

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Amar Telidji - Laghouat

Faculté de Technologie
Département de Génie Civil
Spécialité : Construction et Environnement



Mémoire de Magister

*Comportement physico- mécanique et thermique d'un béton à base de
sable calcaire allégé par des granulats de liège*

Par

Brahim LAOUD

Devant le jury composé de :

AZZOUZ Lakhdar	Pr, U. de Laghouat	Président
BENCHEIKH Boubakeur	M. C. U. de Djelfa	Examineur
BEDERINA Madani	M. C. U. de Laghouat	Examineur
KHENFER Mohamemd Mouldi	Pr, U. de Laghouat	Encadreur
ZIREGUE Ahmed	M. A. U. de Laghouat	Co-encadreur

Laghouat 2012

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A Tous mes amis

A Tous mes enseignants du primaire à l'université

LAOUD BRAHIM

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout Dieu de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce mémoire. Je remercie également ma famille pour ses sacrifices pour que je termine mes études.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont à mes encadreurs KHENFER Mohamed Mouldi et ZIREGUE Ahmed , pour tous les efforts qu'ils ont fourni pour me faciliter et aider à accomplir ce mémoire.

Je remercie également le chef et les techniciens du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat pour leurs soutiens et leurs aides à accomplir le travail pratique.

Je souhaite ensuite remercier mes examinateurs de mémoire qui m'ont fait honneur d'accepter d'être membres de jury :

Monsieur Lakhdar AZZOUZ , Professeur à l'université de Laghouat, président de jury. ,

Monsieur Boubakeur BENCHEICK, Maître de conférences à l'université de Djelfa, examinateur.

Monsieur Madani BEDRINA, Docteur à l'université de Laghouat, examinateur.

Je remercie tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

ملخص

لقد أصبح من الضروري دراسة كل الاحتمالات لإعادة استخدام وتثمين النفايات والمنتجات الثانوية الصناعية، خاصة في مجال الهندسة المدنية. وذلك لمواجهة الاحتياجات المتزايدة من المواد ومتطلبات حماية البيئة في إطار رؤية للتنمية المستدامة.

هذا العمل يندرج في إطار تثمين المنتجات المحلية، مثل نفايات المحاجر الكلسية (رمل كلسي) الموجودة في منطقة الأغواط ، والنفايات الناجمة من تصنيع كتل الفلين الممدد، و استخدامها في صناعة مواد اسمنتية للبناء موجهة في المقام الأول للعزل الحراري.

لدراسة تأثير حجم حبيبات الفلين الممدد على الخواص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للخرسانة، تم استخدام فئتين من حبيبات الفلين الممدد 3/8 و 8/15.

أظهرت النتائج المتحصل عليها ، أن تخفيف وزن خرسانة الرمل الكلسي بواسطة الفلين الممدد يقلل بشكل ملحوظ في الموصلية الحرارية مما يحسن في العزل الحراري، ولكن يؤدي إلى انخفاض في قوة الخرسانة المنتجة. زيادة نسبة حبيبات الفلين لكل نوع من الخرسانة المنجزة يتناسب طرديا مع مساميتها و يؤدي إلى زيادة امتصاصها للماء. الانكماش لمختلف التركيبات أقل من الخرسانة الشاهدة لأن إزالة الضغط عن حبيبات الفلين (العودة إلى حالتها الأصلية بعد الضغط) يقلل من إنكماش الخرسانة. الخرسانة المخففة بواسطة حبيبات الفلين الممدد 3/8 هي الأخف وزنا وأكثر عازلية، ولها قوة ميكانيكية منخفضة مقارنة مع الخرسانة المخففة بواسطة حبيبات الفلين الممدد 8/15.

الكلمات المفتاحية

التنمية المستدامة - تثمين النفايات - المنتجات الثانوية الصناعية - رمل المحاجر - الفلين الممدد - مواد اسمنتية العزل الحراري.

Résumé

Devant les besoins croissants des ressources en matériaux, aussi que les exigences de préservation de l'environnement et dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment dans le domaine de génie civil.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des produits locaux tels que les déchets des carrières de concassage (sable calcaire) de la région de Laghouat et les déchets issus de la fabrication des agglomérées de liège expansé, en les utilisant dans la confection des matériaux cimentaires de construction destinés en premier lieu à l'isolation thermique. Pour étudier l'influence de la grosseur des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons, deux classes granulaires sont employées granulats 3/8 et 8/15.

Les résultats obtenus ont montré que l'allégement du béton à base de sable de concassage avec le liège expansé diminue considérablement sa conductivité thermique ce qui améliore leur isolation thermique, mais entraîne une chute de la résistance mécanique des bétons élaborés. L'augmentation des dosages des granulats pour chaque types des bétons, est proportionnelle à la porosité des bétons élaborés et entraîne une augmentation d'absorption d'eau. Le retrait de différentes compositions est inférieur à celui du béton témoin. Car la décompression des granulats de liège (le retour à leur état initial après compression) diminue le retrait du béton. Les bétons allégés avec les granulats de liège expansé 3/8 sont les plus légers et les plus isolants et ils ont des résistances mécaniques faibles par rapport aux bétons allégés avec les granulats 8/15.

Mots clés

Développement durable - valorisation des déchets - sous produits industriels - sable de concassage - liège expansé - matériaux cimentaires - l'isolation thermique.

Abstract

Faced with the growing needs of resource materials and the requirements of environmental protection in a vision of sustainable development, it became necessary to study all the possibilities of reuse and recycling of industrial wastes and by-product especially in the field of civil engineering.

This work is part of the promotion of local products such as waste from the quarry crushing calcareous sand in the region of Laghouat, and waste from the manufacture of agglomerated expanded cork, using them in the making of cement materials for construction primarily for thermal insulation.

To study the influence of the size of the aggregates on the physico-mechanical and thermal properties of concrete, two classes of granular aggregates are used 3 / 8 and 8 / 15. The results obtained showed that the reduction weight of concrete containing crushed sand with expanded cork significantly reduces its thermal conductivity which improves their thermal insulation, but causes a drop in the strength of concrete produced.

An increased dosage of aggregates for each type of concrete is proportional to the porosity of concrete developed and leads to increased water absorption. The shrinkage of different compositions is lower than the control concrete. Because of decompression of cork granules (the return to their original state after compression) reduces the shrinkage of concrete. Lightweight concrete with expanded cork granules 3/8 are the lightest and most isolated, and they have low mechanical strength compared to concrete with lightweight aggregates 8/15.

Keywords

Sustainable development - valorization of wastes - industrial byproducts - crushed sand expanded cork - cement materials - thermal insulation

Sommaire

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciements

Résumés

Liste des notations

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

I.1 GENERALITE SUR LES BETONS LEGRS

I.1.2	Définition du béton léger	3
I.1.3	Classification des bétons légers	3
I.1.3.1	Classe s'appuyant sur la technique employée pour obtenir des vides dans le béton	3
I.1.3.2	Classe s'appuyant sur les masses volumiques apparentes	5
I.1.4	Classification des granulats légers.....	6
I.1.5	Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers.....	7
I.1.6	Caractérisation technique des bétons légers.....	9
I.1.7	Durabilité des bétons légers.....	13
I.1.8	Caractérisation thermique des bétons légers.....	14
I.1.8.1	Conductivité thermique.....	14
I.1.8.2	Résistance au feu.....	14
I.1.9	Béton léger à base de granulats de liège	15
I.1.10	Principaux avantages des bétons légers.....	20
I.1.11	Utilisations diverses des bétons légers.....	20
I.1.12	Aspect environnemental des bétons légers.....	21

I.2 SABLE CALCAIRE

I.2.1	L'influence des fines calcaires sur les bétons ordinaires à l'état frais.....	22
I.2.2	L'influence des fines calcaires sur la compacité.....	23
I.2.3	L'influence des fines calcaires sur la résistance à la compression.....	25
I.2.4	L'influence des fines calcaires sur la résistance à la traction.....	27

I.3 ETAT DE CONNAISSANCE SUR LE LIEGE

I.3.1	Introduction.....	30
I.3.2	Air naturelle de répartition de chêne liège.....	30
I.3.3	Caractéristiques techniques du liège.....	31
I.3.3.1	Constitution du liège.....	31
I.3.3.2	Qualités du liège.....	32
I.3.4	Comparaison entre le liège et le bois.....	32
I.3.5	Production du liège.....	33
I.3.6	Granulé e re-granulé du liège expansé.....	35

I.4 TRANSFERT THERMIQUE

I.4.1	Introduction.....	37
I.4.2	Description physique d'un matériau poreux.....	37
I.4.3	Transferts thermiques dans les matériaux poreux	38
I.4.4	Résistance thermique.....	40
I.4.5	La conductivité thermique.....	40
I.4.6	Effet de l'humidité sur la conductivité thermique des matériaux poreux.....	41
I.4.7	Transfert de chaleur dans le liège.....	41
I.4.8	Les techniques de mesure de la conductivité thermique.....	41
I.4.9	Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud.....	43
I.4.9.1	Principe de la méthode.....	43
I.4.9.2	Modélisation du fil chaud.....	44
I.4.10	Consommation finale d'énergie du secteur de l'industriel et du BTP en Algérie.....	45
I.4.11	Apport du liège pour la limitation des pertes thermiques.....	46
I.4.12	Caractéristiques environnementales et sanitaires.....	47
I.5	Synthèse bibliographique.....	48

CHAPITRE II METHODES EXPERIMENTALES

II.1	Caractérisation des matières premières	49
II.1.1	Le sable.....	49
II.1.2	Les granulats de liège.....	51
II.1.3	Le ciment.....	52
II.2	Caractérisation du béton frais.....	54
II.2.1	Masse volumique à l'état frais.....	54
II.2.2	Essai de consistance.....	54
II.3	Caractérisation du béton durci.....	55
II.3.1	Masse volumique apparente des bétons.....	55
II.3.2	Résistance à la traction par flexion.....	55
II.3.3	Résistance à la compression.....	56
II.3.4	Variation dimensionnelles.....	56
II.3.5	Essai d'absorption d'eau.....	57
II.3.6	Caractéristiques thermiques.....	58
II.4	Matières premières.....	59
II.4.1	Le sable.....	59
II.4.2	Le ciment.....	59
II.4.3	Les granulats.....	59
II.4.4	L'eau de gâchage.....	60
II.5	Variables étudiées.....	60
II.6	Conclusion.....	61

CHAPITRE III CARACTERISATION DES MATERIAUX, RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

III.1	Caractérisation des matières premières.....	62
III.1.1	Le sable calcaire.....	62
III.1.2	Le ciment.....	64
III.1.3	Les granulats.....	64

III.2	Formulation et élaboration des bétons calcaires légers.....	67
III.2.1	Formulation du béton témoin.....	67
III.2.2	Formulation des bétons élaborés.....	68
III.2.3	Préparation des éprouvettes.....	69
III.3	Caractérisation des bétons frais.....	70
III.3.1	Consistance et maniabilité.....	70
III.3.2	Etude de la masse volumique du béton frais.....	71
III.4	Etude des bétons à l'état durci.....	72
III.4.1	Masse volumique apparente.....	72
III.4.2	Résistance mécanique.....	77
III.4.3	Variations dimensionnelles.....	87
III.4.4	Essai d'absorption d'eau.....	91
III.4.5	Aspect interne des bétons légers.....	95
III.4.6	Caractéristiques thermiques.....	96
III.5	Conclusion.....	100
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....		101
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		

LISTE DES NOTATIONS

f_{c28} : La résistance du béton à la compression à 28 jours (MPa).

F_t : La résistance du béton à la traction (MPa).

E_b : module d'élasticité des bétons (kg/cm^2)

δ_b : masse volumique apparente du béton en t/m^3

σ_{jm} : résistance à la compression du béton sur cubes en kg/cm^2 à (j) jours.

λ : coefficient de conductivité thermique (W/m.K)

E/C: rapport eau/ciment

n : Porosité

V_v : volume de vide

V : volume total, en mètres cubes.

ε_o : La porosité ouverte

V_o : volume des pores ouverts

ε_f : La porosité fermée

V_f : volume des pores fermés.

Q : la densité de flux

e : épaisseur du matériau (m)

T_c, T_f, T_1, T_2 : des températures ($^{\circ}\text{C}$)

R : résistance thermique ($\text{m}^2.\text{K} / \text{W}$)

S : Surface traversée par le flux

R_c Résistance de contact à l'interface résistance chauffante/échantillon

a : Diffusivité thermique de l'échantillon

r_0 : Rayon du fil chauffant

L : Longueur du fil chauffant (mm)

V_s : volume de grains

ρ_w : la masse volumique de l'eau ($=1\text{g/cm}^3$).

M_1 : la masse du pycnomètre remplie d'eau.

M_2 : la masse de l'échantillon de matériau sec.

M_3 : la masse totale du pycnomètre avec échantillon.

ρ_{abs} : masse volumique absolue (kg/m^3)

ρ_a : Masse volumique apparente (kg/m^3)

M_f : module de finesse du sable

E_s : L'équivalent de sable

Abs : le coefficient d'absorption d'eau

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C (g).

M_h : masse de l'échantillon imbibé (surface essuyée).(g)

ρ_c : masse volumique absolue du ciment (g/cm³).

t : temps mesuré par seconde.

M : masse de l'échantillon, en kilogrammes

$\Delta l(t)$: variation de la longueur en fonction du temps

ρ_{app} : masses volumiques apparente

ρ_{abs} : masses volumiques absolue

C_p : La compacité

C/S : rapport (ciment/sable)

Vg/Vs : rapport (volume de granulat de liège expansé / volume de sable)

BL 8/15 : béton léger à base de granulats de liège expansé 8/15

BL 8/15-1 : béton léger à base de granulats de liège expansé 8/15 avec rapport Vg/Vs = 1

BL 8/15-1.5 : béton léger à base de granulats de liège expansé 8/15 avec rapport Vg/Vs = 1.5

BL 8/15-2 : béton léger à base de granulats de liège expansé 8/15 avec rapport Vg/Vs = 2

BL 3/8 : béton léger à base de granulats de liège expansé 3/8

BL 3/8-1 : béton léger à base de granulats de liège expansé 3/8 avec rapport Vg/Vs = 1

BL 3/8-1.5 : béton léger à base de granulats de liège expansé 3/8 avec rapport Vg/Vs = 1.5

BL 3/8-2 : béton léger à base de granulats de liège expansé 3/8 avec rapport Vg/Vs = 2

T : béton témoin

ENV : environnement

C_a : le coefficient d'absorption d'eau du béton (g/cm²)

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Représentation schématique des différents types de béton légers.....	5
Figure I-2: Courbe d'absorption d'eau.....	9
Figure I-3: Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R-87.....	10
Figure I-4: Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique.....	10
Figure I-5 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats.....	11
Figure I-6: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de grande résistance.....	11
Figure I-7: Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains.....	12
Figure I-8: Résistance à la compression du béton en fonction de la température.....	15
Figure I-9 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction de la densité apparente.....	16
Figure I-10 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège.....	16
Figure I-11: Masse sèche cumulé du matériau dégradé.....	17
Figure I-12: Résistance moyenne à la compression du béton.....	17
Figure I-13 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau : cas du béton de liège.....	18
Figure I-14 : Micrographie d'échantillons de la composition liège - ciment fracturée (MEB).....	19
Figure I-15: Variation du rapport E/C en fonction des fines.....	23
Figure I-16: Compacité du mélange ciment /micro filler calcaire.....	23
Figure I-17: Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.....	24
Figure I-18 : Variation de la densité en fonction des taux de fines.....	24
Figure I-19: Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie grosse, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S : Argile/Sable).....	25
Figure I-20 : Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie fine, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S :Argile/Sable).....	25
Figure I-21: Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines.....	26
Figure I-22 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Kristel).....	27
Figure I-23 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Sid Ali benyoub).....	27
Figure I-24: Résistance relative à la traction des mortiers avec fines calcaires.....	28
Figure I-25 : Résistance à la traction des mortiers (dosage 250 kg/m ³).....	28
Figure I-26 : Résistance à la traction des mortiers (dosage 325 kg/m ³).....	29
Figure I-27: Superficie de chêne liège à travers les pays du monde.....	30
Figure I-28 : Schéma de constitution de liège.....	33
Figure I-29 : Liège male et femelle.....	34
Figure I-30: Récolte de liège.....	34
Figure I-31 : Schématisation macroscopique d'un matériau poreux dans un état hydrique quelconque.....	37

Figure I-32: Schéma de porosité ouverte.....	38
Figure I-33: Schéma de porosité fermée.....	38
Figure I-34: Transfert de chaleur dans un matériau poreux.....	39
Figure I-35 : Schéma de principe de la mesure de conductivité thermique par la méthode du fil chaud.....	43
Figure I-36: Une vue en coupe du fil chaud et de l'échantillon.....	44
Figure I-37: Calcul de la pente du thermogramme.....	45
Figure I-38: Consommation du secteur industriel et du BTP pour l'année 2009.....	45
Figure I-39: Schéma simplifié du mur.....	46
Figure I-40: Puissance thermique perdue par les murs d'un bâtiment en béton.....	46
Figure I-41: Consommation d'énergie annuelle due aux murs.....	47
Figure I-42: Economies réalisées par an.....	47
Figure II-1 : Schémas de l'éprouvette graduée.....	49
Figure II-2 : Série de tamis.....	50
Figure II-3 : Dispositif expérimental de l'appareil LeChatelier.....	52
Figure II-4 : Dispositif expérimental du perméabilimètre <i>Blaine</i>	53
Figure II-5 : Classes de consistance mesurées au cône d'Abrams.....	55
Figure II-6 : Schémas de l'essai de flexion.....	56
Figure II-7 : Schémas de l'essai de compression.....	56
Figure II-8: Appareillage pour la mesure du retrait.....	57
Figure II-9: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.....	58
Figure II-10 : Le multimètre.....	59
Figure II-11 : Echantillon de granulats de liège expansé 3/8 et 8/15.....	60
Figure II-12 : Organigramme représentatif des différents essais effectués.....	61
Figure III-1 : Courbe granulométrique du sable calcaire	62
Figure III-2 : Courbes granulométriques des granulats de liège.....	65
Figure III-3 : Courbes d'absorption d'eau des granulats de liège 3/8 et 8/15.....	66
Figure III-4 : Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C.....	68
Figure III-5: Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en liège expansé.....	70
Figure III-6: Evolution de la masse volumique du béton à l'état frais en fonction du dosage en liège.....	71
Figure III-7: Variation de la masse volumique du BL 3/8 en fonction du dosage en liège.....	73
Figure III-8: Variation de la masse volumique du BL 8/15 en fonction du dosage en liège.....	74
Figure III-9: Variation de la masse volumique du béton conservé à l'air libre.....	74
Figure III-10: Variation de la masse volumique du béton conservé à l'eau.....	75
Figure III-11: Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège.....	75
Figure III-12: Variation de la résistance à la compression des différents bétons.....	77
Figure III-13: Evolution de la résistance à la compression des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'air libre en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s	78
Figure III-14: Evolution de la résistance à la compression des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'eau en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s	78
Figure III-15: Evolution de la résistance à la compression à 28j conservés dans l'eau en fonction de rapport Liège/Sable	79
Figure III-16: Variation de la résistance en compression des BL 3/8 en fonction de la masse volumique apparente	80
Figure III-17: Variation de la résistance en compression des BL 8/15 en fonction de la masse volumique apparente	80
Figure III-18: Variation de la résistance à la traction des différents bétons.....	81

Figure III-19: Evolution de la résistance à la traction des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'air libre en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s	82
Figure III-20: Evolution de la résistance à la traction des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'eau en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s	82
Figure III-21: Evolution de la résistance à la traction à 28j des bétons conservés dans l'eau en fonction de rapport Liège/Sable.....	83
Figure III-22: Variation de la résistance en traction des BL 3/8 en fonction de la masse volumique apparente.....	83
Figure III-23: Variation de la résistance en traction des BL 8/15 en fonction de la masse volumique apparente.....	84
Figure III-24: Corrélation entre la résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion pour les différents bétons (Air-Eau).....	85
Figure III-25: Corrélation entre la résistance à la compression en fonction la masse volumique apparente pour les différents bétons (Air-Eau).....	86
Figure III-26: Evolution de retrait en fonction du temps des bétons T et BL 3/8.....	88
Figure III-27: Evolution de retrait en fonction du temps des bétons T et BL 8/15.....	88
Figure III-28: Evolution de retrait en fonction du temps des différents bétons	89
Figure III-29: Evolution du gonflement en fonction du temps.....	90
Figure III-30: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps-Environnement: Air libre.....	91
Figure III-31: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps - Environnement : Eau.....	92
Figure III-32: Absorption d'eau par immersion (Environnement :Air libre).....	93
Figure III-33: Absorption d'eau par immersion (Environnement :Eau)......	94
Figure III-34: Photos de coupes d'échantillons de BL 8/15.....	95
Figure III-35: Photos de coupes d'échantillons de BL 3/8.....	95
Figure III-36: Variation de la conductivité thermique du BL 3/8 et 8/15 en fonction de la masse volumique apparente	97
Figure III-37: Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité à l'état sec et saturé.....	97
Figure III-38: Variation de la conductivité thermique du BL 3/8 et BL 8/15 en fonction de la porosité.....	98
Figure III-39: Variation de la conductivité thermique en fonction de la porosité à l'état sec et saturé.....	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Choix des granulats en fonction des classes de béton.....	8
Tableau I-2: Désignation des différents types des bétons	11
Tableau I-3: Module d'élasticité de quelques types de bétons légers.....	13
Tableau I-4 : Répartition du chêne liège en Algérie par région subéricole.....	31
Tableau I-5: Comparaison de la composition chimique du liège et de bois.....	33
Tableau I-6 : Caractéristiques de béton léger avec re-granulé de liège expansé.....	36
Tableau I-7 : Gain en puissance thermique.....	46
Tableau III-1 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire.....	62
Tableau III-2: Equivalent du sable.....	63
Tableau III-3 : Analyse chimique du ciment.....	64
Tableau III-4 : Analyse minéralogique du ciment.....	64
Tableau III-5: Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 3/8.....	65
Tableau III-6 : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 8/15.....	65
Tableau III-7: Caractéristiques physiques des granulats.....	66
Tableau III-8: Valeurs de la résistance en compression en fonction du rapport E/C.....	68
Tableau III-9: Evolution de la maniabilité en fonction du rapport liège/sable (Vg/Vs).	70
Tableau III-10: Masses volumiques de différentes compositions à l'état frais.....	71
Tableau III-11: Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège expansé.....	72
Tableau III-12: Evolution des porosités de différentes compositions.....	93
Tableau III-13: Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 3/8.....	96
Tableau III-14: Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 8/15.....	96

Introduction générale

Les déchets sont de plus en plus variés et leurs quantités ne cessent d'augmenter, ce qui influe négativement sur l'environnement. La valorisation et le traitement de ces déchets favoriseront la protection et la préservation de l'environnement, ce qui nous permettra de s'inscrire dans une politique de développement durable.

Les matières végétales, renouvelables et respectueuses de l'environnement, sont de plus en plus présentes dans une multitude d'applications industrielles. Dans le secteur de la construction, elles sont appréciées, entre autre pour leur légèreté, qui leur confère des propriétés d'isolation thermique importantes.

L'épuisement des gisements naturels et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent d'autres sources d'approvisionnement. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

Le sable, matériau traditionnel pour la confection des bétons, présente une grande importance pour le domaine de la construction, mais l'interdiction d'utilisation des sables alluvionnaires et de mer, pour des raisons techniques et environnementales, pose des problèmes d'approvisionnement, ce qui oblige à trouver une autre source de sable.

Le sable de concassage issu de carrières de granulats, considéré comme déchet, peut substituer le sable alluvionnaire. Le sable contient un taux élevé de fines (éléments inférieurs à 80 μm), qui dépasse les exigences des normes en vigueur. Les normes internationales limitent le pourcentage des fines calcaires issues du sable de concassage de 3% à 22%. Les résultats obtenus à partir des études antérieures sur la possibilité d'utilisation du sable calcaire pour la confection du béton ordinaire ont montré que le taux admissible est 15 % de fines. Ces sables sont utilisés par le secteur des travaux publics, la fabrication de certains composants de construction (carreaux granitos, bordures de trottoirs, tuyaux d'assainissement.....).

