F., et Nicole, H. (1994)**. Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. *Cahiers du CSTB* 2703.
- [132] **Pintor, A. M., Ferreira, C. I., Pereira, J. C., Correia, P., Silva, S. P., Vilar, V. J., ... & Boaventura, R. A. (2012)**. Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: a review. *Water research*, 46(10), 3152-3166.
- [133] **Prades, C, Gómez-Sánchez, I., García-Olmo, J., et González-Adrados J.R. (2012)**. Discriminant analysis of geographical origin of cork planks and stoppers by near infrared spectroscopy. *Journal of wood chemistry and technology* 32 (1): 66–85.
- [134] **Pretot, S., Collet, F., Glouannec, P., et Lang, V. (2009)**. Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation. *Congrès français de thermique-Efficacité énergétique*, Vannes, 865–870.
- [135] **Quelenis, N. 2008**. Le liège. www.champagne-ardenne.cci.fr
- [136] **Québaud, M., Zaharieva, R., et Buyle-Bodin, F. (1998)**. Le comportement des bétons incluant des granulats recyclés. *Revue française de génie civil*, 2 (8): 969–984.
- [137] **Ramachandran, V. S., & Chun-Mei, Z. (1986)**. Dependence of fineness of calcium carbonate on the hydration behaviour of tricalcium silicate. *Durability of building materials*, 4(1), 45-66.
- [138] **Reichard, T.W. (1964)**. Creep and Drying Shrinkage Light weight and Normal-Weight Concretes, US Department of Commerce. National Bureau of Standards Monograph, 74: 23.
- [139] **RILEM (1970)**: Commission des bétons légers ; Terminologie et définitions. *Matériaux et Construction*, N°13, pp 60-69.
- [140] **Sadhouari, F., Goufi, N., et Guezzouli, A. (2009)**. Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et des bétons. *SBEIDCO-1st*. In *International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries*, ENSET Oran (Algeria), 247–54.
- [141] **Shindé, S.L., et Goela, J. (2006)**. High thermal conductivity materials. Springer. Vol. 91.
- [142] **Shink, M. (2003)**. Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers. Thèse de doctorat Université de Laval.
- [143] **Short, A., et Kinniburgh, W. (1963)**. Lightweight concrete. CR books.
- [144] **Silva, S. P., Sabino, M.A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., et Reis R. L. (2005)**. Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews* 50 (6): 345–365.
- [145] **Sim, J.I., Yang, K.H., et Jeon, J.K. (2013)**. Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types. *Construction and building materials* 44: 716–725.
- [146] **Sim, J.I., Yang, K.H., Kim, H.Y., et Choi, B.J. (2013)**. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and building Materials*, 38: 854–864.

- [147] **Sotehi, N. (2010)**. Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation. Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine.
- [148] **Sotehi, N., et Chaker, A. (2014)**. Numerical analysis of simultaneous heat and mass transfer in cork lightweight concretes used in building envelopes . *Physics Procedia* 55: 429–436.
- [149] **Spiesz, Przemek, Q. L. Yu, et H. J. H. Brouwers. 2013**. Development of cement-based lightweight composites–Part 2: Durability-related properties. *Cement and Concrete Composites* 44: 30–40.
- [150] **Tamba, S., Voumbo, L., Wereme, A., Gaye, S., et Sissoko, G. (2007)**. Durabilité des bétons légers à base de copeaux de bois. *J. Sci*, 7 (4): 67–72.
- [151] **Tang, W. C., Cui, H. Z., et Wu, M. (2014)**. Creep and creep recovery properties of polystyrene aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 51: 338–343.
- [152] **Taoukil, D., El bouardi, A., Ajzoul T., et Ezbakhe, H. (2013)**. Valorisation des déchets de menuiserie de bois pour le développement du béton léger : Comparaison entre la sciure et les copeaux de bois. In . Marrakech (Maroc).
- [153] **Taoukil, D, Friedrich S, Mimet A, Ezbakhe H, Ajzoul T, et others. 2013**. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Construction and Building Materials* 48: 104–115.
- [154] **Topçu, İ.B., et Işıkdag, B. (2008)**. Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of materials processing technology*, 204 (1): 34–38.
- [155] **Traore, Y. (2015)**. Propriétés mécaniques d'un béton de granulats légers à base de coques de noix de palme traitées. In *Rencontres Universitaires de Génie Civil*.
- [156] **Vaquier, A., Grandet, J., et Thenoz, B. (1977)**. Réalisation des bétons à matrice mixte et étude de leurs propriétés. *Matériaux et Construction* 10 (3): 145–152.
- [157] **Wzorek, Z., Kulczycka, J., Fecko, P., Et Kunierova, M. (2005)**. Waste recycling. Krakow.
- [158] **YI, He. (2005)**. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor, Part 1 : Theoretical considerations. *Thermochimica Acta*, 436: 122-29.
- [159] **Younis, K.H., et Pilakoutas, K (2013)**. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete . *Construction and Building Materials* 49: 688–701.
- [160] **Yu, Q. L., Spiesz, P., et Brouwers, H. J. H. (2013)**. Development of cement-based lightweight composites–Part 1: mix design methodology and hardened properties. *Cement and Concrete Composites* 44: 17–29.
- [161] **Ziregue, A., Khenfer, M. M., Quéneudec-t'Kint, M., & Montrelay, N. (2016)**. Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *Journal of adhesion science and Technology*, 30(9), 934-946.