En Algérie, plusieurs études sur l'utilisation du sable de concassage dans le béton ont été menées. Ces études ont montré qu'il est possible d'utiliser le sable de concassage contenant jusqu'à 15% de fines pour la fabrication du béton sans affecter ses performances mécaniques.

Des recherches antérieures ont montré la possibilité d'incorporation des granulats de liège (expansé et cru) au ciment et au plâtre afin d'obtenir un matériau composite avec des meilleurs caractéristiques thermiques.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des produits locaux tels que les déchets des carrières de concassage du sable calcaire de la région de Laghouat et les déchets issus de la fabrication des agglomérées de liège expansé de l'usine de Jijel, regranulé en deux fractions 3/8 et 8/15. Les matériaux sont utilisés pour la confection des matériaux cimentaires de construction destinés en premier lieu à l'isolation thermique avec des caractéristiques physiques et mécaniques convenables.

Après une introduction générale, le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les bétons légers et l'influence des fillers calcaires sur les propriétés du béton. Ainsi un état de connaissance sur le liège et le transfert thermique dans les matériaux poreux.

Les méthodes expérimentales de caractérisation des matières premières, et description des essais de caractérisation physico-mécaniques des matériaux élaborés sont présentés dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre donne les caractérisations des matériaux utilisés et présente et discute les résultats expérimentaux obtenus.

Enfin, une conclusion générale avec quelques recommandations pour de futurs travaux proposées.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I-RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques à travers diverses documentations concernant les bétons légers et plus particulièrement les bétons de liège, l'influence des fines calcaires des sables de concassage sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton. Ainsi un état de connaissance sur le liège et le transfert thermique dans les matériaux poreux.

I-1 GENERALITE SUR LES BETONS LEGERS

Les bétons légers ont des utilisations très importantes dans le demain de la construction, en raison de leur faible masse volumique et leurs caractéristiques d'isolation thermiques et phoniques, ce qui nous permet d'économiser la consommation d'énergie.

I.1.2. Définition du béton léger

Tout béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est supérieure ou égale à 800 kg/m³ mais inférieure ou égale à 2 000 kg/m³. Il peut être produit entièrement ou partiellement à partir de granulats légers [1].

Il peut être constitué de granulats légers ou lourds et de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousse polyuréthane, etc...). Certains d'entre eux, pour obtenir leurs caractéristiques définitives, subissent des traitements à hautes températures et hautes pressions. L'utilisation des bétons légers en construction signifie par delà une amélioration des performances thermiques et phoniques, une manutention plus aisée, un gain de temps et de matériel et donc un positionnement plus intéressant par rapport à la compétitivité économique [2].

I.1.3. Classification des bétons légers

Les systèmes de classification se divisent en deux groupes : le premier est fondé sur la nature des vides dans le béton et le second sur les masses volumiques apparentes des bétons et les utilisations s'y rapportant.

I.1.3.1. Classification s'appuyant sur la technique employée pour obtenir des vides dans le béton

Selon cette méthode, nous distinguons trois grandes familles de bétons légers (figure I-1):

a) Les bétons caverneux

Les bétons caverneux sont des bétons constitués d'un squelette de granulats légers ou non ayant sensiblement la même grosseur et d'une pâte de liant assurant l'enrobage et le collage de ces éléments entre eux.

On obtient ainsi des bétons dits caverneux ou semi-caverneux. On les désigne parfois sous le nom de béton à texture ouverte ou alvéolée ou encore béton sans sable ou sans fines.

Avec les granulats courants, la densité peut être de l'ordre de 1.6 à 1.8 t/m³. On peut descendre au-dessous avec les granulats légers (0.7 à 1 avec de l'argile expansé). Les résistances mécaniques sont très faibles (en compression, on a en général $3 < f_{c28} < 7$ MPa [3]).

Comme les autres bétons légers, les bétons caverneux visent bien sûr à permettre un allègement et une simplification des pièces fabriquées avec une bonne isolation thermique. Mais, ils ont surtout comme caractéristique essentielle d'être très économiques. La réduction, voir suppression du sable, et aussi la réduction très appréciable de la quantité de ciment permettent une économie importante pouvant atteindre 30 % par rapport à un béton plein.

b) Les bétons cellulaires

Les bétons cellulaires sont des matériaux constitués d'une pâte de sable et de liant hydraulique dans laquelle on fait naître des petites bulles ($\Phi = 1\text{mm}$) soit par réaction chimique (béton gaz), soit par action physique au cours du malaxage (béton mousse). En fait, ce ne sont pas des bétons au sens strict du mot, mais plutôt des mortiers puisqu'ils ne contiennent pas de graviers.

La densité des bétons cellulaires varie, suivant les compositions, de 0.4 à 1.2 t/m³ et leur conductivité thermique fonction de leur densité est comprise entre 0.16 w/m.°C pour des bétons de masse volumique de 400 kg/m³ et 0.4 w/m.°C pour une masse volumique de 1200 kg/m³. Les résistances à la compression sont d'environ 0.5 à 0.8 MPa pour des masses volumiques de 400 kg/m³ et atteignent 4 à 5 MPa pour des masses volumiques de 1200 kg/m³. Les résistances en traction sont en général de l'ordre de 30 % de celles en compression [3].

c) Les bétons de granulats légers

Les bétons de granulats légers sont des bétons traditionnels dans lesquels les granulats normaux ont été remplacés par des granulats présentant une structure alvéolée, scoriacée ou cellulaire donc plus légers que les granulats traditionnels.

Ces bétons présentent en général des résistances d'autant plus faibles qu'ils sont plus légers, mais cette dernière qualité peut, dans certain cas, être particulièrement intéressante (préfabrication, isolation, gain de poids sur fondation difficiles ou onéreuses, etc.)[3].

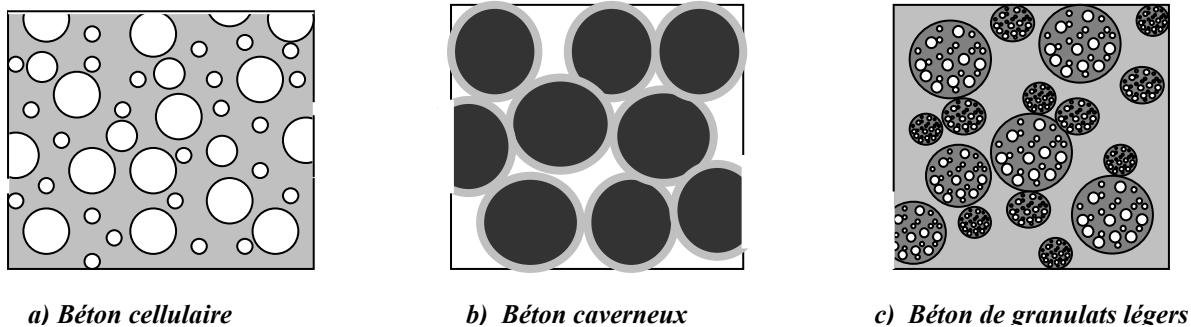


Figure I-1: Représentation schématique des différents types de béton légers [2].

I.1.3.2. Classification s'appuyant sur les masses volumiques apparentes et sur les utilisations s'y rapportant

Cette méthode se base sur la classification des bétons légers suivant leurs masses volumiques apparentes, les bétons sont classés en trois grandes catégories :

a) Les bétons de remplissage

Ces bétons sont de masse volumique apparente faible et comprises entre 300 et 1000 Kg/m³ et ne sont pas porteurs [4]. Ils sont en général de bons isolants thermiques. Leur constitution est d'ailleurs souvent caverneuse ou cellulaire. Leurs contraintes admissibles en compression sont faibles. On les utilise donc principalement pour le remplissage de murs non ou peu porteurs, pour la fabrication de formes de pente de toitures-terrasses et d'éléments manufacturés.

b) Les bétons porteurs et isolants

Les qualités isolantes de ces bétons sont naturellement inférieures à celles des bétons précédents, mais suffisantes pour assurer le confort thermique sous certaines épaisseurs ; par contre ils présentent des caractéristiques mécaniques nettement supérieures. Leurs masses volumiques apparentes sont comprises entre 1000 et 1400 Kg/ m³ [4]. Les bétons classés dans cette catégorie sont généralement des bétons de granulats légers. On les utilise principalement pour la fabrication de pièces préfabriquées (panneaux allèges, etc.).

c) Les bétons de structure

Les bétons destinés à être armés ou précontraints pour la constitution de structures. La masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 Kg/m³ [4].

Leur isolation thermique est faible, mais leurs résistances mécaniques sont importantes et peuvent être du même ordre que celles des bétons pleins normaux.

Les bétons de structure à base de granulats légers sont définis comme des matériaux ayant, après séchage à l'air à 28 jours d'âge, une résistance à la qualité supérieure à 175 Kg/cm^2 environ une densité apparente inférieure à 1850 Kg/m^3 .

I.1.4. Classification des granulats légers

Les granulats légers sont des granulats ayant une masse volumique réelle ne dépassant pas 2000 kg/m^3 (2 g/cm^3) ou une masse volumique en vrac ne dépassant pas 1200 kg/m^3 [5].

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, tamisage. Les granulats les plus connus dans cette catégorie sont : la ponce, les pouzzolanes, roches d'origine volcanique, les tufs calcaires ou volcaniques [6,7].
- **Matériaux minéraux naturels préparés** : Ce sont des matériaux spécialement traités en usine en vue de leur emplois dans le béton 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.
- **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 [7].
- **Déchets industriels préparés** : Ce sont en générale 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) et le liège expansé.

I.1.5. Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers

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 :

I.1.5.1. 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 petits ou gros [2].

I.1.5.2. 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 béton léger.
 - b) Ils ont une granulométrie inférieure à 5 mm.
 - c) Ils ont une densité sèche inférieure à 1100 kg/m^3 .
- **Les gros granulats légers :**
 - a) Ils conviennent à la fabrication de béton léger de structure.
 - b) Ils ont une granulométrie de 5 à 19 mm.
 - c) Ils ont une densité sèche inférieure à 880 kg/m^3 .

I.1.5.3. 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 [8].

<i>Dénomination</i>	<i>Classe du béton</i>	<i>Masse volumique apparente des granulats (kg/m³)</i>		
		<i><350</i>	<i>de 350 à 550</i>	<i>>550</i>
<i>Isolant thermique</i>	<i>I</i>	(+)	+	0
<i>Isolant thermique</i>	<i>II</i>	(+)	+	0
<i>Isolant thermique et /ou porteur</i>	<i>III</i>	+	(+)	+
<i>De structure</i>	<i>IV</i>	0	(+)	+
<i>De structure de haute résistance</i>	<i>V</i>	0	+	(+)

(+) utilisation recommandée + utilisation possible 0 utilisation impossible

I.1.5.4. Résistance des granulats

La résistance des granulats varie selon leur type et leur origine, les granulats de béton de structure, généralement durs et résistants et 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.

I.1.5.5. Porosité et absorption

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% [6, 9]. La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption.

L'absorption d'eau, importante et variable, des granulats légers a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons [3] et même à long terme, la durabilité.

Selon les granulats, l'absorption après 48 heures d'immersion totale peut varier de 7 à 25 % en pourcentage du poids sec du granulat. (Voir figure I-2).

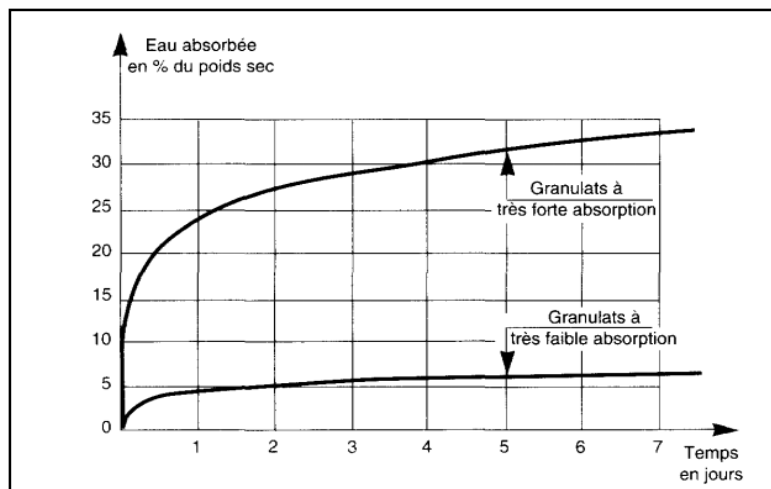


Figure I-2: Courbe d'absorption d'eau [3].

On remarque essentiellement deux choses :

- Une forte proportion de l'absorption se situe dans les premières minutes, ce qui permet d'envisager de minimiser ce phénomène par un prémouillage des granulats.
- L'absorption a tendance à être plus faible si les granulats sont plus denses, donc moins poreux, et s'ils présentent une surface plus lisse donc plus fermée à l'absorption.

I.1.5.6. Caractéristiques thermiques des granulats légers

La nature des granulats et le taux d'humidité ont une grande influence sur les caractéristiques thermiques.

I.1.6. Caractérisation technique des bétons légers

I.1.6. 1. Masse volumique apparente

C'est la caractéristique principale d'un béton léger, en raison de son grand effet sur les propriétés mécaniques et thermiques ou même variations dimensionnelles (figure I-3).

Elle dépend principalement du :

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

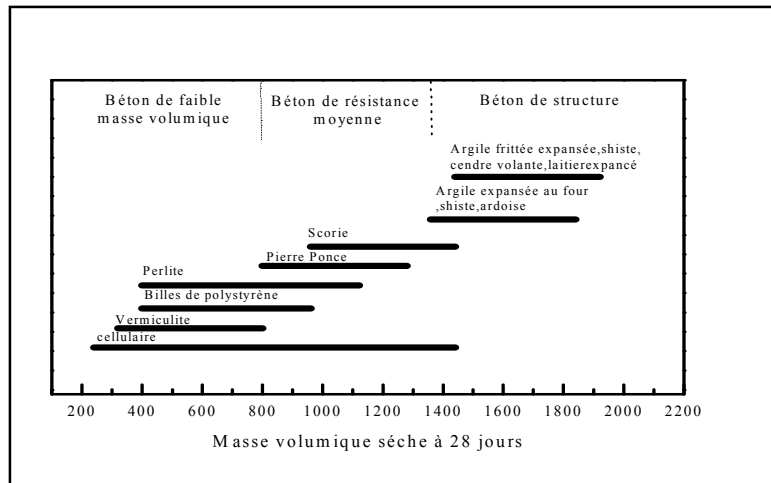


Figure I-3: Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R-87 [10].

I.1.6. 2. Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un béton léger est d'autant plus élevée que la résistance spécifique des granulats légers utilisés et leur masse volumique sont elles-mêmes plus grandes [11]. (Figure I-4 ; figure I-5 et tableau I-2)

La qualité des granulats est considérée comme le principal facteur limitant la résistance en compression des bétons de granulats légers, vient ensuite la qualité de la matrice utilisée et la masse volumique du béton durci [9,12]. (Figures I-6 ; I-7)

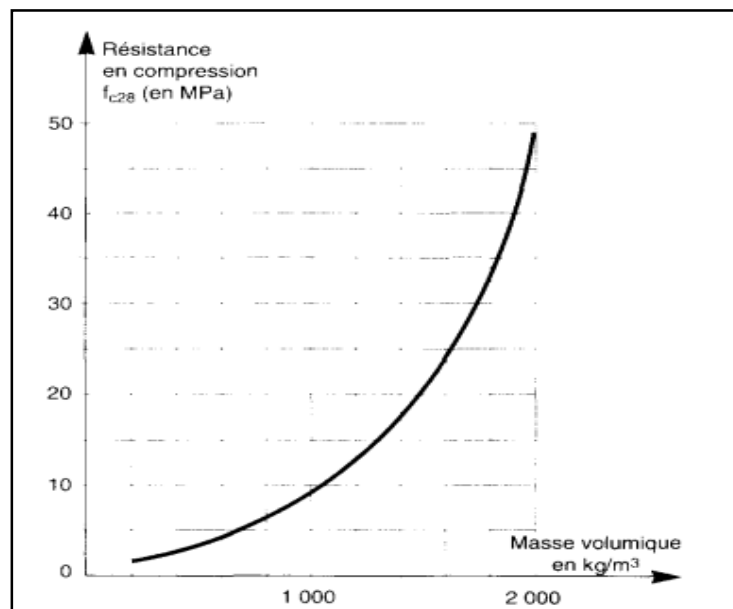


Figure I-4: Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique [3].

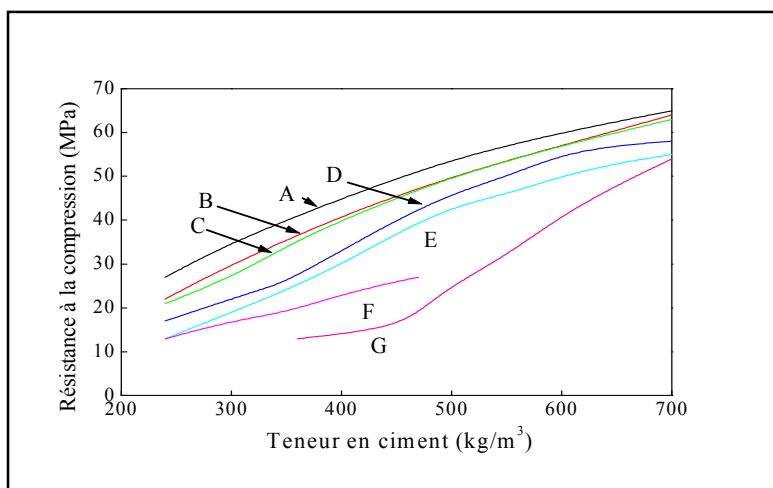


Figure I-5 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats [10].

Tableau I-2 : Désignation des différents types des bétons (Légendes de la figure I-5).

Graphe	Désignation
A	cendres volantes frittées et granulats ordinaires
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

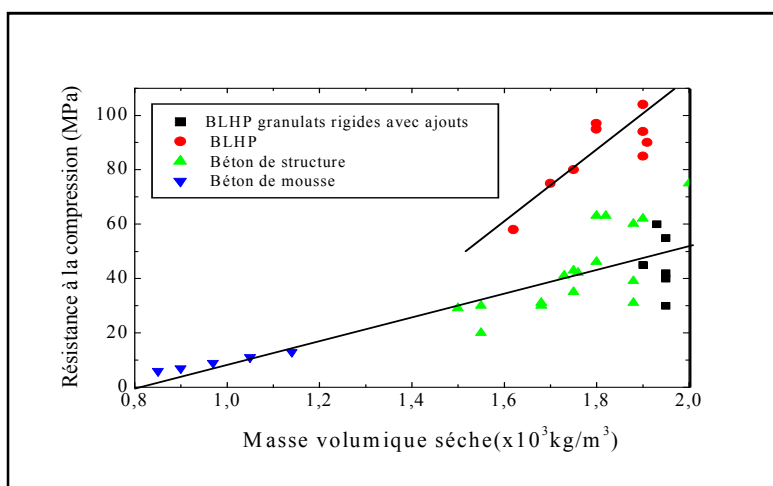


Figure I-6: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de grande résistance [9].

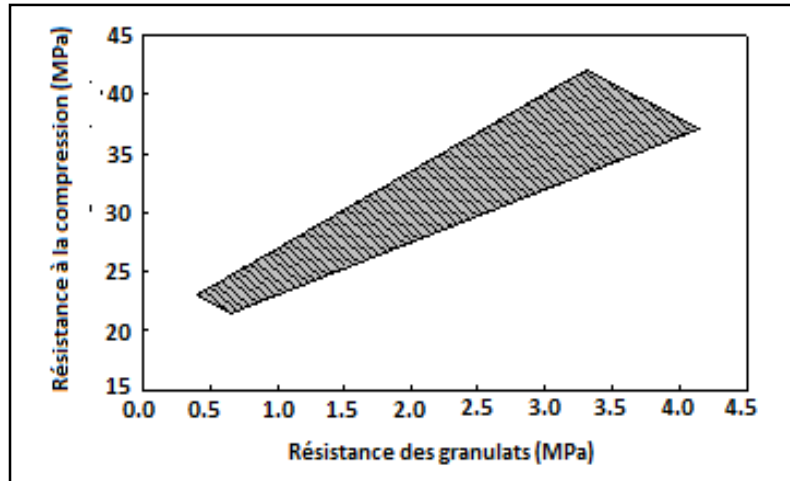


Figure I-7: Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains [6].

I.1.6. 3. Résistance à la traction

La résistance à la traction des bétons légers est exprimée, selon BAEL, par la formule [11] :

$$F_t = 0.5 + 0.05 f_c \quad (f_c \text{ en MPa}) \dots\dots\dots(I-1)$$

M.BONZEL donne une autre formule de calcul de la résistance à la traction du béton léger en fonction de la compression [10].

$$F_t = 0.23 f_c^{0.67} \dots\dots\dots(I-2)$$

I.1.6. 4. Module d'élasticité

Le module d'élasticité des bétons légers est fonction de leurs masses volumiques apparente et leur résistance à la compression :

$$E_b = \delta_b \cdot 6000 \sqrt{\sigma_{jm}} \dots\dots\dots(I-3)$$

Avec : δ_b masse volumique apparente du béton en t/m^3 .

σ_{jm} résistance à la compression du béton sur cubes en kg/cm^2 à (j) jours.

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs pour différents types de béton légers.

Tableau I-3: Module d'élasticité de quelques types de bétons légers

Type de béton	E_b (kg/cm ²)
Béton de ponce	30 à 70 000
Béton de laitier expansé	40 à 125 000
Béton de laitier expansé + sable	70 à 170 000
Béton d'argile ou schiste expansé	60 à 220 000
Béton de perlite	10 à 30 000
Béton de vermiculite	8 à 17 000
Béton cellulaire autoclavé	17 500
Béton de cendre volante fritté	100 à 220 000

I.1.6. 5. Cisaillement

Comme pour les modules d'élasticité, les valeurs du cisaillement sont plus faibles que pour les bétons normaux. La plupart des valeurs se situent à 60 % de celles des bétons normaux pour des résistances à la compression comparables, cela s'explique par la faible résistance des granulats légers [10].

I.1.6.6. Retrait et fluage des bétons légers

Le retrait des bétons légers est plus important que les bétons traditionnels car l'eau absorbée par les granulats se trouve progressivement restituée, retardant ainsi la déshydratation du mortier. Le retrait au séchage du béton léger est de 5 à 40 % plus élevé que celui du béton ordinaire et les bétons confectionnés avec les granulats d'argile, de schiste et laitier expansé sont dans la gamme des plus faibles retraits [10]. Le retrait relatif $\Delta L/L$ peut être évalué selon le dosage en ciment et en eau et selon le degré de dessiccation [3].

Les bétons légers ont un module d'élasticité instantané plus faible que les bétons traditionnels et leurs déformations instantanées environ le double que les bétons traditionnels. Cependant leur déformation de fluage est du même ordre que leur déformation instantanée [3].

I.1.7. Durabilité des bétons légers

L'utilisation des granulats légers n'affecte pas la durabilité à long terme du béton. En effet, la porosité des granulats est généralement discontinue et n'influence pas sur la perméabilité du béton. Cette propriété est plutôt contrôlée par la pâte du ciment durcie et par la qualité des

interfaces pâte-granulats. La résistance au gel et à l'écaillage du béton est obtenue en combinant des granulats et une matrice de qualité. Bien que les granulats légers soient très absorbants, ils sont néanmoins très durables au gel. Comme dans les bétons ordinaires, l'air entraîné permet de protéger efficacement le matériau contre le gel et l'écaillage.

L'absorption d'eau par immersion des bétons légers pendant 24 heures varie d'un granulat à un autre, elle est de 23 % pour les granulats de forte absorption et de 12 % pour les granulats de faible absorption [3].

I.1.8. Caractérisation thermique des bétons légers

I.1.8. 1. Conductivité thermique

Une des propriétés intéressantes des bétons des granulats légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton, ce pouvoir d'isolation se trouve caractérisé par le coefficient de conductivité thermique λ [3].

I.1.8.2. Résistance au feu

Lorsqu'un élément en béton est soumis au feu, il se produit un nombre restreint de phénomènes qui peuvent le conduire à la ruine :

- L'éclatement ponctuel ou plus ou moins généralisé.
- L'affaiblissement progressif des caractéristiques mécaniques.

L'éclatement se produit en général assez rapidement, le plus souvent dans les 20 à 30 premières minutes de l'incendie, et a pour origine l'expansion de la vapeur en laquelle s'est transformée l'eau que contient toujours le béton, lorsque celle-ci dépasse un certain pourcentage du volume et qu'elle ne peut s'échapper librement. Pour les bétons de granulats légers, on estime que le risque d'éclatement disparaît lorsque la teneur en eau descend en dessous de 5 à 7 %. On note également que ce risque est nettement moins élevé lorsque l'épaisseur des éléments dépasse 0.2 à 0.3 m [2].

En ce qui concerne l'influence du feu sur les résistances mécaniques, plusieurs études sur des bétons légers ont mis en évidence une sensibilité au feu relativement faible des bétons légers par rapport aux bétons traditionnels. La figure I-8 montre que le béton léger présente une perte de la résistance à la compression beaucoup plus faible que celle des bétons classiques et des bétons calcaires, après l'exposition à des températures comprises entre 100°C et 800 °C.

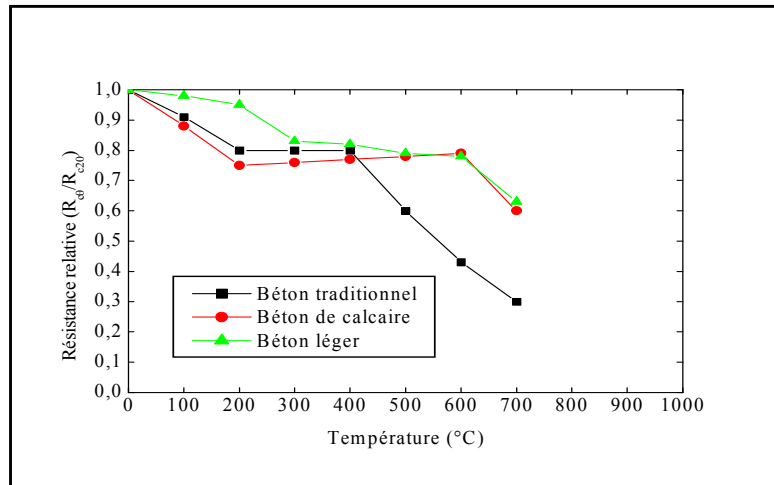


Figure I-8: Résistance à la compression du béton en fonction de la température [6].

I.1.9. Béton léger à base de granulats de liège

Plusieurs études ont été faites sur l'incorporation des granulats de liège au ciment et au plâtre pour obtenir un matériau composite.

Parmi ces travaux on trouve :

Aziz et al. [13], ont utilisé des granulés de liège obtenu à partir de l'emballage des déchets d'étals de fruits à Singapour pour fabriquer des produits en ciment liège. Ils ont mélangé le ciment et le liège dans la ration de 1:1 à 1:3 en volume et faites des échantillons de béton avec un écart de densité de 475 à 890 kg/m³, qui avait des forces de compression dans la gamme de 4,2 à 12,0 MPa et résistance à la traction entre les 0,6 et 2,0 MPa. Ils n'ont pas signalé de problèmes de compatibilité entre le ciment et le liège.

Fernando G. Branco et al [14], ils ont utilisé deux types de granulés de liège (naturels et le liège expansé) au lieu des granulats calcaires grossières primaires et / ou du sable de rivière. Quand le pourcentage de liège granulé a augmenté, la résistance à la compression du béton est tombée.

Lorsque le liège expansé est utilisé pour remplacer les agrégats, la perte de résistance a été généralement plus élevée que lorsque le liège naturel a été utilisé.

La figure I-9 montre la variation de la résistance à la compression avec la densité apparente. Les résultats indiquent que la force moyenne du béton contenant des granulats de liège est étroitement liée à sa densité apparente.

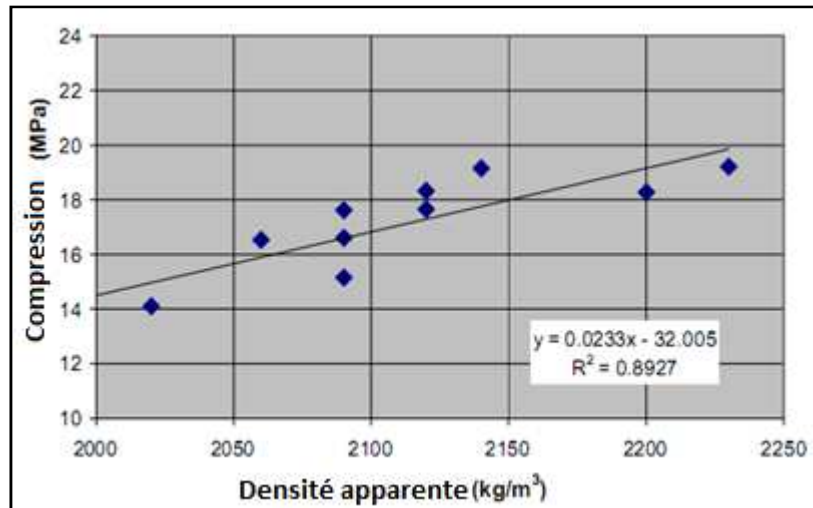


Figure I-9 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction de la densité apparente [14].

La figure I-10 montre la variation de la résistance moyenne à la compression avec la quantité de liège contenue dans le mélange. Une perte de force peut être observée avec l'augmentation du pourcentage de liège. Les deux types de liège étudié conduisent à des baisses similaires en force.

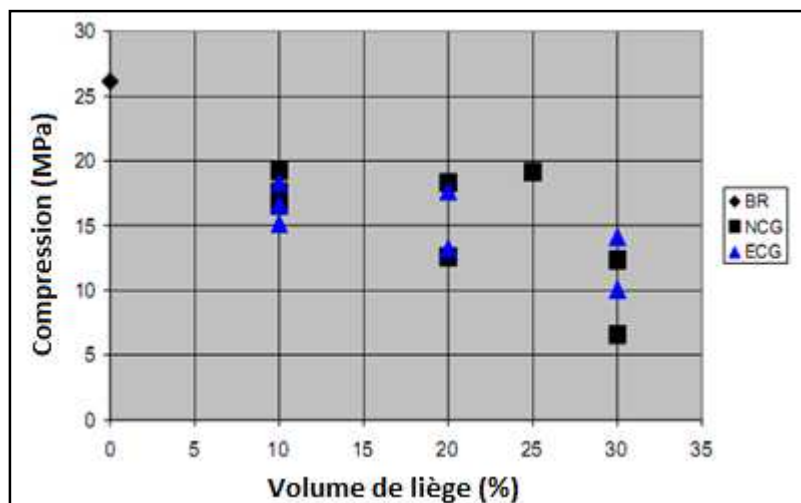


Figure I-10 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège [14].

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

Harnandez-Olivares et al [15], ils ont utilisé des déchets de liège avec du gypse pour la fabrication de matériaux composites. Ils ont trouvé de bonnes propriétés d'isolation thermique du composite. Basé sur l'examen de la liaison entre le plâtre et le liège par microscope

électronique à balayage (MEB), ils ont rapporté une bonne compatibilité entre le gypse et le liège.

Fernando G. Branco et al [16], ont évalué la durabilité du béton de liège vis-à-vis du phénomène de gel-dégel. Trois différentes compositions ont été étudiées : BR (béton de référence), BAER (béton contenant un produit entraîneur d'air), BE (béton de granulat de liège expansé).

La figure I-11 montre que BR est le plus dégradé que les autres bétons.

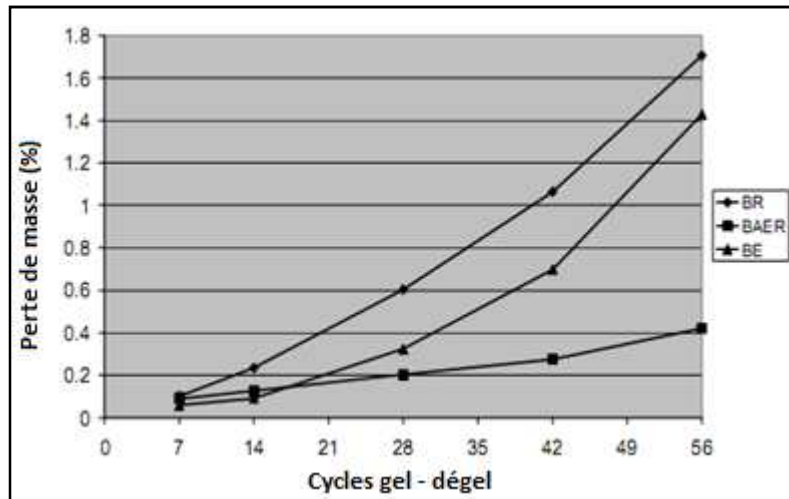


Figure I-11: Masse sèche cumulé du matériau dégradé [16].

En termes de dégradation de la surface. La performance du béton BE est approché à celui de BR. La perte de sa résistance mécanique est similaire à celui observé en BR.

Une augmentation de la résistance à la compression avec l'âge a été observée, pour tous les types de béton testé. La perte de la résistance mécanique du béton BE est similaire à celui observé en BR.

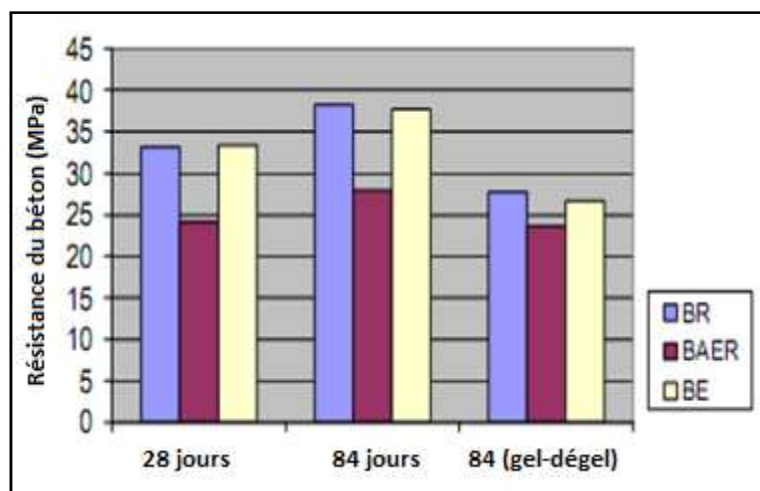


Figure I-12: Résistance moyenne à la compression du béton [16].

Merabti Salem [17], a fait une étude expérimentale sur trois types de déchets de liège (expansé, cru et poudre de liège expansé) et mélangé en volume avec le ciment (C/L :1/1, C/L :1/2, C/L :1/3) pour obtenir un matériau composite.

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que la résistance à la compression et à la traction diminue avec l'augmentation du volume des granulats du liège et l'absorption d'eau par immersion est très élevée pour les deux matériaux (expansé, cru), elle est comparable à celle du béton léger. La conductivité thermique du matériau élaboré varie entre 0.19 à 0.34 W/m.°C selon le dosage de liège .

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

EL BAKKOURI.A et al [18], ont constaté une nette amélioration du pouvoir d'isolation thermique du béton incorporé du liège . Ceci s'explique par une porosité fermée très grande dans les granulats du liège. Ce résultat apparaît évident si on compare les valeurs de la conductivité thermique apparente à l'état sec, dans le cas du liège granulaire ($\lambda = 0.034$ W/m°C, figure I-13).

D'après les résultats obtenus, ils remarquent que la résistance à la compression diminue en augmentant la quantité du liège.

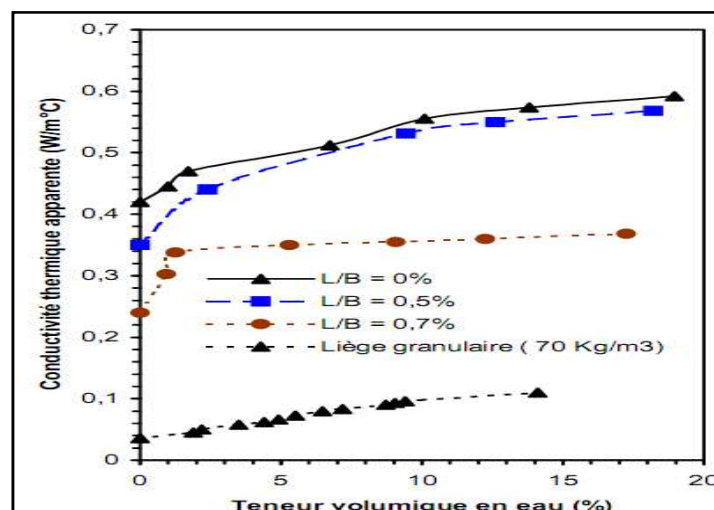
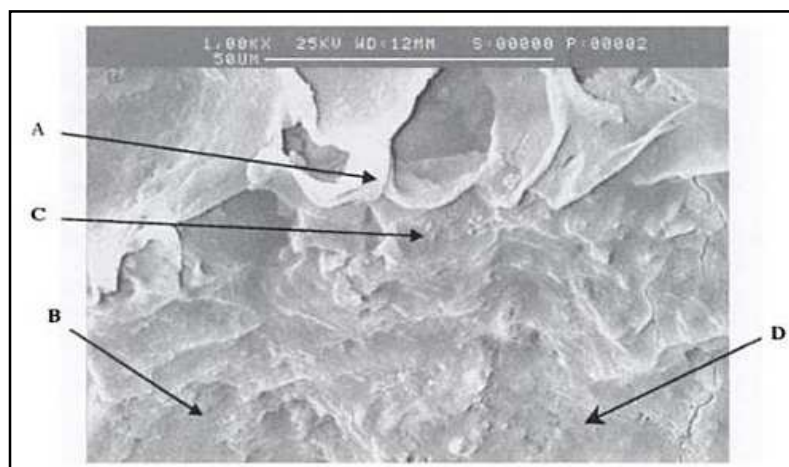


Figure I-13 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau : cas du béton de liège [18].

Karade.S.R et al[19], ont trouvé une bonne liaison entre liège -ciment , que peut être vu dans la figure I-14. Après la fissuration de la pâte de ciment, le lien entre les cellules du liège et de la pâte de ciment est intact.



A : paroi cellulaire du liège, B : pâte de ciment hydratée, C : une bonne liaison entre la paroi cellulaire du liège et de la pâte de ciment, D : fissure dans la pâte de ciment.

Figure I-14 : Micrographie d'échantillons de la composition liège - ciment fracturée (MEB)[19].

Les résultats indiquent que les granulés de liège réduisent considérablement la résistance de la composition. L'avantage d'utiliser des granulés de liège est qu'ils contiennent plusieurs cellules ouvertes à leurs surfaces. Cela facilite une bonne liaison avec la pâte de ciment, comme on peut le voir dans la figure I-14. Depuis le liège contient environ 85% en volume de vides d'air, son ajout à la matrice de ciment réduit la densité du béton. Il en résulterait une conductivité thermique réduite.

Lorsque la charge est appliquée sur les cellules du liège, du gaz au sein de la cellule est comprimé et donc aucune expansion latérale a lieu, ce qui permettra de réduire le fractionnement latérale de composites.

R. Eires et al [20], ont utilisés des déchets de l'industrie de liège contenant différentes tailles de particules dans la fabrication de plâtre et des panneaux de plâtre pressés, avec des pourcentages de 2,5% et 5% de la masse de gypse.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de granulés de liège semble être possible et durable et réduire la densité du mélange notamment l'amélioration des comportements thermiques et acoustiques. Toutefois, réduit les performances mécaniques.

I.1.10. Principaux avantages des bétons légers

- ✓ **Légèreté** : La grande légèreté des bétons légers par rapport aux bétons normaux est l'une des caractéristiques les plus intéressantes. C'est elle qui permet des économies décisives dans la construction.
 - Economies sur les fondations
 - Economies sur les structures par la réduction du poids mort des éléments de construction
 - Economies sur les engins de manutention et les coffrages
- ✓ **Isolation thermique** : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique plus important qu'un béton classique. Leur utilisation nous permet une simplification des éléments de construction et économies de chauffages.
- ✓ **Maniabilité** : Pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- ✓ **Imputrescible** : Le béton léger est un matériau à pH basique.
- ✓ Non inflammable
- ✓ Aisément façonnables et facilement clouables.
- ✓ Exécution simple et rapide

I.1.11. Utilisations diverses des bétons légers

Les bétons légers sont utilisés dans les domaines suivants :

- ✓ Bloc de maçonnerie.
- ✓ pistes de sport, cendrées,
- ✓ couches filtrantes pour stations d'épuration,
- ✓ chapes,
- ✓ fours, cheminées,
- ✓ panneau préfabriqué.
- ✓ porcheries, étables.
- ✓ Sous-couches de route : protection contre le gel et couche de base dans la construction des routes et des voies ferrées.
- ✓ Les pavés.

I.1.12. Aspect environnemental des bétons légers

La production du béton léger nécessite moins de matières premières (sables, pierres, graviers etc.). Ainsi, le nombre de cycles de transport liés à l'utilisation des bétons légers (comparativement à ceux ordinaires de même poids) étant moins élevé, cela entraîne moins de dégagement de CO_2 (qui est un gaz à effet de serre) ; et par conséquent la réduction des risques de changement climatique. Et aussi nécessite moins d'énergie fossile par rapport au béton ordinaire. Par sa qualité isolante, le béton léger limite les pertes d'énergie dans la construction.

I.2 SABLE CALCAIRE

La consommation des granulats a connu un accroissement considérable avec les progrès dans le domaine de la construction au niveau de la qualité et aussi quantité, et cela pour objet d'équilibrer la demande insistée des logements et l'expansion démographique.

Le sable concassé est très abondant dans les carrières de gravier calcaire et son utilisation pourrait réduire considérablement les coûts des matériaux de béton, minimiser le coût d'élimination de la poussière, réduit les pollutions environnementales et dilapidation des ressources naturelles [21].

Importantes études sont menées sur l'utilisation des sables de concassage. Ces sables contiennent des taux de fines, qui dépassent les exigences des normes en vigueur. Des études antérieures ont montré qu'il est possible de fabriquer un bon béton en utilisant un sable concassé contenant jusqu'à 15% de fines.

I.2.1. L'influence des fines calcaires sur les bétons ordinaires à l'état frais

Les fines calcaires ont une grande influence sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons ordinaires.

les fillers calcaires ont la particularité de s'associer chimiquement avec les hydrates de ciment et donc favorisent l'adhérence entre les particules de sable du fait de la présence des fines, les bétons de sable nécessitent plus d'eau de mouillage que les bétons classiques, ce qui se traduit par des valeurs E/C plus élevées ($>0,5$) si on ne considère que le ciment, mais ce rapport devient similaire à celui des bétons classiques si on considère (C+F), F étant les fillers. Pour un rapport E/C constant, plus le sable sera grossier, plus la maniabilité sera bonne puisque la surface à mouiller est moins importante. De même, l'augmentation de la teneur en fines entraîne une perte de maniabilité sauf dans le cas des fines sphériques non absorbantes qui améliorent la maniabilité tout en réduisant la quantité de vides [22].

HABBOUCHE, A [23] a effectué des essais sur des bétons confectionnés avec trois type de sable de concassage et deux types de ciments. Il a incorporé les fines calcaires dans les sables avec des pourcentages de 0, 10, 15 et 20 % et il a conclu que l'eau de gâchage varie proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires.

SKENDER ZAKARIA [24], a remarqué que l'affaissement diminue avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires pour tous les types de ciments (A, B et C) utilisés. La plus faible diminution d'affaissement est observée à 25 % d'ajout calcaire, cette diminution est due principalement à la forte absorption d'eau par les fines calcaires.

BOUZOUALEGH Malik [25] a utilisé deux sables calcaires (El khroub et Ben Azzouz). L'ensemble des bétons mis en œuvre ont été confectionnés à ouvrabilité constante avec un affaissement au cône $\approx 10\text{cm}$ en faisant varier le rapport E/C. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure I-15.

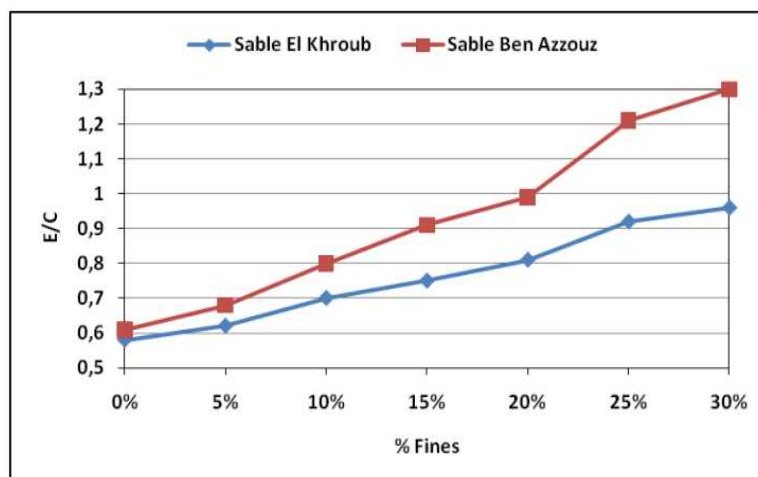


Figure I-15: Variation du rapport E/C en fonction des fines [25].

Il a remarqué que le rapport E/C augmente avec le pourcentage des fines, il est lié à la présence des fines calcaires et leur pouvoir absorbant.

I.2.2. L'influence des fines calcaires sur la compacité

CHANVILLARD et Basuyaux [26], ont montré que l'ajout de micro-filler calcaire permet d'augmenter la compacité de la pâte figure I-16.

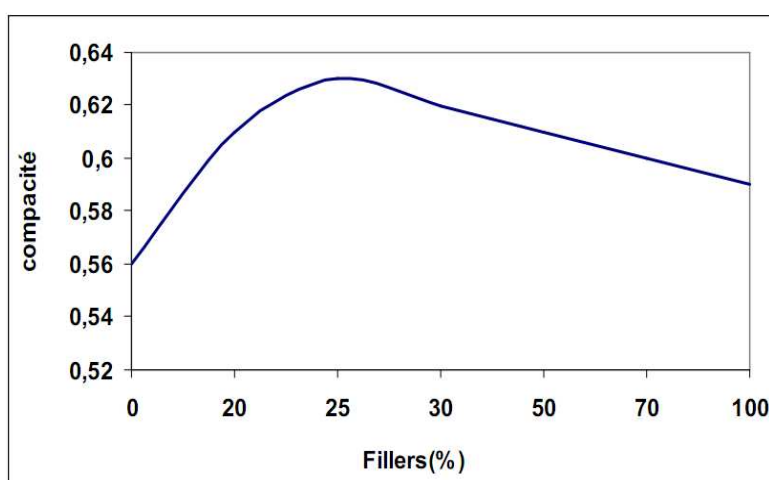


Figure I-16: compacité du mélange ciment /micro filler calcaire [26].

BENNA, Y [27], a montré que la masse volumique augmente rapidement pour un taux de fines allant de 0 % à 10 % puis s'accroît très faiblement entre 10 et 25 %. Il a constaté que la compacité optimale est obtenue pour des pourcentages de fines allant de 10 à 25 %. Figure I-17.

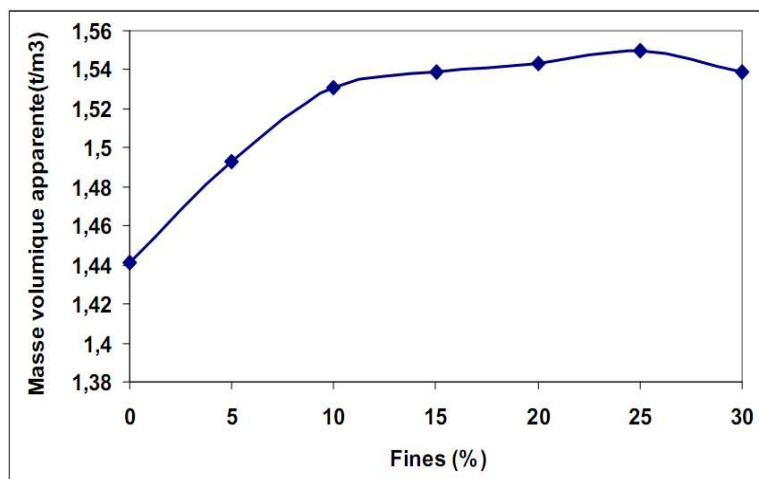


Figure I-17: Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines [27].

F.Sadhouari et al [28], ont remarqué que la densité réelle du béton augmente rapidement pour les taux de fines allant de 0 à 15%. Au delà de 15% une diminution est observée pour les deux bétons (béton à base de granulats de kristel.(BGK), béton à base de granulats de sidi Ali Benyoub (BGS)).

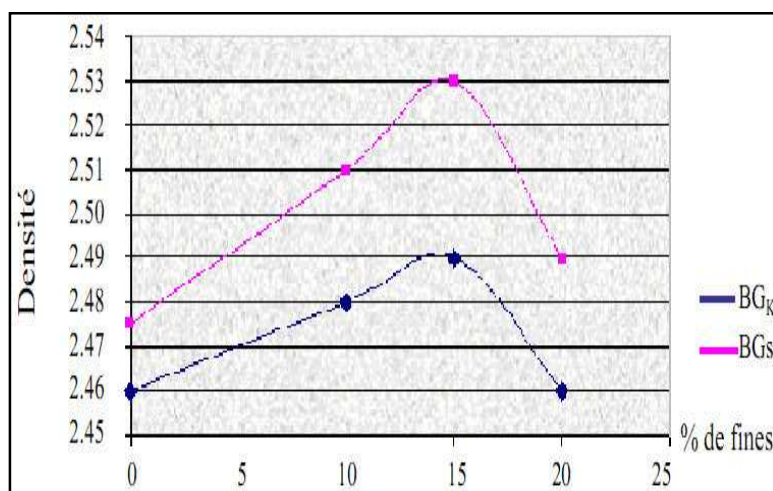


Figure I-18 : Variation de la densité en fonction des taux de fines [28].

I.2.3. L'influence des fines calcaires sur la résistance à la compression

La présence des fines calcaires dans les mortiers et les bétons peut modifier considérablement leurs résistances mécaniques.

RAMIREZ et al [29] ont effectué des essais sur des mortiers confectionnés avec des sables de granulométrie grossière et fine avec un pourcentage de fines de 3 %, 5 %, 8 %, 12 % et 15 % ou 3 %, 8 %, 12 %, 15 % et 20 %, respectivement avec des teneurs d'argile dans le sables (A/S) de 0, 2, 4 et 6 %. Ils n'ont remarqué, pour un pourcentage de fines de 20 %, aucun changement de tendance. Par contre un accroissement de la résistance à la compression en présence des fines variant entre 3 % et 20 % en absence d'argile pour les deux types de granulométrie grossière et fine. L'augmentation de la proportion d'argile dans le sable a induit une chute de la résistance à la compression des mortiers de façon importante (Figures I-19 et I-20).

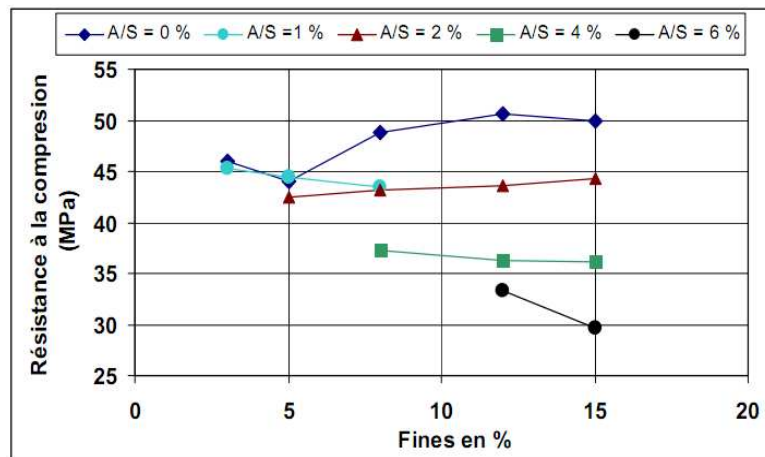


Figure I-19: Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie grosse, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S : Argile/Sable) [29].

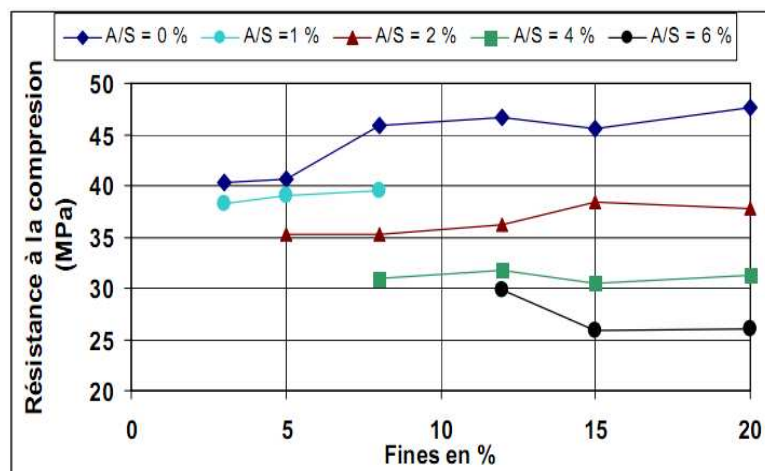


Figure I-20 : Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie fine, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S :Argile/Sable) [29].

KENAI et al [30] ont réalisé des essais sur deux bétons confectionnés avec du sable concassé contenant des fines calcaires, le premier avec un dosage en ciment de 350 kg/m^3 , et le deuxième avec un dosage de 300 kg/m^3 . Ils ont introduit les fines calcaires à des pourcentages de 0, 5, 10, 15, 20 et 25 % en poids de ciment. La variation de la résistance à la compression à 28 jours des bétons avec le pourcentage des fines est représentée sur la figure suivante.

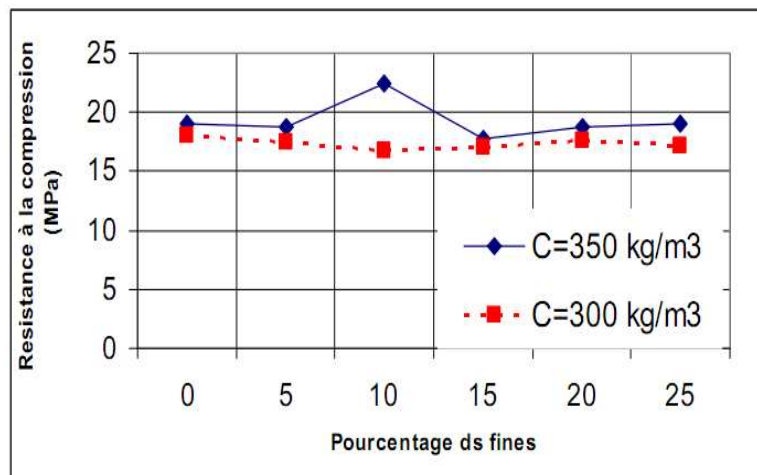


Figure I-21: Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines

D'après les résultats obtenus, ils ont conclu qu'il est possible d'utiliser des sables de concassage pour béton et mortier contenant 15 % à 20 % de fines calcaires sans affecter la performance du béton [30].

HABBOUCHE, A [23] a effectué des essais sur des bétons confectionnés avec trois types de sable de concassage et deux compositions (A et B). Il a varié le pourcentage des fines à (0 %, 10 %, 15 %, et 20 %) pour la composition A et (0 %, 8 %, 12 % et 15 %) pour la composition B. Il a remarqué que le béton (A) et pour tous les sables donne une augmentation de la résistance à la compression de 20 % pour un optimum de fines de l'ordre 15 %. Une augmentation de résistance à la compression de 7 % est observée pour le béton (B) pour un optimum de fines de 12 %.

BONAVETI, et al [31], ont utilisé trois types de fines (Calcaire, Quartz, et Granite) pour la confection de trois mortiers contenant 5, 10, 15 et 20% de fines. Les essais réalisés sur ces mortiers ont montré que les fines calcaires, améliorent la résistance à la compression des mortiers à jeunes âges (7 jours).

SKENDER ZAKARIA [24], a observé que la substitution de 15 % de fines calcaires au sable de concassage n'a pas affecté négativement la résistance à la compression.

BOUZOUALEGH Malik [25], a montré la possibilité de confectionner des bétons à base de sable de concassage contenant des proportions de fines de l'ordre de 15 à 20% sans conséquences préjudiciables sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

F.Sadhouari et al [28], ont fait une étude pour la valorisation des matériaux locaux (sable de concassage), à travers la connaissance des effets des fillers calcaires sur les caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons. Les résultats ont montré que les bétons formulés avec les deux sables de concassage utilisés (Kristel et Sidi ali-benyoub) occasionnent une augmentation de résistance à la compression de 20% pour un optimum de fines de l'ordre de 15%.

Les courbes d'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de fines présentent la même allure quel que soit l'âge des éprouvettes des différents types de bétons testés. Figures I-22 et I-23.

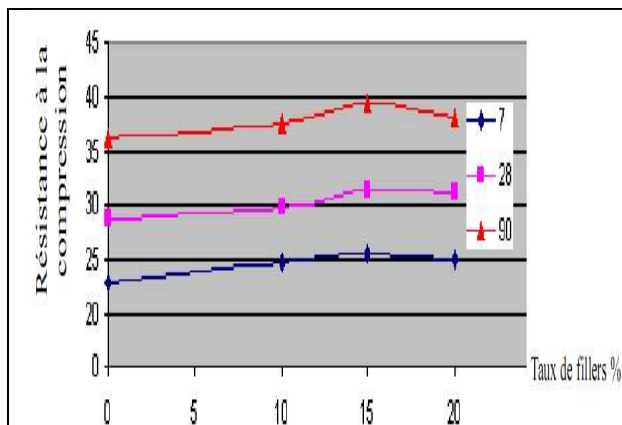


Figure I-22 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Kristel) [28].

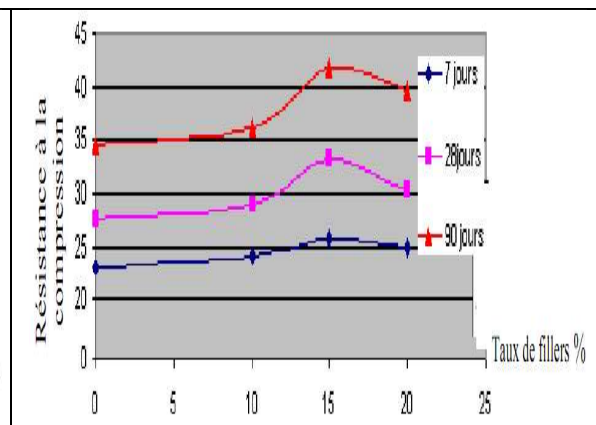


Figure I-23 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Sid Ali benyoub) [28].

I.2.4. L'influence des fines calcaires sur la résistance à la traction

BONAVETI V, L et al [31] 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. L'augmentation était plus prononcée à jeune âge. Après 28 jours, l'effet de toutes les fines de pierres était essentiellement le même indépendamment de leurs compositions et leurs quantités dans le mélange (Figure I-24).

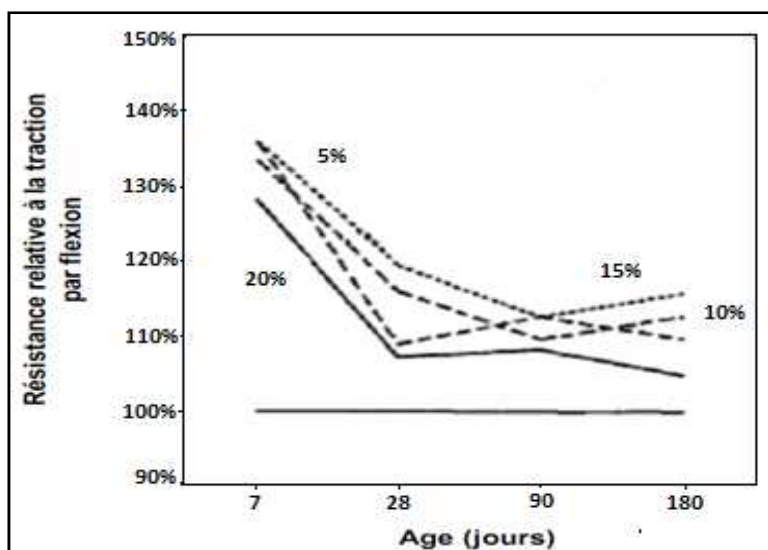
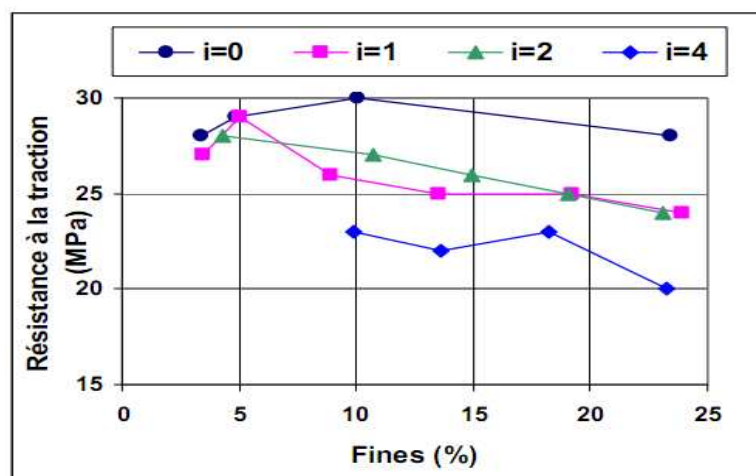
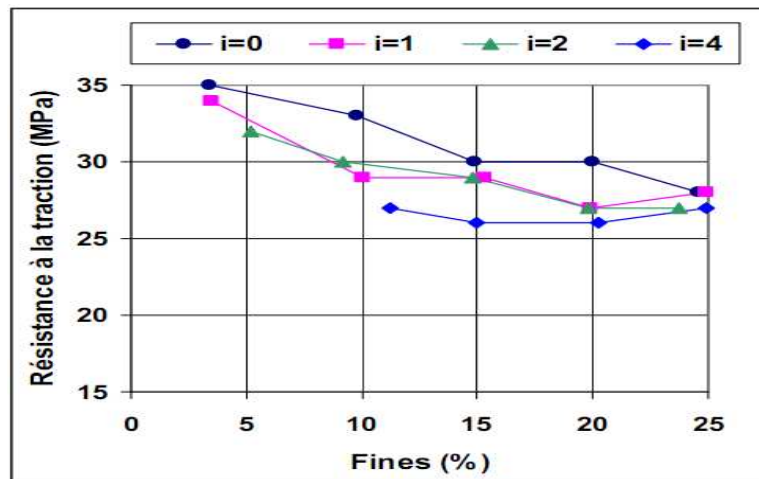


Figure I-24: Résistance relative à la traction des mortiers avec fines calcaires [31].

RAMIREZ et al [32,29] ont aussi obtenu le même résultat que **BONAVETI** et les tendances observées pour la résistance à la traction par flexion sont similaires à celles de la résistance à la compression (Figures I-25 et I-26).



Figures I-25 : Résistance à la traction des mortiers (dosage 250 kg/m³) [32].



Figures I-26 : Résistance à la traction des mortiers (dosage 325 kg/m³) [32].

I.3. ETAT DE CONNAISSANCE SUR LE LIEGE

I.3.1. Introduction

La croissance économique mondiale durable et l'amélioration de la vie des gens est grandement dépendante de l'utilisation de produits alternatifs dans l'architecture et la construction, tels que les déchets industriels classiquement appelés matériaux verts qui engendrent le sous-produit de l'industrie du liège (Les granulés de liège) [33].

Compte tenu de ses diverses intéressantes caractéristiques mécaniques et physiques, le liège est un matériau polyvalent avec une grande multitude d'utilisations possibles. Dans les dernières décennies, le liège a été beaucoup plus utilisé comme matériau dans l'industrie du bâtiment. Il a contribué à améliorer la qualité et la performance des produits existants et nouveaux, principalement pour l'isolation thermique et acoustique, mais aussi comme un absorbeur de vibrations [14].

I.3.2. Air naturelle de répartition de chêne liège

La subéraie mondiale, répartie exclusivement sur sept pays [34] (Figure I-27).

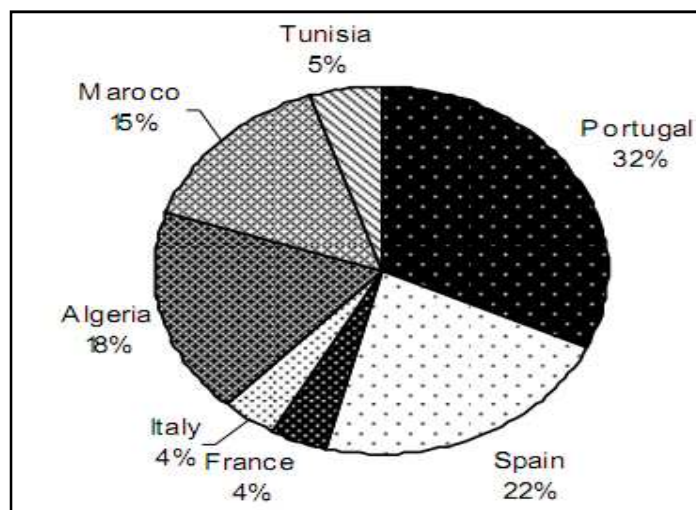


Figure I-27: Superficie de chêne liège à travers les pays du monde [35].

En Algérie, la forêt du chêne liège est localisée entre le littoral et une ligne passant approximativement par Tizi-Ouzou, Kherrata, Guelma et Souk ahras. Il est également représenté à l'ouest dans la région de Tlemcen et Mascara.

Les principales subéraies algériennes sont situées essentiellement en zone sub-humide et humide au nord, et entre l'algérois et la frontière Tunisienne, où elles s'étendent de la mer jusqu'à 1200 m d'altitude.

La subéraie Algérienne couvre une superficie de 440.000h ce qui représente 11% de la superficie forestière Algérienne et 18% de la subéraie mondiale (Tab.I-4).

Tableau I-4 : Répartition du chêne liège en Algérie par région subéricole

Principales régions	Superficie	Pourcentage
Région Constantinoise	392000 ha	89%
Région algéroise	41000 ha	10%
Région oranaise	7000 ha	1%
Total	440000 ha	100%

La production mondiale de liège est estimée à 340.000 tonnes/an, dont l'Algérie a été le troisième producteur mondial de liège brut avec 40.000 tonnes/an.

I.3.3. Caractéristiques techniques du liège

Le chêne liège est une espèce typiquement méditerranéenne, de taille moyenne 10 à 15 mètre, peut atteindre 20 à 25 m [34]. La moyenne de vie d'un chêne-liège est d'environ 170 ans [36,19].

Le liège est constitué d'un empilement de cellules qui sont remplies de gaz d'une composition proche de l'air mais plus faible en CO₂. On estime que 1 cm³ de liège comporte entre 15 et 40 millions de cellules [37].

I.3.3.1. Constitution du liège

Le liège est constitué de [37, 38, 39]:

- **La subérine pour 45%** : Principale composante des parois des cellules du liège et lui permettant son élasticité.
- **La lignine pour 27%** : Elle permet la liaison entre les divers composants.
- **Les polysaccharides, cellulose pour 12%** : Composants des parois des cellules, contribuent à la définition de sa texture.
- **Les tannins pour 6%** : Ils déterminent la couleur.
- **Les céroïdes pour 5%** : Composés hydrophobes assurant l'imperméabilité.
- **Les autres constituants pour 5%** : Minéraux, eaux, glycérine

Une étude menée par **Gil et al [19]**, en utilisant des techniques de RMN, il a été vérifié que la subérine est responsable de l'imperméabilité à l'eau de liège.

I.3.3.2. Qualités du liège

La composition chimique, avec sa structure cellulaire particulière, fournit en liège avec d'excellentes propriétés [37, 20, 14,19]:

- **Elasticité - Compressibilité – Souplesse** : Comprimé rapidement dans sa limite élastique, il reprend presque instantanément 85% de son volume initial. Il Amortit les vibrations par sa structure cellulaire et son élasticité.
- **Légèreté** : Sa faible densité est variable avec la qualité du liège. elle est due à l'air contenu dans ses cellules. Sa masse volumique est comprise entre 100 et 130 kg/m³.
- **Imperméabilité - Etanchéité**: Il absorbe moins de 18 à 20% d'eau. Il résiste à l'action des hydrocarbures. Il ne conduit pas d'électricité.
- **Imputrescibilité – Durabilité** : Du fait de sa faible perméabilité, il résiste aux agents extérieurs. Il résiste aux parasites, termites et rongeurs. De plus il ne moisit pas.
- **Faible conductivité phonique et thermique** : Du au fait que l'air reste enfermé dans ses cellules (minuscules compartiments étanches) et isolé par une matière non hygroscopique (substance qui a tendance à absorber l'humidité de l'air) et de faible poids spécifique. Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,035 et 0,045 W/m.K (à titre de comparaison, celui des différentes laines de verre est compris entre 0,035 et 0,060 W/m.K); c'est la raison pour laquelle le tissu subéreux du chêne liège figure parmi les substances douées de la plus haute capacité isolante. Il absorbe un maximum des ondes sonores grâce à sa structure cellulaire unique.

I.3.4. Comparaison entre le liège et le bois

Le granulé de liège peut être considéré comme un agrégat léger plutôt que des fibres de renfort. La différence la plus caractéristique de la composition chimique entre le liège et le bois est la présence de subérine dans le liège, la subérine est un polymère composé d'alcools aliphatiques à longue chaîne et de monomères d'acide. Il est hydrophobe et lorsqu'ils sont combinés avec des cires, il contribue de manière significative à l'imperméabilité du liège[19].

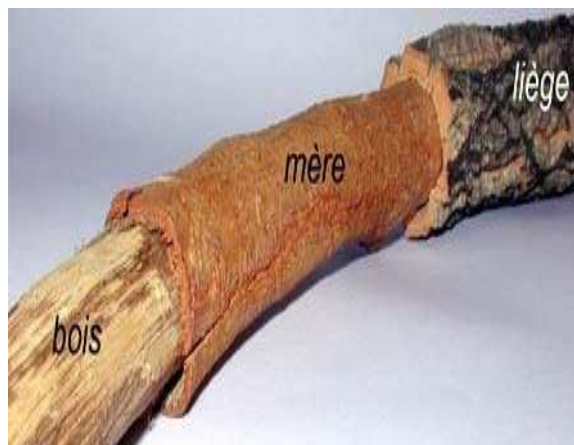
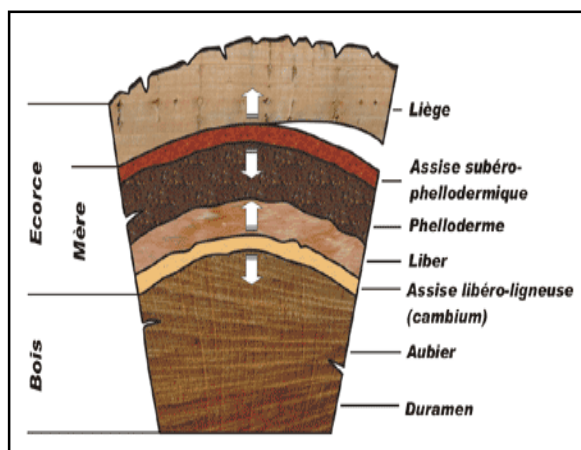
Tableau I-5: Comparaison de la composition chimique du liège et de bois [19].

Constituents principales (% en poids)	bois		liège
	résineux	bois	
Cellulose	40 - 45	45 - 50	9
hémicelluloses	20 - 30	20 - 35	11
lignine	26 - 34	22 - 30	22
Extraits	0 - 5	0 - 10	15 - 20
Subérine	---	---	40

Il peut être vu que le bois est plus fort que le liège. Cela peut être dû au fait que le bois est un matériau cellulosique contenant de la fibre, alors que le liège est un matériau granulaire et ne contient que 9% de cellulose par rapport au bois, qui contient de 40 - 50% de la cellulose[19].

I.3.5. Production du liège

L'écorce est composée de deux parties. La plus interne est dite écorce mère (Figure I-28) qui produit le liège, écorce qu'il ne faut pas abîmer lors de la récolte. La première écorce d'un arbre est dite mâle (Figure I-29): c'est un liège de mauvaise qualité, qui se développe naturellement sur le tronc et les branches de l'arbre. Il est susceptible d'atteindre une forte épaisseur (jusqu'à 25 ou 30 cm), mais il se crevasse fortement en vieillissant, devient compact, siliceux, dépourvu d'élasticité, ce qui ne permet pas de l'utiliser pour l'industrie[38].

**Figure I-28 :** Schéma de constitution de liège [38].



A : Liège male



B : Liège femelle

Figure I-29 : Liège male et femelle

Pour récolter du liège de bonne qualité, écorce liégeuse, plus régulière, plus homogène, plus élastique et moins crevassée, il faut enlever cette écorce mâle sur des sujets assez âgés, et attendre que l'écorce mère produise à nouveau du liège. L'écorce primitive est coupée sur une hauteur de deux mètres environ, et les troncs présentent alors une couleur brun rouge très caractéristique sur toute la partie démasclée. L'écorce mère va donc produire à nouveau des tanins, donc une épaisseur de liège dit écorce femelle (Fig I-29) que l'on récolte environ tous les dix ans. Cette opération s'appelle le levage (Fig I-30), et elle est faite par un leveur, avec un outil spécial [40].

**Figure I-30**: Récolte de liège

La moitié de l'écorce de ces arbres est soigneusement enlevé tous les 9-12 ans [19]. La qualité de liège est ensuite croissante puis elle finit par diminuer au fur et à mesure que l'arbre vieillit : un chêne-liège peut ainsi subir entre 12 et 15 écorçages au cours de sa vie [38].

Pour le liège expansé, le liège peut provenir directement de la levée, de liège à recycler 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, 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 sur-cuisson. Les blocs sont stockés pendant une quinzaine de jours pour assurer leur stabilisation. Les blocs sont ensuite dimensionnés

comme voulu et découpés 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 au niveau de l'usine de Jijel se déroule selon les étapes suivantes [41] :

- 1) **Approvisionnement** : Matière première : lièges (Mâle, rebut, ramassage, bandes perforées (récupération)).

- 2) **Meunerie**
 - 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**
 - Grain humide séchage filtration
 - Grain sec (taux humidité $\leq 8\%$)

- 4) **Agglomération**
 - Cuission à la vapeur surchauffée $T^\circ = 380^\circ\text{C}$
 - Capacité 260 blocs / 8 h chaque bloc ($p = 21$ à 22 kg , $v = 0,17\text{ m}^3$)
 - Stockage des blocs

- 5) **Sciage**
 - Équarrissage (longitudinale - transversale)
 - Sciage des plaques (2,3,4,5,6.....30 cm)

- 6) **Reagglomération**
 - Récupération des déchets de sciage
 - Broyage Tamisage filtration
 - Stockage des **grains expansés** 3/8 et 8/15
 - Malaxeur avec colle Moulage des blocs
 - Etuvage pendant 12 h Refroidissement Sciage

I.3.6. Granulé et re-granulé du liège expansé

Les granulés de liège sont des fragments ont une granulométrie supérieure à 0,25 mm et inférieur à 22,4 mm. Les particules inférieures à 0,25 mm sont considérées comme poudre du liège [39].

Les granules et / ou re-granulé de liège peut être utilisé comme un produit final dans le but d'isolation thermique, pour remplir les espaces vides entre les doubles parois. Les granulés sont également utilisés dans la préparation du mortier avec du béton, pour diminuer le poids de certains éléments de construction, ou même dans la fabrication de pièces de construction / blocs.

Le regranulé de liège est un produit dérivé des agglomérés de liège expansé. Sa principale application est comme un mur de remplissage, une terrasse. Son utilisation peut également être étendue à des mélanges de béton.

Les caractéristiques techniques de re-granulé de liège peuvent être référencées comme suit:

- Densité (masse volumique) = 70 à 80 kg/m³
- Coefficient de conductivité thermique = 0.048 W / m. °C
- Granulométrie = 0 / 3 - 0 / 15 - 0 / 10 - 3 / 15mm.

Tableau I-6 : Caractéristiques de béton léger avec re-granulé de liège expansé [39,42].

Composition (volume)			Densité (kg/m ³)	Résistance de compression (daN/cm ²)	Conductivité thermique (w/m.k)
Ciment	Sable	Re-granulé			
1	0	6	400	2	0.13
1	0	4	500	6	0.18
1	2	6	900	11	0.24
2	3	8	1100	17	0.60

Les granulats de liège expansé utilisés dans notre travail sont les grains 3/8 et 8/15 issue de l'étape de reagglomération (regranulés).

I.4. TRANSFERT THERMIQUE

I.4.1. Introduction

La plupart des matériaux utilisés dans la construction pour l'isolation thermique des bâtiments sont des matériaux poreux. Aussi la connaissance des propriétés physiques de ces milieux poreux révèle une grande importance, en particulier les lois qui régissent les transferts de chaleur et de masse dans ces matériaux [43].

I.4.2. Description physique d'un matériau poreux

Un matériau poreux de type béton ou roche, à l'état "naturel", est un milieu hétérogène triphasique constitué d'une phase solide (matrice) supposée indéformable et de deux phases fluides en équilibre thermodynamique: une phase liquide (eau) et une phase gazeuse (air+vapeur d'eau) assimilée à un gaz parfait (Figure I-31). La température de ces deux phases est supposée dans tous les cas supérieure à 0°C et inférieure à 100 °C a fin d'écarter les états extrêmes de gel et d'ébullition de l'eau [44].

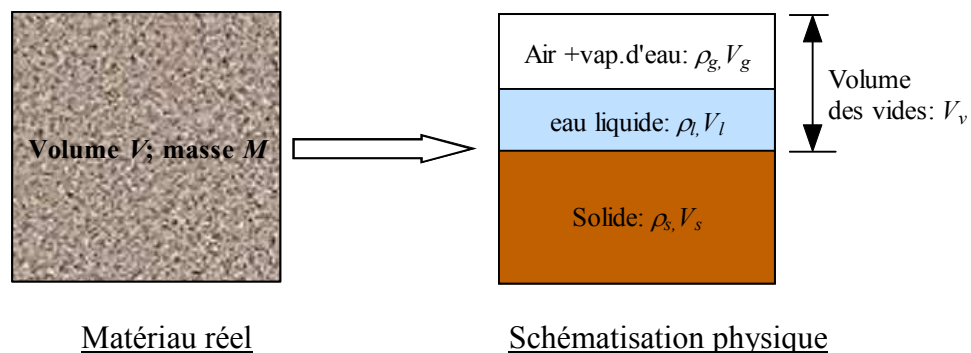


Figure I-31 : Schématisation macroscopique d'un matériau poreux dans un état hydrique quelconque

Avec :

M_g , M_l , M_s sont respectivement la masse de la phase gazeuse, liquide et solide (kg)

V_g , V_l , V_s sont respectivement le volume de la phase gazeuse, liquide et solide (m³)

$V_v = V_g + V_l$: volume des vides (m³)

M et V sont la masse totale et le volume total du matériau poreux.

$V = V_v + V_s$

➤ Porosité :

La porosité est définie comme étant le rapport du volume occupé par ces pores (espaces vides) au volume du milieu poreux

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} \dots \dots \dots (I-4)$$

On distingue deux types de porosité (fermée, ouverte) :

▪ Porosité ouverte

La porosité ouverte ε_o d'un matériau est la fraction sans dimension du volume occupé par les pores ouverts sur le volume total. Elle joue un rôle important dans le processus de transport d'humidité et conditionne la durabilité du matériau.

$$\varepsilon_o = \frac{V_o}{V} \dots \dots \dots (I-5)$$

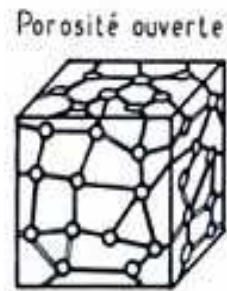


Figure I-32: Schéma de porosité ouverte

Avec :

V_o : volume des pores ouverts.

▪ Porosité fermée

La porosité fermée ε_f d'un matériau est la fraction sans dimension du volume occupé par les pores fermés sur le volume total. Elle joue un rôle important vis-à-vis des propriétés mécaniques et thermiques :

$$\varepsilon_f = \frac{V_f}{V} \dots \dots \dots (I-6)$$

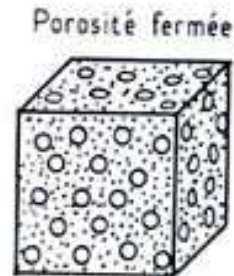


Figure I-33: Schéma de porosité fermée

Avec :

V_f : volume des pores fermés.

I.4.3. Transferts thermiques dans les matériaux poreux

Le transfert de chaleur est un phénomène d'échange d'énergie qui intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température. Si on considère une paroi mince constituée de matériau poreux d'épaisseur e et de température T_c et T_f sur les deux faces (figure I-34).

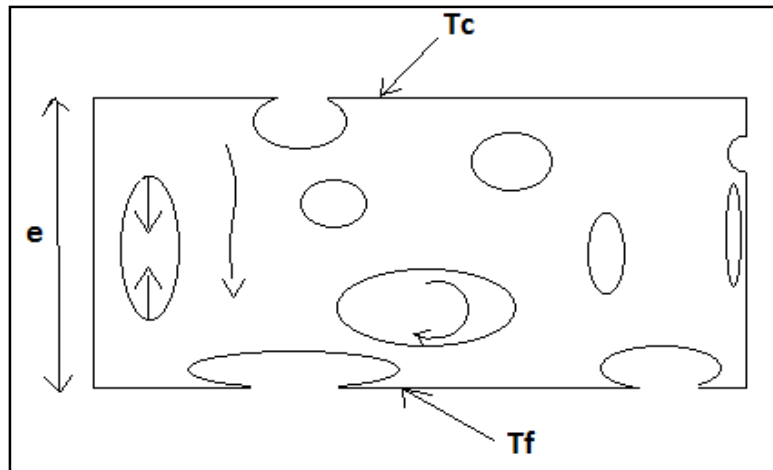


Figure I-34: Transfert de chaleur dans un matériau poreux

En régime permanent la densité de flux Q qui traverse le matériau est égale à:

$$Q = \frac{\lambda}{e} (T_c - T_f) \dots\dots\dots (I-7)$$

λ est une conductivité thermique globale ou apparente.

Différents mécanismes de transfert se superposent [43] :

- convection dans les pores.
- conduction thermique dans la matrice solide.
- conduction thermique dans le fluide contenu dans les pores.
- rayonnement entre les parois des pores.

I.4.3.1. Transfert de chaleur par convection

Ce mode d'échange thermique est propre aux fluides (gaz ou liquides). L'apparition d'un gradient de température au sein d'un matériau poreux entraîne l'existence d'un gradient de masse volumique du fluide contenu dans les pores. Un mouvement de l'air ou de tout autre gaz présent au sein des cavités peut intervenir ; il dépend du sens du gradient de température entre les parois par rapport aux forces de pesanteur. Ce mouvement est d'autant plus actif que :

- la différence de températures $T_c - T_f$ est forte.
- le diamètre des pores est grand.

Dans le cas des matériaux du bâtiment, $T_c - T_f$ est faible et le diamètre des pores est relativement faible: les phénomènes de convection dans les pores sont donc négligeables.

I.4.3.2. Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction concerne les systèmes solides et les fluides où la conduction de chaleur ne peut avoir lieu que lorsque deux points du même système sont à des températures différentes. Ce mode de transfert thermique résulte du mouvement dû à l'agitation moléculaire qui est liée à l'existence d'un gradient de températures.

I.4.3.3. Transfert de chaleur par rayonnement

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

I.4.4. Résistance thermique

La résistance thermique est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée [45].

$$R = \frac{e}{\lambda} \dots\dots\dots (I-8)$$

R = résistance thermique ($\text{m}^2\cdot\text{K} / \text{W}$)

e = épaisseur de l'isolant (m)

λ = conductivité thermique ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

I.4.5. La conductivité thermique : est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ , Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre [46]. Elle s'exprime en $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$. Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant [45].

Dans le bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligée. De même, au voisinage de la température ambiante, les parts de rayonnement et de transfert de masse ne seront également pas prises en compte. Par conséquent, le transfert thermique peut être considéré purement conductif et la connaissance de la conductivité thermique révèle une grande importance [43].

I.4.6. Effet de l'humidité sur la conductivité thermique des matériaux poreux

Un matériau de construction n'est absolument exempt d'eau que lorsqu'il se trouve dans une ambiance totalement sèche. Comme dans les conditions naturelles l'air présente une humidité relative plus ou moins élevée, tout matériau de construction poreux contient une plus ou moins grande quantité d'eau.

L'humidité a un effet significatif sur la conductivité thermique des matériaux poreux. Si les pores sont remplis, l'eau agit comme un pont et depuis la conductivité de l'eau est plusieurs fois supérieure à celle de l'air, la conductivité résultante est supérieure [47].

I.4.7. Transfert de chaleur dans le liège

Les caractéristiques d'isolation en liège sont dues au fait que les compartiments minuscules (cellules) sont remplis d'air. Les cellules du liège sont beaucoup plus petites que les cellules des autres matériaux communs, qui contribuent à justifier ses exceptionnelles propriétés isolantes. Le transfert de chaleur par conductivité ne dépend que de la quantité de matière solide dans la structure cellulaire, qui est moins pour le liège expansé d'isolation thermique (et donc, l'utilisation du liège aggloméré élargi pour ces fins). Convection dépend de la taille des cellules, et pour les plus petites cellules (comme c'est le cas de liège) elle ne contribue pas de manière significative. Radiation dépend aussi de la taille des cellules: plus la taille (comme c'est le cas du liège), le plus grand nombre de fois la chaleur doit être absorbée et re-irradiés [39].

I.4.8. Les techniques de mesure de la conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique des matériaux peut se faire par plusieurs méthodes et différents instruments.

Les techniques de mesures peuvent être classées :

I.4.8. 1.Selon le mode de chauffage

Selon le mode du chauffage de l'échantillon étudié on distingue :

- i)- **Les méthodes électrothermiques** : Le chauffage du matériau est obtenu à l'aide d'une résistance électrique.
- ii)- **Les méthodes photothermiques** : Le matériau est chauffé par l'absorption des photons ou, plus rarement, par des électrons

I.4.8. 2. Selon le régime de chauffage

Selon le régime du chauffage employé, on distingue 3 grands groupes (Degiovanni [48])

- Les méthodes en régime permanent.
- Les méthodes en régime quasi établi.
- Les méthodes en régime variable

a) Les méthodes en régime permanent [49]:

Cette première classe de techniques se caractérise par la mesure simultanée d'un flux de chaleur (constant) traversant l'échantillon et par celle d'une différence de température (fixe) des deux milieux extérieurs. Le modèle et la méthode d'identification sont basés sur un transfert thermique unidirectionnel et stationnaire :

Ainsi si on considère l'échantillon, d'épaisseur e on peut dans le cas idéal (absence de source interne) déduire la conductivité du matériau ou sa résistance thermique en utilisant les formules suivante:

$$R_T = \frac{T_1 - T_2}{\phi}, R_T = \frac{e}{\lambda S}, \lambda = \frac{S \phi}{e (T_1 - T_2)}$$

Avec : R_T Résistance thermique du matériau

$T_1 - T_2$ Température

ϕ Flux thermique

e Epaisseur du matériau

λ Conductivité thermique du matériau

S Surface traversée par le flux

❖ Méthodes

- ✓ La méthode de la plaque chaude gardée
- ✓ La méthode du flux radial

b) Les méthodes en régime quasi établi

Cette deuxième classe de technique se caractérise par la mesure simultanée d'un flux de chaleur de puissance constante P_0 traversant l'échantillon et d'une température variable avec le temps. La quasi-totalité des modèles font l'hypothèse d'un transfert unidirectionnel (dimensions du milieu supposé grand par rapport à celui de la sonde) et prennent en compte l'élément chauffant, le milieu (de géométrie plane, cylindrique ou sphérique) et l'interface sonde-milieu. La méthode d'identification qui permet d'atteindre un ou plusieurs paramètres s'effectue aux temps longs, ce qui justifie l'appellation de régime quasi établi. La mesure de

la variation de la température se fait soit par un couple thermocinétique (méthode du croisillon) soit par la mesure directe de la résistance électrique de l'élément chauffant).

❖ Méthodes

- ✓ La méthode du fil chaud
- ✓ La méthode des sondes

c) Les méthodes en régime variable

Le principe général des méthodes en régime variable consiste à déduire directement la diffusivité de la chaleur dans un matériau soumis à une perturbation thermique contrôlée. La détection s'effectue soit par la mesure de:

- l'émission radiative d'équilibre statique du matériau avec un radiomètre.
- la modification que celle ci provoque sur le gaz qui environne l'échantillon.
- la température de surface de l'échantillon.

Ces divers phénomènes peuvent être détectés en face avant ou arrière à l'aide de radiomètre infrarouge ou thermocouple et ceci pour des modes d'excitation variés (excitation périodique, impulsionnelle ou aléatoire)

❖ Méthodes

- ✓ La méthode par effet mirage
- ✓ La photoréflexion
- ✓ La radiométrie infrarouge
- ✓ La méthode flash

I.4.9. Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud

I.4.9.1. Principe de la méthode

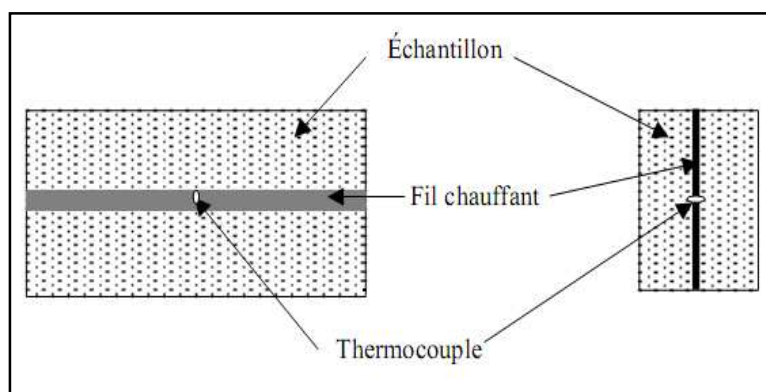


Figure I-35 : Schéma de principe de la mesure de conductivité thermique par la méthode du fil chaud.

Un flux de chaleur constant ($\phi = 0$ si $t < t_0$; $\phi = \phi_0$ si $t > t_0$) est appliqué au fil chauffant. Un thermocouple nous permet de relever l'évolution au cours du temps de la température $T_0(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces c'est-à-dire lorsque l'hypothèse du milieu infini est valide, on peut supposer que le transfert dans l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. Une méthode d'estimation judicieusement choisie de façon à minimiser l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales nous permet d'évaluer la conductivité thermique λ , la capacitance thermique $(mc)_s$ de l'ensemble sonde + résistance chauffante et la résistance de contact R_c à l'interface sonde /échantillon [50,51].

I.4.9.2. Modélisation du fil chaud

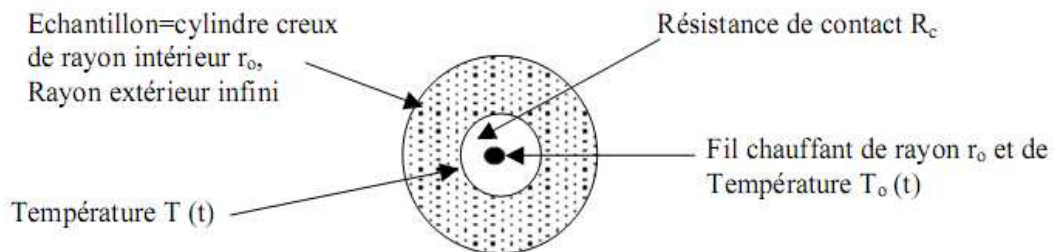


Figure I-36: Une vue en coupe du fil chaud et de l'échantillon.

La modélisation du système à conduire finalement à :

$$T_0(t) - T_0(0) \approx \frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left[R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right]$$

Où :

R_c Résistance de contact à l'interface résistance chauffante/échantillon

a Diffusivité thermique de l'échantillon

r_0 Rayon du fil chauffant

L Longueur du fil chauffant

φ_0 Puissance dissipée dans la résistance chauffante

Le tracé de $T_o(t) - T_o(t = 0)$ en fonction de $\ln(t)$ est une droite de pente $\frac{\phi_0}{4\pi\lambda L}$

Ce qui nous permet de déduire la conductivité thermique λ .

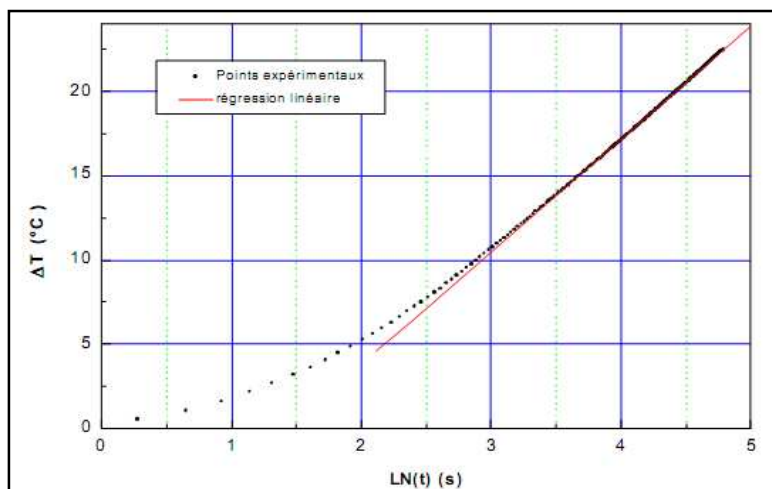


Figure I-37: Calcul de la pente du thermogramme [52].

I.4.10. Consommation finale d'énergie du secteur de l'industriel et du BTP en Algérie

Le bilan énergétique national, montre l'exploitation croissante des énergies fossiles. L'analyse de la consommation du secteur industriel et du BTP, fait ressortir la dominance de deux vecteurs énergétiques, l'électricité avec 38,6 % et le gaz naturel avec 33,4 % de la part totale. (Figure I-38)[53].

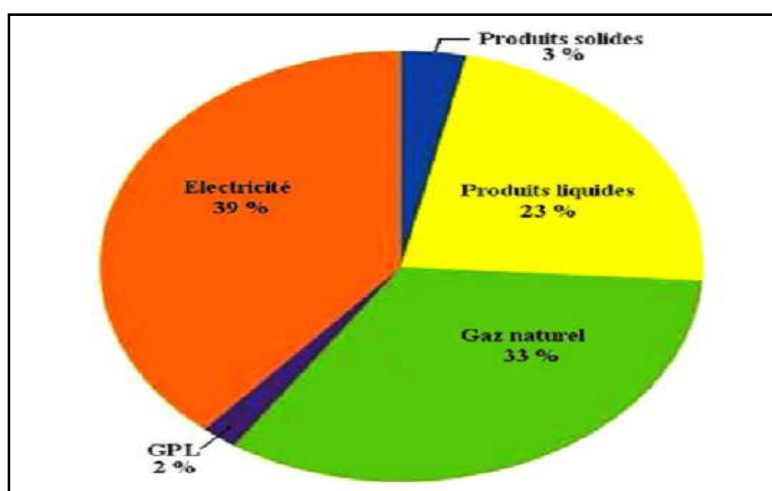


Figure I-38: Consommation du secteur industriel et du BTP pour l'année 2009 [53].

I.4.11. Apport du liège pour la limitation des pertes thermiques

La tapisserie en liège a un apport très important dans le bilan énergétique pour les bâtiments réalisés en béton [37].

Pour une facilité de construction, beaucoup d'immeubles ne sont pratiquement pas isolés. La figure suivante présente un schéma simplifié du mur.

Crépie 2 cm	Béton 30 cm	Plâtre 2 cm	liège
----------------	----------------	----------------	-------

Figure I-39: Schéma simplifié du mur

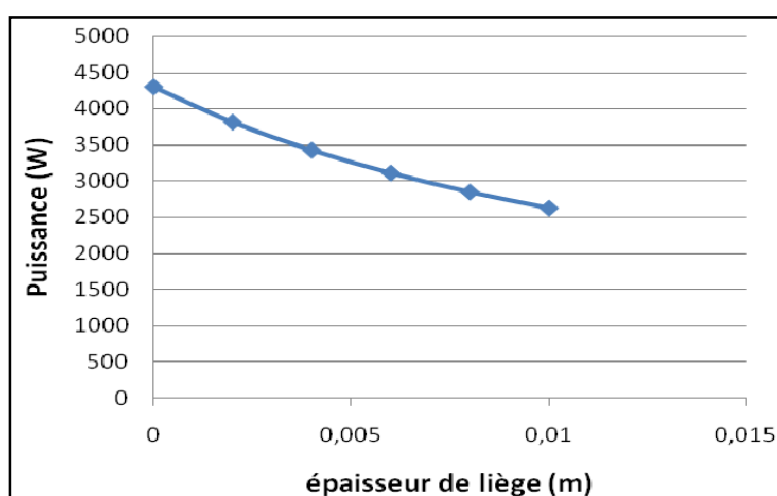


Figure I-40: Puissance thermique perdue par les murs d'un bâtiment en béton [37].

Les bâtiments en béton sont ceux qui ont les plus grandes déperditions thermiques. 1 cm de liège au mur permet de réduire de 39% la puissance thermique perdue. Les gains sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau I-7 : Gain en puissance thermique

épaisseur de liège	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01
Gain en puissance thermique	0,00%	11,31%	20,32%	27,67%	33,77%	38,93%

La consommation d'énergie annuelle due aux murs suit la même tendance :

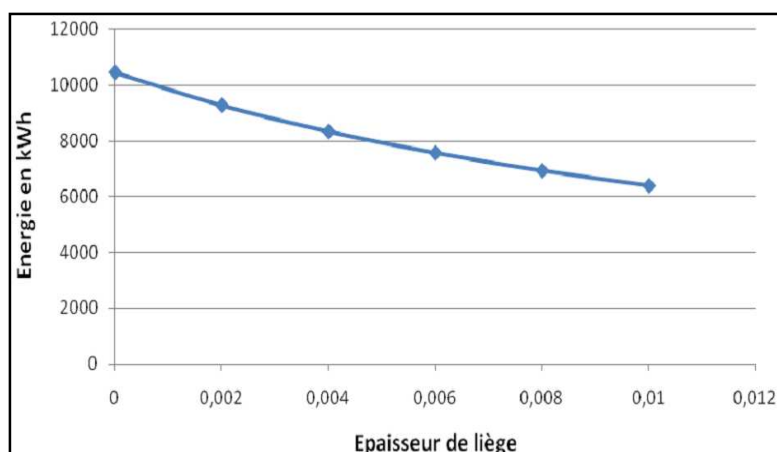


Figure I-41: Consommation d'énergie annuelle due aux murs [37].

La consommation d'énergie peut être très importante pour ce type de bâtiment (de l'ordre de 10000 kWh). Comme précédemment, nous allons voir les économies réalisées par la tapisserie-liège :

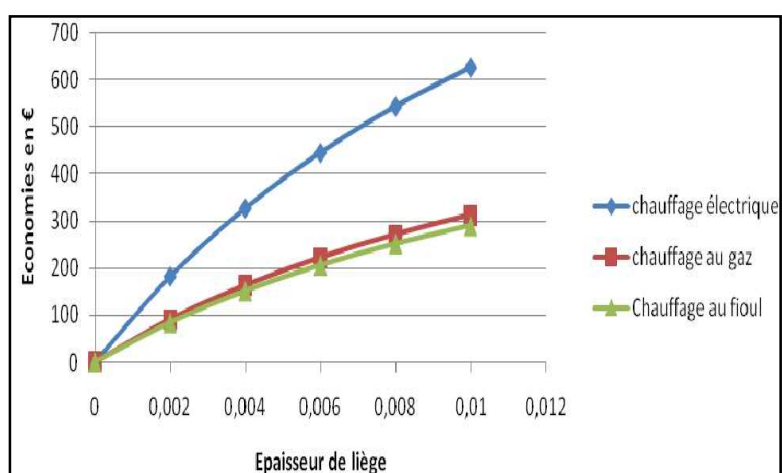


Figure I-42: Economies réalisées par an [37].

En fonction du type de chauffage et de l'épaisseur de tapisserie liège posée, les économies réalisées peuvent atteindre plus de 600 € par an.

Il est noter également que 2 cm de liège isolent du froid aussi bien que 7 cm de pin ou 43 cm de briques [54.55].

I.4.12.Caractéristiques environnementales et sanitaires

En plus de confort thermique qu'ils apportent, les isolants naturels d'origine animale ou végétale ont un faible impact sur l'environnement et la santé des occupants. En effet, leur

fabrication nécessite peu d'énergie et ils n'émettent aucun gaz toxique lors de leur combustion.

Le liège est un produit renouvelable de longue durée, qui contribue à la promotion de la fixation de CO₂. Par ailleurs, un chêne-liège qui est récolté périodiquement, va produire de liège en plus [39].

L'Aggloméré Expansé Pur (A.E.P.) est un matériau constitué par des granulés expansés en autoclaves par l'effet de la température et de la pression, sans adjonction de liants extérieurs, car le collage est assuré par la subérine. Résultant un produit qui est 100% naturel et écologique, un avantage très difficile à égaler par les matériaux concurrents [39].

Le Code Européen de Déchets Version 2 (CED2) a considéré que les déchets d'écorce et de liège sont des matériaux sains et peuvent être utilisés dans le domaine de construction.

I-5 Synthèse bibliographique

Les bétons légers peuvent répondre à pratiquement toutes les applications qui revenaient aux bétons normaux. Ils permettent d'une part d'améliorer les conditions d'exécution des travaux (dimensions sociale et organisationnelle), d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage et, d'autre part de réduire considérablement le coût global de l'ouvrage et sa consommation en énergies fossiles.

Le sable concassé est très abondant dans les carrières de gravier calcaire et son utilisation pourrait réduire considérablement les coûts des matériaux de béton.

Les études antérieures effectuées sur les bétons ordinaires confectionnés avec le sable calcaire ont montré que la présence des fines calcaires en faible quantité améliore les caractéristiques du béton (ouvrabilité, résistances), l'excès de fines influe négativement sur les caractéristiques du béton.

Les travaux antérieurs sur l'utilisation des granulats de liège dans la fabrication des matériaux composites légers permettent de valoriser certains sous produits de l'industrie de liège. Ces composites de liège offrent des caractéristiques mécaniques acceptables, des qualités thermiques élevées. En effet, le liège est un matériau durable et écologique. Il possède des caractéristiques importantes : une faible densité, et une bonne isolation thermique.

Ces matériaux composites peuvent apporter simultanément une bonne isolation thermique et un faible poids à la structure.

Le béton de liège présente des avantages techniques et économiques qui laissent prévoir un développement important pour le futur.

Chapitre II

Méthodes expérimentales

II. Méthodes expérimentales

Ce chapitre est consacré aux méthodes de caractérisation des matières premières, et description des essais de caractérisation physico-mécaniques des matériaux élaborés.

II.1. Caractérisation des matières premières

II.1.1. Le sable

➤ Masse volumique

• Masse volumique absolue

C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau (vides non compris) selon la norme NFP18-555 [10,56], elle est déterminée :

- Par la méthode de l'éprouvette graduée

$$\rho_s = \frac{M}{V_s} \dots\dots\dots (II.1)$$

M : masse de l'échantillon

V_s : volume de grains V_s = (V₂ - V₁).

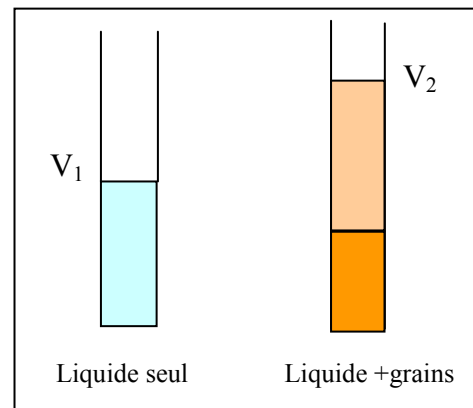


Figure II-1 : Schémas de l'éprouvette graduée

- Par la méthode de pycnomètre.

La masse volumique des grains solides est déterminée en effectuant trois pesées M₁, M₂, M₃ de sorte que :

$$M_3 = M_1 + M_2 - \frac{M_2}{\rho_w} \times \rho_s \dots\dots\dots (II.2) .$$

D'où l'on tire ρ_s .

M₁ : la masse du pycnomètre remplie d'eau.

M₂ : la masse de l'échantillon de matériau sec.

M₃ : la masse totale du pycnomètre avec échantillon.

ρ_s : la masse volumique des grains solides.

ρ_w : la masse volumique de l'eau (=1g/cm³).

Cette méthode est plus précise que la première.

• Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides), elle est notée ρ_a et donnée par :

$$\rho_a = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(\text{II.3}).$$

Où M : masse du matériau et V : volume total de l'échantillon.

Il s'agit de remplir un volume de 1 dm³ et on détermine la masse totale M_T, la masse de l'échantillon sera : M=M_T-M_R. (M_R est la masse du récipient).

➤ Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables effectués dans la composition du béton. C'est un essai qui réalise selon NFP 18-560 [56] et qui consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

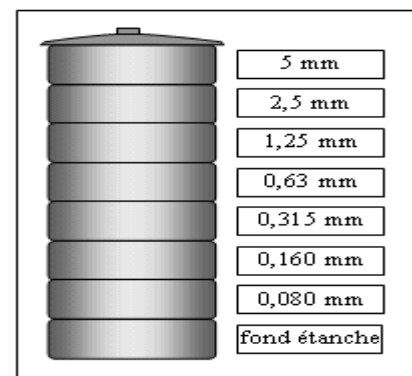


Figure II-2 : Série de tamis

▪ La finesse du sable

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF) [56].

Elle est définie comme étant la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis de la série 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 3.5 et 5mm. A noter que plus le module de finesse est élevé plus le sable est grossier.

$$M_f = \frac{[\sum \text{des refus cumulés (en\%)} \text{des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5]}{100} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

➤ L'équivalent de sable

L'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton. Cet essai est réalisé selon la norme NFP 18-598 [56], une solution lavante sépare les éléments fins de la fraction 0/3 en provoquant leur fluctuation dans une éprouvette normalisée.

Après 20 mn de repos on mesure :

H_1 : hauteur du niveau supérieur par rapport au fond de l'éprouvette

H_2 : hauteur du niveau de la partie sédimentée

L'équivalent de sable est donné par la relation :

$$E_s = \frac{H_2}{H_1} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

➤ Essai d'absorption :

Il permet de déterminer le taux d'absorption des grains caractérisé par le coefficient d'absorption (Abs). Il correspond au rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 h à 20°C à la masse de l'échantillon sec. Cet essai est régi par la Norme **NFP 18.555 [56]**.

$$\text{Abs} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad \dots\dots\dots(\text{II.6}).$$

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C .

M_h : masse de l'échantillon imbibé (surface essuyée).

II.1.2 Les granulats de liège

➤ La masse volumique

La masse volumique des granulats étant la caractéristique la plus importante dans la détermination de la classe du béton. Elle affecte les performances physico-mécaniques des bétons. Cette caractéristique doit être définie avec précision.

- **La masse volumique apparente**

Cette masse est déterminée avec la même procédure expliquée plus haut.

- **La masse volumique absolue**

En raison de présence des pores fermés dans la structure de liège. On a broyé les granulats jusqu'à obtenir une poudre fine. Puis on a suivi les procédures de la méthode de pycnomètre décrite plus haut.

➤ Détermination de l'humidité des granulats de liège

Afin d'obtenir le taux de l'humidité des granulats de déchets de liège, nous avons effectué l'essai conformément à la norme NF B 57-013 [56]. Trois échantillons pris au hasard de 100 g chacun, On pèse le récipient vide, ensuite on introduit la prise d'essai dans ce récipient, puis

on pèse l'ensemble. Le récipient et son contenu sont placés dans une étuve à une température de 103°C. Le séchage de l'échantillon est poursuivi jusqu'à ce que les résultats de deux pesées successives, effectués à deux heures d'intervalles ne dépasse pas au plus 0.5 % de la masse initiale de la prise d'essai. Après séchage, on place le récipient et son contenu dans un dessiccateur pendant 30 min, puis on pèse l'ensemble. La moyenne arithmétique des résultats obtenus sur les trois prises d'essai est prise comme résultat final de cette expérimentation.

Les résultats des trois prises d'essais sont calculés par la formule :

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}$$

D'où :

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

II.1.3. Le ciment

II.1.3.1. Masse volumique absolue : NF P18-555 [56]

Elle est mesurée par la méthode de déplacement de liquide (benzène), en utilisant le densimètre LeChatelier.

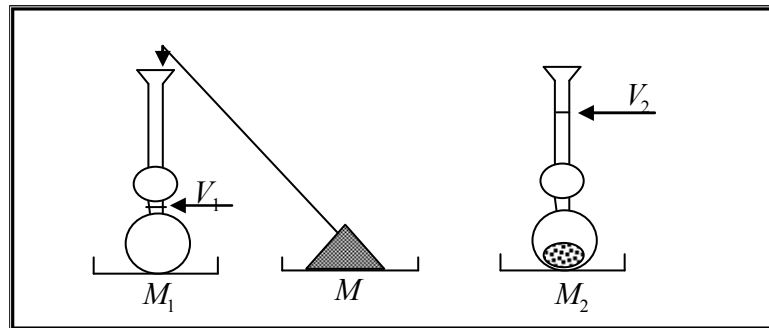


Figure II-3 : Dispositif expérimental de l'appareil LeChatelier

La masse volumique absolue est déterminée par la relation :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (II.7).$$

Où M_1 : Masse de (cellule + benzène),

M_2 : Masse de (cellule + benzène + ciment),

V_1 : Le volume du benzène initial,

V_2 : Le volume du benzène final (après introduction du ciment)

II.1.3.2. Finesse du ciment

Cette caractéristique est exprimée par la surface spécifique, celle-ci est mesurée à l'aide du perméabilimètre Blaine, selon la norme **EN 196-6 [57]**.

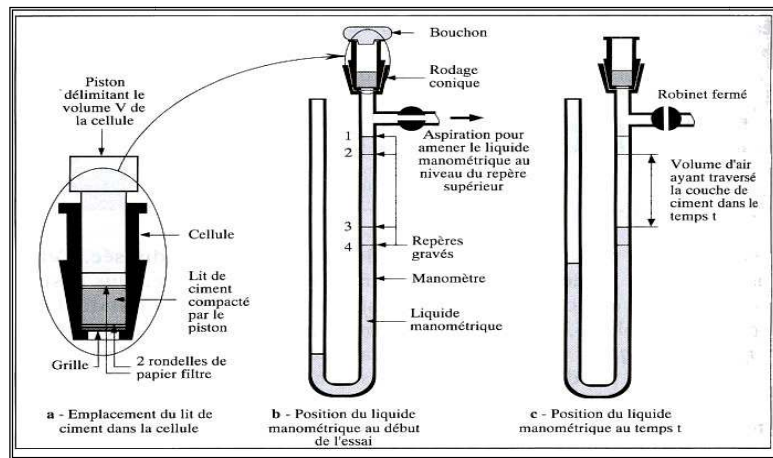


Figure II-4 : Dispositif expérimental du perméabilimètre *Blaine*

Le principe de l'essai est de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment et de mesurer le temps de passage de l'air, plus la surface spécifique d'un ciment est grande plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface spécifique notée S_p (cm^2/g) est déterminée par la relation suivante :

$$S_p = \frac{k \sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho_c (1 - e) \sqrt{\eta}} \dots\dots\dots (II-8)$$

k : étant la constante de l'appareil. ($k=43$)

e : l'indice de vide de la couche tassée.

t : temps mesuré par seconde.

ρ_c : masse volumique absolue du ciment (g/cm^3).

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai (poises).

II.1.3.3. Essai de consistance normale

L'essai de consistance normale permet de déterminer le pourcentage d'eau nécessaire pour fabriquer une pâte dite de consistance normale. Cet essai est réalisé selon la norme **EN 196-3 [58]**. Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une sonde normalisée libre sous son propre poids dans une pâte préalablement préparée et contenue dans le moule tronconique de l'appareil de Vicat. La pâte est dite normale lorsque la différence entre la hauteur du moule et l'enfoncement de l'aiguille est égale à 6 ± 1 mm.

Le malaxage est réalisé par un petit malaxeur où l'on doit suivre le procédé décrit par la norme.

II.1.3.4. Essai de prise

Cet essai est prescrit par la norme **EN 196-3[58]**, il constitue une indication indispensable pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons. La prise d'un ciment est fonction de sa nature (à prise lente ou rapide), de sa finesse et de la température. A une température de 20 °C le début de prise des ciments est à environ 2h à 2h30 et la fin de prise est aux environs de 3h45 à 6h **[10]**. Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat, l'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans une pâte de consistance normale, le début de prise est définie comme étant le temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance $d \geq 2.5$ cm du fond du moule. La fin de prise correspond au temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte de ciment.

II.2. Caractérisation du béton frais

II.2.1. Masse volumique à l'état frais [59]

La masse volumique est déterminée selon la formule:

$$\rho = (m_2 - m_1) / V \dots\dots\dots (II.9).$$

Où :

ρ est la masse volumique du béton frais, en kg/m^3

m_1 est la masse du récipient, en kg

m_2 est la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en kg

V est le volume du récipient, en m^3

II.2.2. Essai de consistance

Le but des essais de consistance est de quantifier la maniabilité et l'ouvrabilité, qui sont des qualités qui définissent la facilité de mise en œuvre du béton dans le coffrage, cette maniabilité classe les bétons suivant une échelle de fluidité croissante : ferme - plastique – très plastique – fluide.

➤ Essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test)

C'est l'essai le plus communément utilisé, en raison de sa simplicité de mise en œuvre, il s'agit de mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus l'affaissement est grand, plus le béton est réputé fluide. (Norme **NFP18.451**) **[56]**.

Le béton est introduit dans un moule conique normalisé légèrement huilé, en trois couches d'égale hauteur, compactées par une tige de piquage actionnée 25 fois par couche,

après avoir araser le bord supérieur, on enlève verticalement le moule, le béton s'affaissera. On mesure la hauteur d'affaissement qui est fonction de la consistance du béton.

La norme EN 206 [1] définit 4 classes de consistance, en fonction de l'affaissement mesuré. Elles sont indiquées sur la figure II-5. Les classes sont notées S1, S2, S3, S4, et appelée classes d'affaissement. S rappelle ici l'initiale du nom de l'essai en anglais: slump test.

La norme NF P 18 – 305 [56] définit les mêmes classes d'affaissement, mais les note F, P, TP et Fl (Ferme, Plastique, Très Plastique et Fluide).

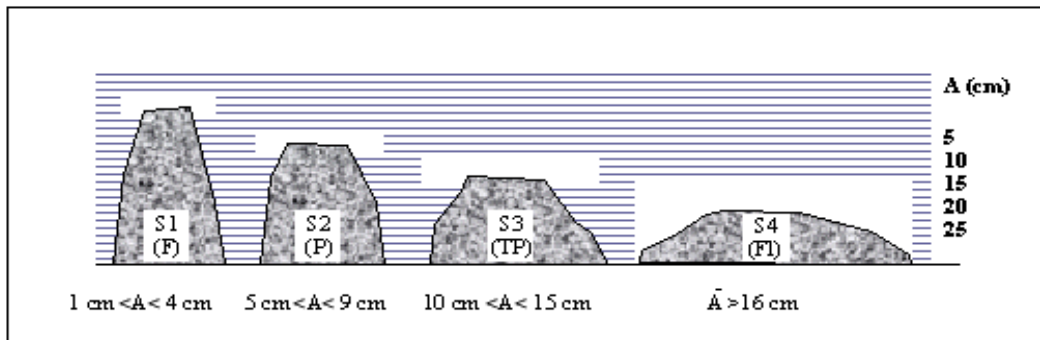


Figure II-5 : Classes de consistance mesurées au cône d'Abrams

II.3. Caractérisation du béton durci

II.3.1 Masse volumique apparente des bétons

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient NF EN 12390-7 [56] :

$$\rho = M/V \dots \dots \dots (II.10).$$

ρ est la masse volumique, en kilogrammes par mètre cube

M est la masse de l'échantillon, en kilogrammes

V est le volume de l'échantillon, en mètres cubes.

II.3.2 Résistance à la traction par flexion

Les éprouvettes $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ sont soumis à un essai de flexion trois (3) points selon les normes NF EN 12390-5 [56] (voir Figure II-6).

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 :

$$R_t = \frac{1.5 F_t L}{b^3} \dots \dots \dots (II.11)$$

En remplaçant L et b par leurs valeurs on obtient :

$$R_t = 0.234 F_t \dots \dots \dots (II.12)$$

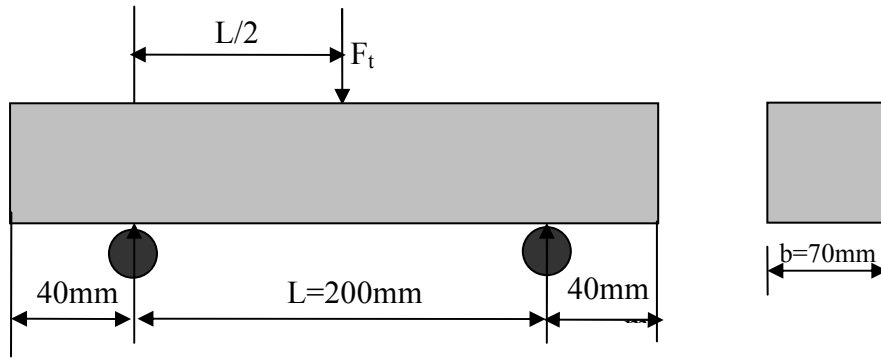


Figure II-6 : Schémas de l'essai de flexion

II.3.3 Résistance à la compression

Les deux parties de les éprouvettes sont écrasées par l'essai de traction sont soumises l'une après l'autre à l'essai de compression conformément à la norme NF EN 12390-3 [56]. (Figure II.7), La valeur de la résistance à la compression est donnée par :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ en (MPa) } \dots\dots\dots(\text{II-13}).$$

F_c : force de compression en (N).

A : surface transversale de l'éprouvette en mm^2 (4900 mm^2).

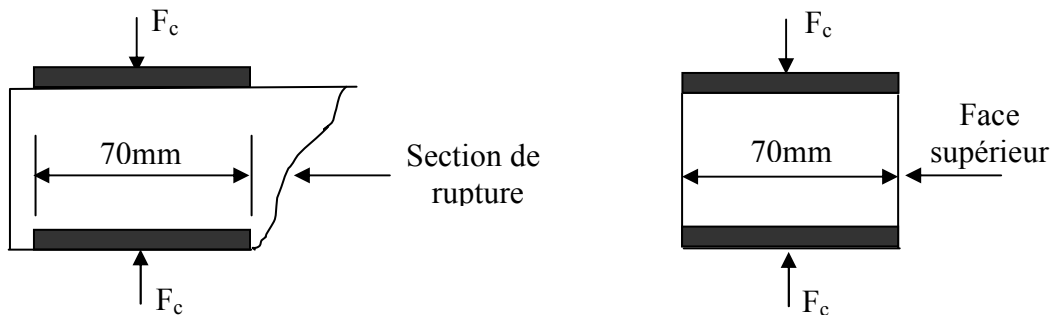


Figure II-7 : Schémas de l'essai de compression

II.3.4 Variation dimensionnelles

Il s'agit de mesurer le retrait (NF P 15-433) [56] et le gonflement sur des éprouvettes $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ à l'aide de l'appareil de retrait (voir figure II.8).

Après démoulage, l'éprouvette est placée verticalement sur l'appareil de retrait comme indiqué sur la figure II.10, les valeurs du retrait ou du gonflement sont lues sur le comparateur placé sur l'éprouvette, on lit au premier jour la valeur l_0 correspondante à la valeur de référence, la mesure suivante effectuée au temps t étant $l(t)$. Le retrait ou le gonflement enregistré au temps t est :

$$\Delta l(t) = l(t) - l_0 \dots\dots\dots(\text{II.14}).$$

Le retrait ou le gonflement relatif est donc :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0} = \frac{l(t) - l_0}{l_0} \dots\dots\dots (II.15).$$

Si $\varepsilon > 0$ c'est un gonflement.

Si $\varepsilon < 0$ c'est un retrait.

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement.



Figure II-8: Appareillage pour la mesure du retrait

II.3.5. Essai d'absorption d'eau

II.3.5.1. Essai de l'absorption capillaire

Les essais d'absorptivité [10,56] déterminent le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette de béton posée sur de petits supports de telle manière que seuls les 2 à 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

Il existe une relation de la forme :

$$i = S t^{0.5} \dots\dots\dots (II.16).$$

Où :

i : l'augmentation de la masse en g/mm^2

t : temps écoulé (en minute) au moment où la masse mesurée.

S : absorptivité en $mm/min^{0.5}$.

la base de l'éprouvette prismatique $(7 \times 7) \text{ cm}^2$ mis en contact avec une nappe d'eau. On suit l'évolution de la masse de cette éprouvette au cours du temps. La nappe d'eau est maintenue à

niveau constant par un trop-plein. Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des échantillons. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un papier absorbant. Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 45 \pm 10 \%$).

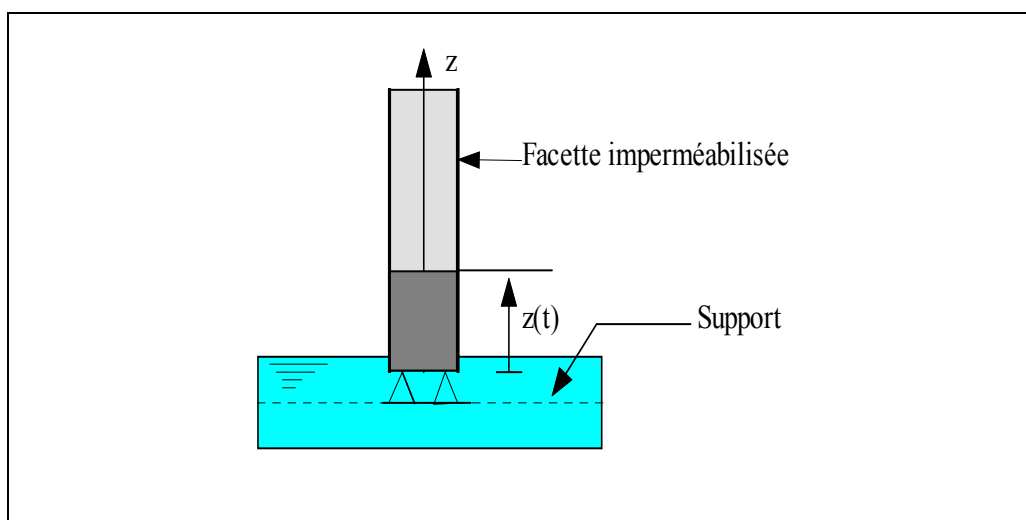


Figure II-9: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

II.3.5.2. Essai d'absorption par immersion

L'absorption par immersion consiste à déterminer le poids final après saturation et cela pour calculer le volume des vides (porosité) du béton durci. Le principe de l'essai consiste à mettre les éprouvettes dans l'étuve jusqu'à la stabilisation du poids, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 heures, c'est-à-dire, jusqu'à saturation du matériau afin de calculer le volume des vides du béton.

$$\gamma_w (\text{porosité}) = \frac{M_a - M_s}{V_t} \times 100 \dots\dots\dots (\text{II.17}).$$

Où : M_s : masse de l'éprouvette sèche (en gramme).

M_a : masse de l'éprouvette après saturation (en gramme).

V_t : volume total de l'éprouvette.

II.3.6. Caractéristiques thermiques

Pour la mesure de la conductivité thermique des matériaux composites réalisés, nous avons utilisé un multimètre appartenant au laboratoire de l'université de Laghouat. (Figure II-10), qui est un appareil de mesure rapide, des caractéristiques thermiques, des matériaux

homogènes et isotropes. Les mesures ont été faites sur des échantillons de surfaces planes en formes prismatique ($4 \times 4 \times 10$) cm^3 .

On place un fil chauffant entre les surfaces des deux échantillons du matériau à caractériser. On applique un échelon de flux de chaleur constant au fil chauffant et on relève l'évolution de la température de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer La conductivité thermique λ .



Figure II-10 : Le Multimètre

II.4. Matières premières

Les principaux composants des bétons élaborés sont : le sable, ciment, granulats, l'eau

II.4.1. Le sable

Le sable utilisé est un sable calcaire de granulométrie 0/3 provenant des déchets de concassage des roches massives, la source de ce sable est la carrière de Laghouat (Djebel Dakhla).

II.4.2. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CEM II/A 42.5 R provenant de la cimenterie de Hammam Eddalaa , M'sila.

II.4.3. Les granulats

Les granulats légers utilisés pour l'élaboration des bétons légers sont les granulats de liège expansé provenant des déchets de fabrication de liège aggloméré noir expansé pur et bandes d'étanchéité (Jijel liège étanchéité).

Pour étudier l'influence de la grosseur des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons, deux classes granulaires sont employées dans l'élaboration des bétons légers aux granulats de liège expansé, granulats 3/8 et 8/15.

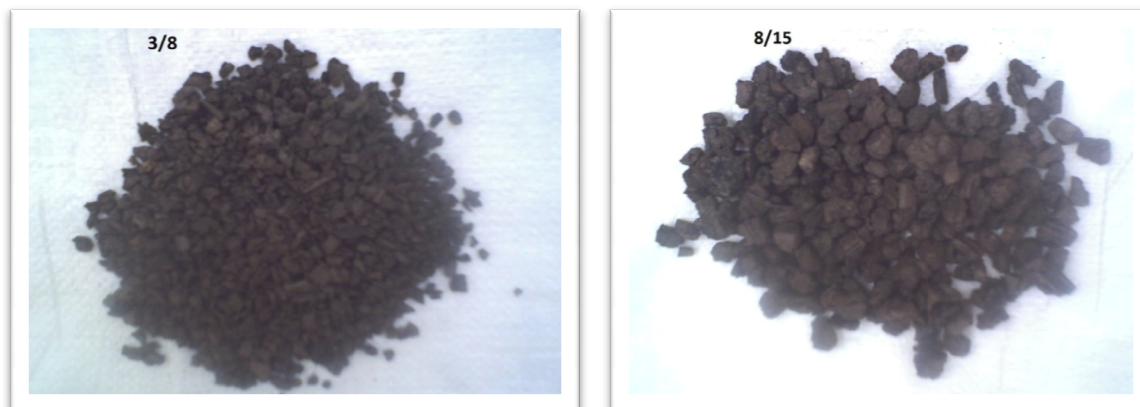


Figure II-11 : Echantillon de granulats de liège expansé 3/8 et 8/15

II.4.4. L'eau de gâchage

L'eau utilisée est une eau potable du robinet. Elle convient pour la confection du béton à condition qu'elle remplit toutes les prescriptions des normes NF P 18-303[56] et EN 1008 [60] concernant les concentrations des matières en suspension et les sels dissous. Une eau de mauvaise qualité peut avoir des effets néfastes sur le béton tels que la corrosion des armatures, la diminution de la résistance mécanique, l'accélération ou le ralentissement du temps de prise et l'apparition des taches nuisibles sur la surface du béton.

II.5. Variables étudiées

Plusieurs paramètres ont été variés pour déterminer les propriétés mécaniques, physiques et thermiques des matériaux composites. L'organigramme représenté sur la figure II-12 montre les différents essais effectués dans notre étude expérimentale.

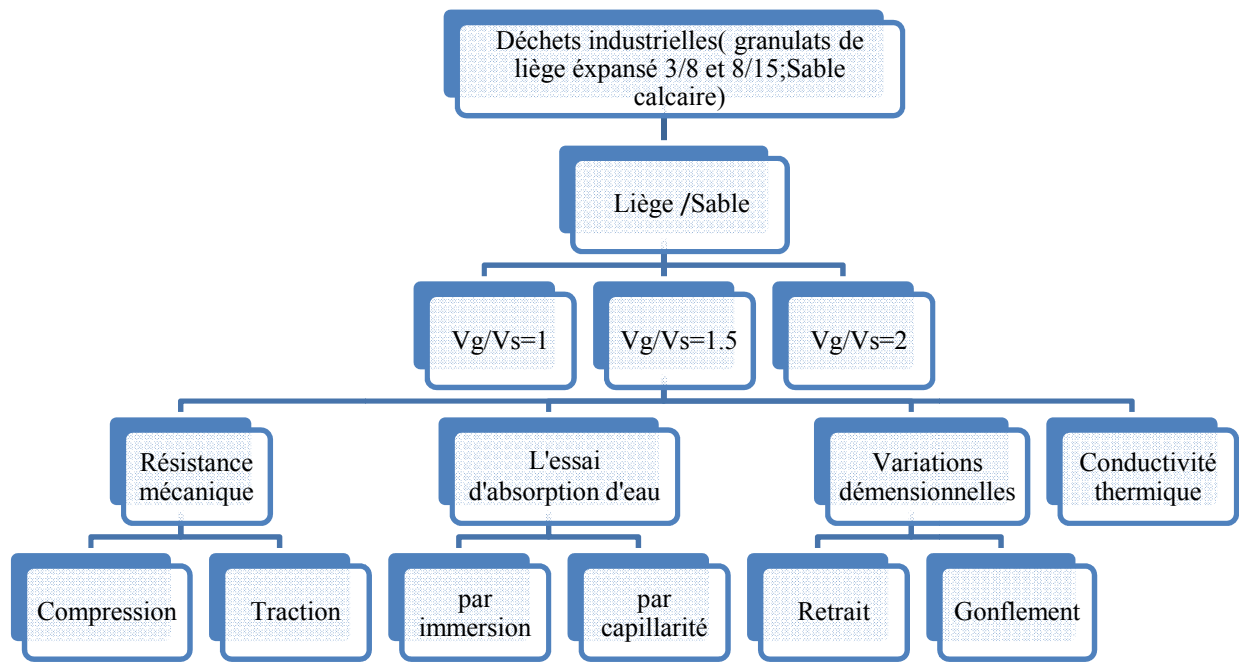


Figure II-12 : Organigramme représentatif des différents essais effectués.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a cité les différentes matières premières utilisées (ciment, sable, granulats, eau) et les essais de caractérisations de ces matériaux, ainsi que les expériences réalisés sur les bétons élaborés dans notre travail :

- Essais sur le béton frais (la masse volumique, essai d'affaissement au cône d'Abrams)
- Essais sur le béton durci (la masse volumique apparente, résistance à la compression, résistance à la traction, variations dimensionnelles, absorption d'eau, mesure de la conductivité thermique)

Chapitre III

*Caractérisation des matériaux,
résultats expérimentaux
et interprétations*

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

III.1. Caractérisation des matières premières

L'identification des matériaux entrant dans la composition des bétons est indispensable. La connaissance des caractéristiques physico-chimiques de chaque composant à part, par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire, nous permet de faire l'interprétation des résultats obtenus par les essais sur le mélange de ces matériaux.

III.1.1. Le sable calcaire

➤ Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire sont regroupés dans le tableau III-1 et sa courbe granulométrique est représentée sur la figure III-1.

La courbe granulométrique du sable calcaire est étalée, et elle est bien graduée et sa continuité bien répartie. Le pourcentage de fines du sable utilisé est 12,18 %.

Tableau III-1 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire

Masse du sable 1000 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	1,6	1,6	0,16	99,84
3,15	22,2	23,8	2,38	97,62
2,5	69,1	92,9	9,29	90,71
1,25	311,1	404	40,4	59,6
0,63	215,4	619,4	61,94	38,06
0,315	103,7	723,1	72,31	27,69
0,16	101,7	824,8	82,48	17,52
0,08	47,6	872,4	87,24	12,76
Fond	121,8	994,2	99,42	0,58

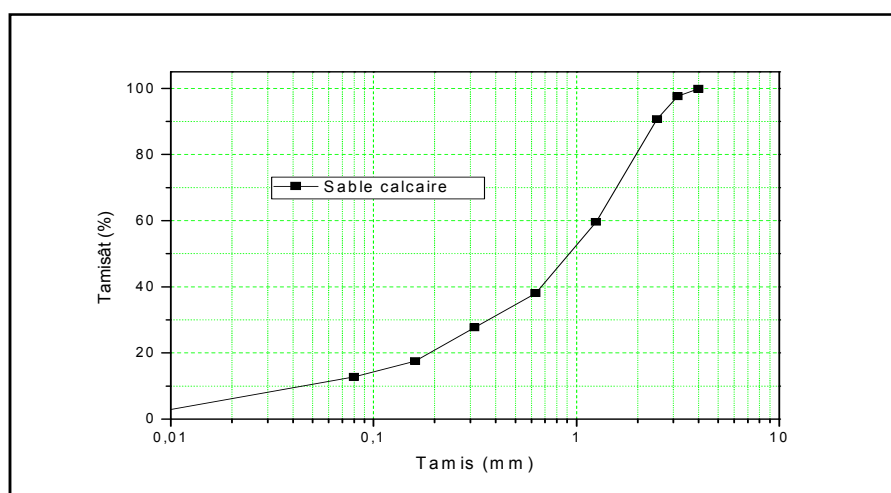


Figure III-1 : Courbe granulométrique du sable calcaire.

➤ **Module de finesse**

Le module de finesse égale à :

$$(0 + 9.29 + 40.4 + 61.94 + 72.31 + 82.48) / 100 = 2.66 \dots\dots (III-1).$$

Le sable utilisé est donc de bonne qualité pour le béton

➤ **Masse volumique apparente ρ_{app} et absolue ρ_{abs} :**

Les masses volumiques apparente et absolue moyennes du sable sont :

$$\rho_{app} = 1530 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{abs} = 2670 \text{ kg/m}^3$$

➤ **Compacité et porosité:**

La compacité (C_p) est le rapport du volume de la matière pleine au volume total.

L'essai est réalisé selon la norme NFP18-555[56]:

$$C_p = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - n \dots\dots\dots(III-2).$$

$$C_p = \frac{V_s}{V} = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \dots\dots\dots(III-3).$$

Où V_v est le volume des vides et V , le volume total apparent. n , étant la porosité.

Les résultats de mesure donne : $C_p = \frac{1.53}{2.67} = 0.57$ soit $n = 1 - C_p = 0.43\dots(III-4).$
 tyy

➤ **Coefficient d'absorption d'eau :**

Le coefficient d'absorption d'eau du sable calcaire est : Abs (%) = 7.78 %

➤ **Equivalent de sable:**

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III-2: Equivalent du sable

	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	H ₂ *(cm)	Es visuel %	Es piston %
Essai N °1	10.5	8	7.4	76	71
Essai N °2	12.7	9.4	8.9	74	70
MOYENNE				75	70.5

Ces résultats montrent que le sable utilisé est un sable propre.

III.1.2. Le ciment

Le type de ciment utilisé dans notre travail est CEM II/A 42.5 R, et ses caractéristiques chimiques et physico-mécaniques sont présentées ci-dessous.

III.1.2.1. Composition chimiques et minéralogiques du ciment [62]

Tableau III-3 : Analyse chimique du ciment

Composition Chimique	MgO	SO ₃	Cl ⁻	RI	P.F
Teneur %	1-1.3	2.1-2.5	0.01-0.03	0.7-1.5	8-10

Tableau III-4 : Analyse minéralogique du ciment

Phase	Constituants du Clinker	Teneur (%)
Clinker	C ₃ S	55-62
	C ₂ S	13-22
	C ₃ A	6.5-8.2
	C ₄ AF	10-13

III.1.2.2. Propriétés physico-mécaniques du ciment

Les propriétés physico-mécaniques du ciment sont les suivantes [62] :

- Masses volumiques : $\rho_{app} = 1410 \text{ kg/cm}^3$, $\rho_{abs} = 3110 \text{ kg/cm}^3$
- Consistance normale de la pâte de ciment (%) : 25,5 – 28,00
- Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g): 4 300 – 4 800
- Début de prise (min) ≥ 60
- Résistance à la compression (Mpa) : R_c 2 jours (18,00 – 22,00) ; R_c 28 jours ≥ 42.5

D'après ces résultats, le ciment correspond à un ciment CEM II/A 42.5 R selon la norme NA442 [61], avec des propriétés physico-mécanique et chimiques satisfaisants aux exigences de la norme.

III.1.3. Les granulats

III.1.3.1. Analyse granulométrique

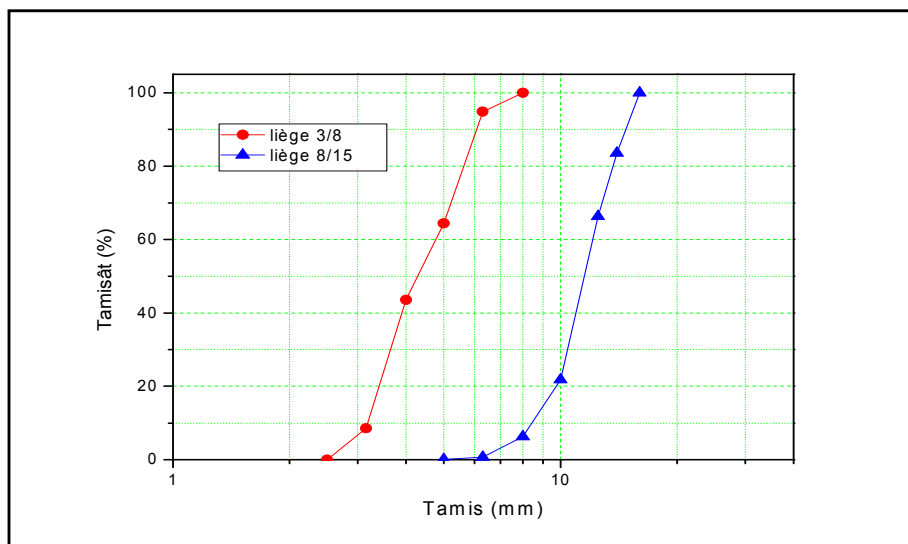
Les résultats de l'analyse granulométrique des deux classes granulaires 3/8 et 8/15 des granulats de liège expansé sont représentés dans les tableaux III-5 et III-6 et ses courbes granulométriques sont représentées sur la figure III-2.

Tableau III-5: Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 3/8

Masse des granulats 160 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	0	0	0,00	100,00
6,3	8,3	8,3	5,19	94,81
5	48,7	57	35,63	64,38
4	33,3	90,3	56,44	43,56
3,15	56	146,3	91,44	8,56
Fond	13,7	160	100,00	0,00

Tableau III-6 : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 8/15

Masse des granulats 160 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	0	0	0,00	100,00
14	26,3	26,3	16,44	83,56
12,5	27,6	53,9	33,69	66,31
10	71,2	125,1	78,19	21,81
8	24,9	150	93,75	6,25
6,3	8,9	158,9	99,31	0,69
fond	0,9	159,8	99,88	0,13



III.1.3.2. Caractéristiques physiques

➤ Degré d'absorption d'eau

Afin de contrôler la quantité d'eau dans le mélange à cause de leur effet très important sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton (maniabilité et la résistance). Après l'immersion d'une masse de 30 g des granulats secs dans l'eau pendant 24 h à 20 °C, on mesure la masse d'eau absorbée pour chaque 30 secondes jusqu'à la stabilisation de celle dernière où on assure que l'eau contenue dans les pores intérieurs des granulats soit sortie. (figure III-3).

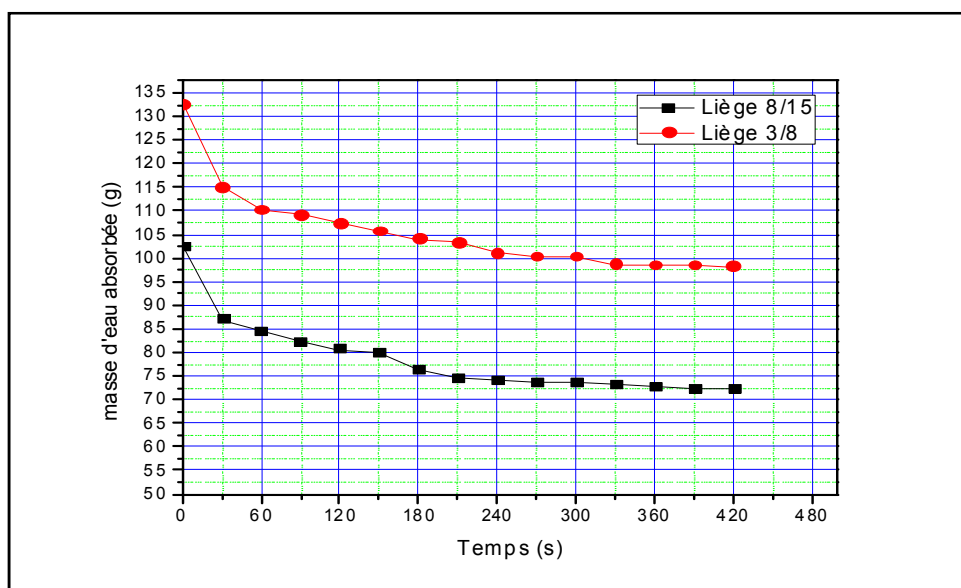


Figure III-3 : Courbes d'absorption d'eau des granulats de liège 3/8 et 8/15.

Les propriétés physiques des granulats de liège expansé sont regroupées dans le tableau III-7.

Tableau III-7: Caractéristiques physiques des granulats

Propriété physique	Classe granulaire	
	3 / 8	8 / 15
Masse volumique apparente (kg/m^3)	71	65
Masse volumique absolue (kg/m^3)	145	145
Porosité n (%)	51	55
Degré d'absorption (g/g)	2.3	1.4
Teneur en eau (%)	2	1

D'après les résultats du tableau III.7. On remarque que les granulats 3/8 en raison de leurs compacité importants sont moins poreux, plus lourds et ont un degré d'absorption d'eau plus élevé par rapport aux granulats 8/15.

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 [10, 63, 64]. 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 expansé dans ce travail.

III.2.1. Formulation du béton témoin

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

III.2.1.1. 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.

III.2.1.2. Optimisation du dosage en eau

En général, la maniabilité d'un béton dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. Pour un béton de sable, où les grains des granulats sont caractérisés par une grande surface spécifique, la quantité d'eau nécessaire est plus élevée que celle d'un béton ordinaire. Par conséquent, le rapport E/C (eau/ciment) est nettement supérieur à celui des bétons classiques et se situe généralement entre 0.6 et 0.7 [65].

Pour un dosage en ciment $C/S=1/3$, on a procédé à la confection d'une série d'éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm en faisant varier le rapport E/C d'une valeur minimale de 0.35 à une valeur maximale de 0.65. On soumet ces différents échantillons à l'essai d'écrasement par compression. La démarche suivie est la suivante :

- Recherches des caractéristiques rhéologiques à l'état frais (bonne maniabilité).
- Etude du béton à l'état durci (recherche des résistances optimales à la compression).

Les résultats des résistances des mortiers pour les différents dosages en eau sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau III-8: 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
Compression (MPa)	10.7	15.3	19.5	22.9	25.7	27	25.2

La variation de la résistance à 28 jours en fonction du rapport E/C est représentée sur la figure suivante.(figure III-4).

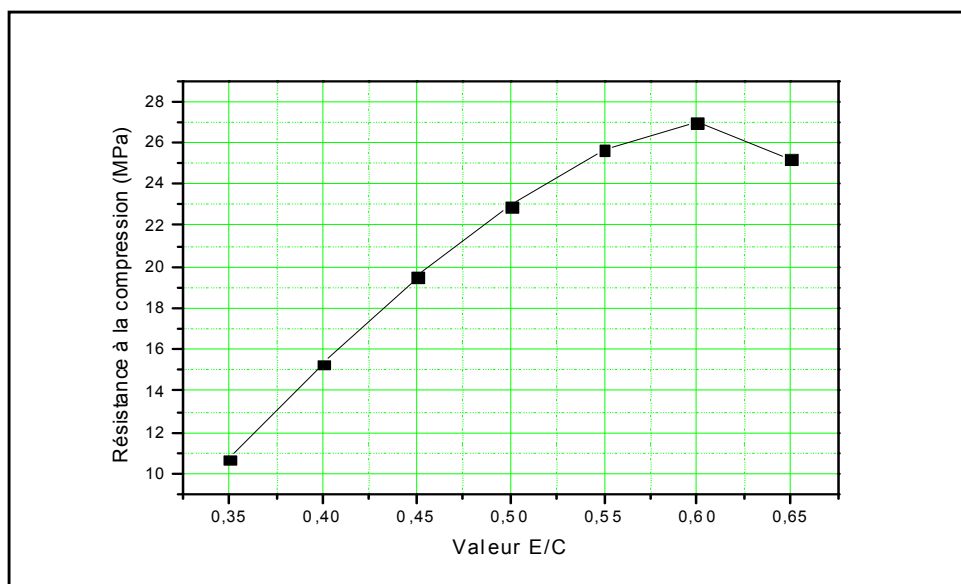


Figure III-4 : Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C

D'après les résultats obtenus, la valeur optimale pour le rapport E/C est 0.60. Ce rapport est maintenu pour déterminer la quantité de l'eau de gâchage des bétons élaborés à la quelle on doit ajouter la quantité nécessaire pour compenser le taux d'absorption des granulats.

III.2.2. Formulation des bétons élaborés

Trois pourcentages en volume du liège expansé ont été utilisés 2, 1.5 et 1 en fonction du volume du sable calcaire (Liège/Sable calcaire) c'est-à-dire $V_g/V_s = 2$; $V_g/V_s = 1.5$ et

$V_g/V_s = 1$. Pour la confection des bétons on a utilisé deux fractions du liège expansé 3/8 et 8/15.

Ces proportions ont été choisies afin de situer le béton dans la gamme des bétons des granulats légers isolant et porteurs (la masse volumique entre 1000 et 1400 kg/m³) [4].

III.2.3. Préparation des éprouvettes

III.2.3.1. Malaxage

Afin d'éviter le problème de ségrégation en raison de la légèreté des granulats, le mode de malaxage suivant a été adopté :

- Mettre dans le malaxeur les granulats sec + 2/3 de la quantité d'eau
- Malaxer pendant 2 minutes.
- Ajouter ½ quantité du ciment avec le malaxer pendant 1 minutes
- Introduire le sable graduellement pendant que le malaxage continue pendant 2 minutes 30 secondes.
- Laisser reposer 1 minute
- Ajouter le reste du ciment avec malaxage pendant 1 minute.
- Ajouter le reste de la quantité de l'eau.
- Malaxer pendant 1 minute 30 secondes.

III.2.3.2. La mise en moule

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes en béton sont de forme prismatique (7x7x28) cm³. Le choix des dimensions du moule est fixé par la norme NF P.18-400 [56]. Ils sont convenable pour réaliser les essais physicomécaniques des bétons élaborés.

Après la préparation des bétons, la mise en moule est faite en trois couches damées à 25 coups de chacune, sans vibration pour éviter le problème de ségrégation affectant l'homogénéisation des échantillons [2].

Afin d'étudier l'apport de l'environnement de cure sur les caractéristiques physicomécaniques les éprouvettes ainsi élaborées sont conservées dans deux environnements pendant 7, 14 et 28 jours :

- Les conditions ambiantes du laboratoire (Air libre).
- Une cure par immersion dans l'eau.

III.3. Caractérisation des bétons frais

III.3.1. Consistance et maniabilité

Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité du béton léger. Les deux paramètres les plus intéressants sont [66] :

- La variation de la quantité d'eau initialement absorbée par les granulats légers.
- La quantité d'eau de gâchage.

L'essai classique utilisé pour la détermination de la maniabilité est l'essai d'affaissement au cône d'ABRAMS selon la norme française NF P 18-451[56], c'est le plus couramment employé pour caractériser le béton sur chantier.

L'évolution de la maniabilité du béton de liège expansé en fonction du dosage de liège est présentée dans le tableau III-9 et la figure III-5.

Tableau III-9: Evolution de la maniabilité en fonction du rapport liège/sable (Vg/Vs)

Rapport Vg/Vs	Affaissement (cm)	
	BL 8/15	BL 3/8
2	2	5
1,5	6	7.5
1	7.5	8.5
0	9	9

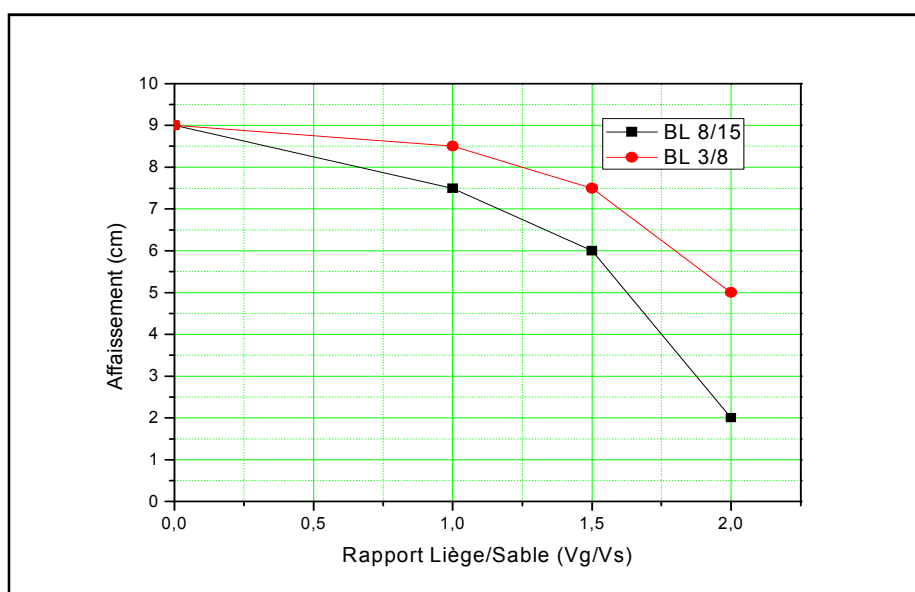


Figure III-5: Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en liège expansé

Nous avons constaté que l'ouvrabilité du matériau composite (liège expansé /sable), diminue avec l'ajout de liège, et elle est plus importante dans les bétons BL 8/15 que celle dans BL 3/8 et cela est du principalement à l'effet de l'introduction de la quantité nécessaire au mouillage des granulats de liège expansé 3/8.

III.3.2. Etude de la masse volumique du béton frais

Le tableau III-10 regroupe les valeurs de la masse volumique des bétons légers à base de granulats de liège à l'état frais.

Tableau III-10: Masses volumiques de différentes compositions à l'état frais

Dosage en liège (Vg/Vs)	Masses volumiques à l'état frais (kg/m ³)	
	BL 8/15	BL 3/8
2	1213	1265
1,5	1439	1436
1	1567	1575
0	2190	2190

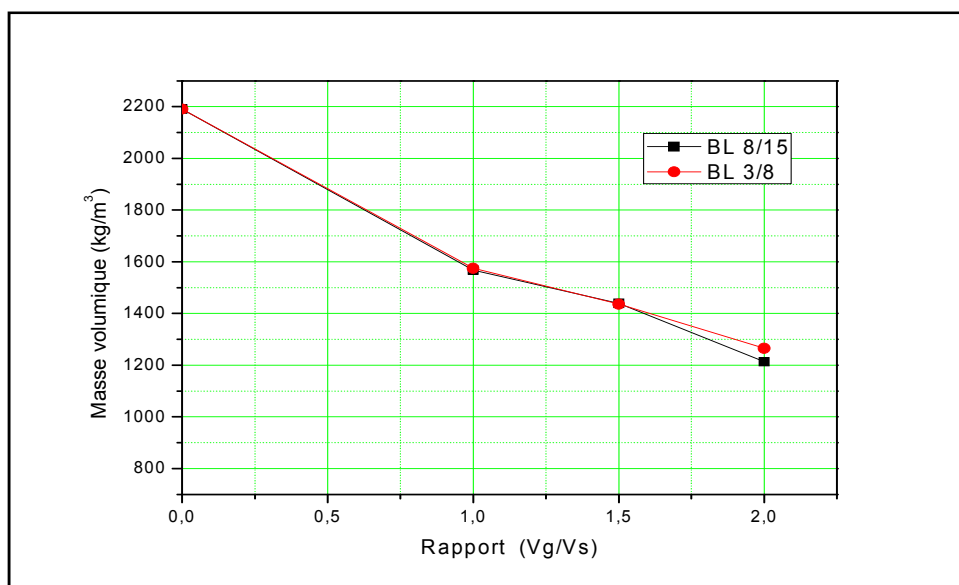


Figure III-6: Evolution de la masse volumique du béton à l'état frais en fonction du dosage en liège

D'après les valeurs du tableau III-10 et les courbes de la figure III-6, nous remarquons que l'évolution de la masse volumique du béton de liège expansé à l'état frais est décroissante en fonction du dosage du liège. Ceci paraît logique puisque la masse volumique des granulats de liège expansé est plus faible que les autres constituants. La masse volumique du béton témoin (sans liège) était de l'ordre de 2190 kg/m^3 , et après l'ajout du liège ; elle a diminué avec $V_g/V_s = 2$, jusqu'à 1213 kg/m^3 pour le BL 8/15 et 1265 kg/m^3 pour BL 3/8.

III.4. Etude des bétons à l'état durci

Les principaux essais effectués sur le béton durci en fonction de son âge sont :

- Mesure de la masse volumique apparente
- Mesure de la résistance à la compression
- Mesure de la résistance à la flexion
- Mesure du retrait
- Mesure d'absorption d'eau par capillarité
- Mesure d'absorption d'eau par immersion
- Mesure de la conductivité thermique.

III.4.1. Masse volumique apparente

La masse volumique des bétons légers est l'une des caractéristiques les plus importantes. Elle a été déterminée par pesée à l'âge de 28 jours après séchage à l'étuve jusqu'à masse constante

Le tableau III-11 présente la variation de la masse volumique à l'état durci à 28 jours en fonction du dosage en liège expansé.

Tableau III-11: Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège expansé

Dosage en liège (V_g/V_s)	Masses volumiques à l'état durci (kg/m^3)			
	BL 8/15		BL 3/8	
	Air libre	Eau	Air libre	Eau
2	1027	1012	980	966
1,5	1178	1159	1124	1109
1	1308	1318	1287	1282
0	1949	1973	1949	1973

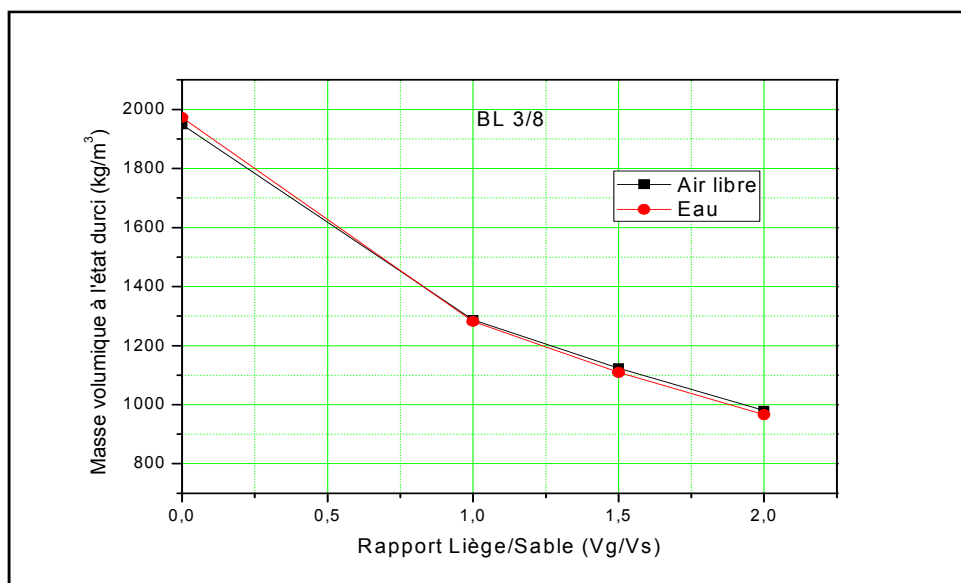


Figure III-7: Variation de la masse volumique du BL 3/8 en fonction du dosage en liège

D'après le tableau III.11. On constate que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le pourcentage en liège expansé augmente. Et ceci est dû au fait que la matière est remplacée par le liège qui est léger.

On enregistre une diminution de la masse volumique apparente des bétons conservés à l'air libre pendant 28 jours de l'ordre de 34 % pour BL 3/8 et cela pour un pourcentage de liège $V_g/V_s = 1$ par rapport au béton de référence de sable calcaire qui a une masse volumique 1949 kg/m^3 . (Figure III.7).

A partir du dosage $V_g/V_s = 1$ jusqu'à $V_g/V_s = 2$ l'allègement est de l'ordre de 13 % pour BL 3/8-1.5 et de 24 % pour BL 3/8-2 par rapport BL 3/8-1.

Pour les bétons conservés dans l'eau, les masses volumiques de BL 3/8-1 et BL 8/15-1 sont 1282 et 1318 kg/m^3 qui présentent une diminution de 35 % et 33 % par rapport au béton témoin. (Figures III.7 ; III.8), et à partir de $V_g/V_s = 1$, la diminution est peu significative.

La figure III.8 montre la variation de la masse volumique du BL 8/15 en fonction du dosage en liège.

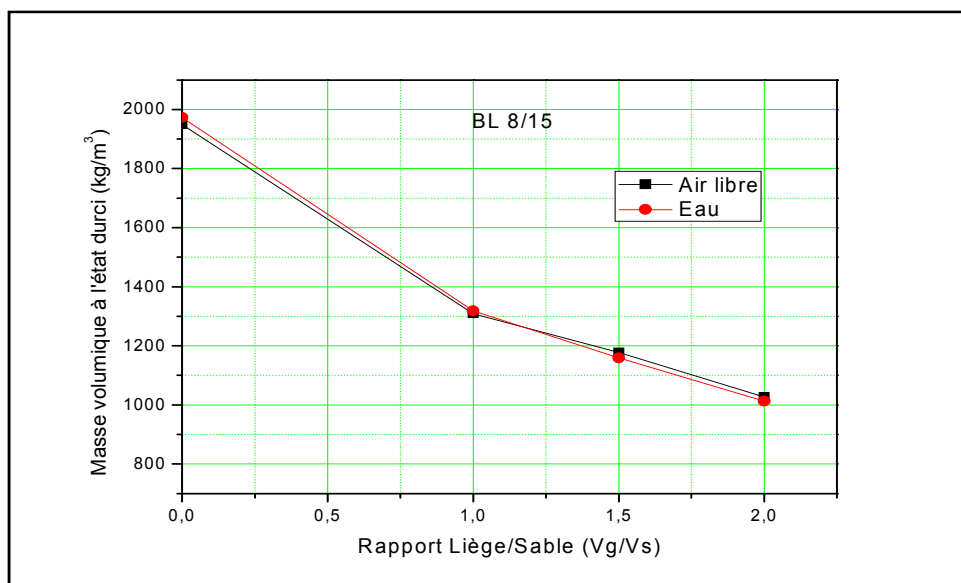


Figure III-8: Variation de la masse volumique du BL 8/15 en fonction du dosage en liège

On remarque que l'augmentation du pourcentage de liège réduit la masse volumique du béton. La réduction est de l'ordre de 33 % pour un rapport $V_g/V_s=1$ à l'air libre.

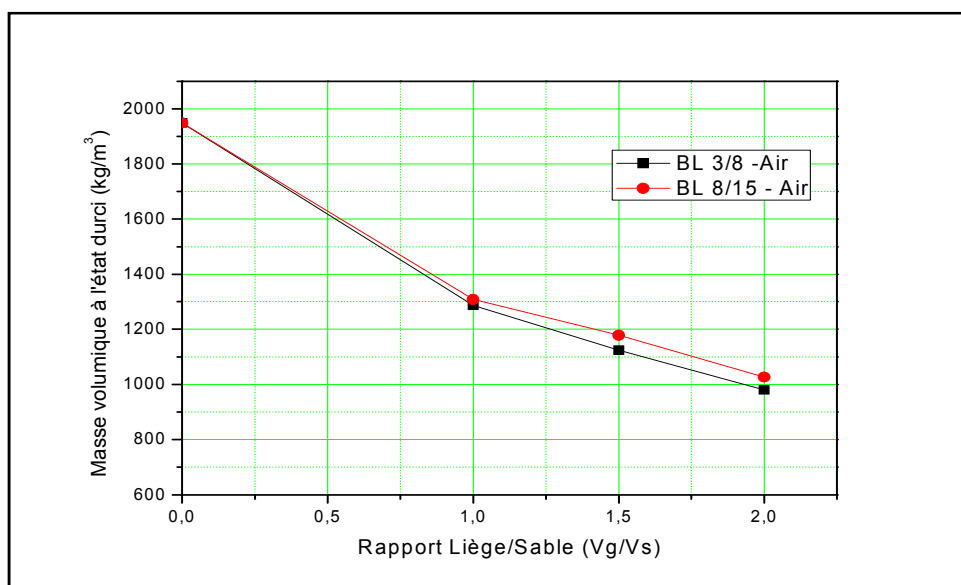


Figure III-9: Variation de la masse volumique du béton conservé à l'air libre

On remarque clairement que les masses volumiques des bétons BL 3/8 sont inférieures à celles du BL 8/15 dans les deux environnements (Air libre – Eau) comme le montre les figures III.9 et III.10.

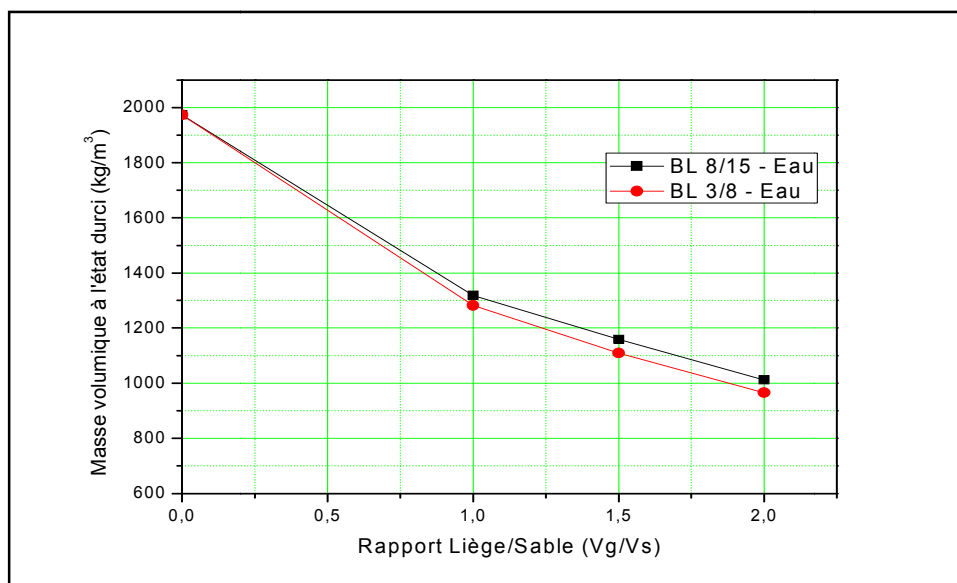


Figure III-10: Variation de la masse volumique du béton conservé à l'eau

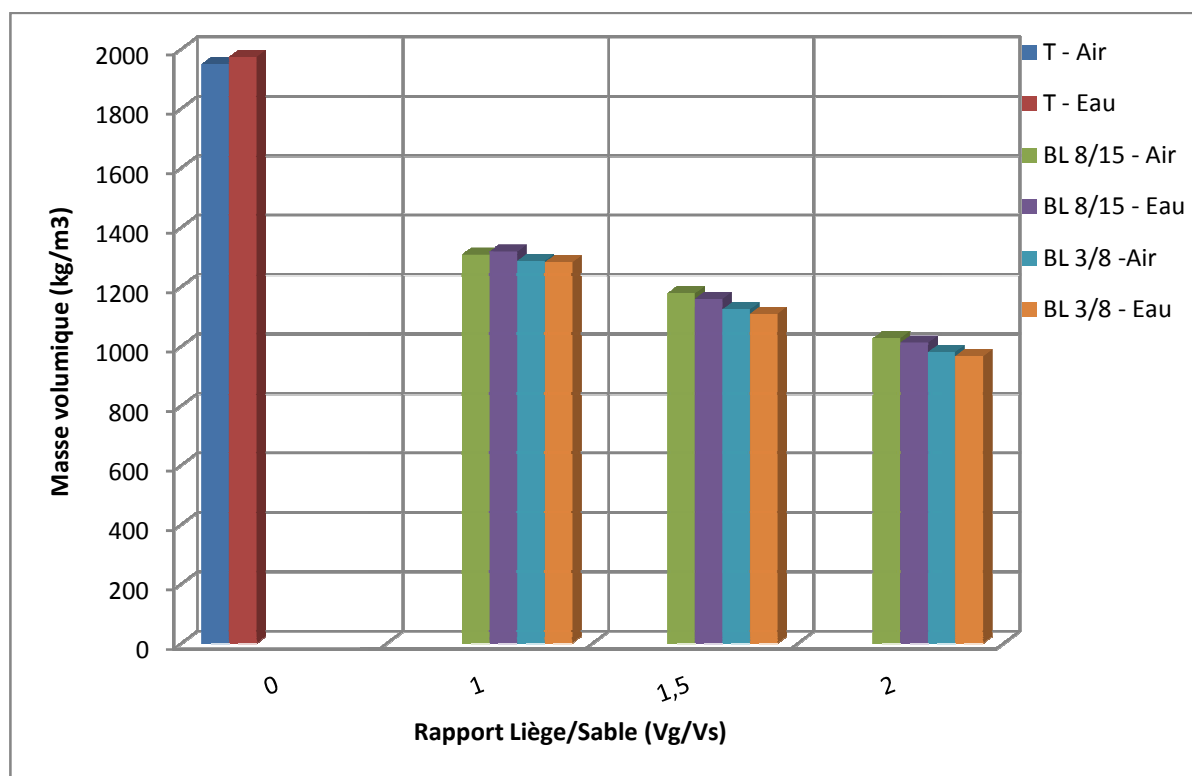


Figure III-11: Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège.

D'après ces résultats, on constate que :

- La masse volumique apparente des compositions diminue lorsque le pourcentage des granulats de liège expansé augmente. En effet, Les granulats de liège expansé sont des granulats légers ; l'augmentation de la quantité ajoutée en liège favorise la diminution de la densité du béton. On trouve que :

$$\text{Pour BL 8/15 : } 1308 > \rho_{\text{app}} (\text{BL 8/15}) > 1027 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Pour BL 3/8 : } 1287 > \rho_{\text{app}} (\text{BL 3/8}) > 980 \text{ kg/m}^3.$$

- Les bétons légers à base de granulats de liège expansé 3/8 ont des masses volumiques moins que ceux de granulats 8/15, dans les deux environnements, Ceci est lié directement par les caractéristiques physiques des granulats de liège, car la porosité des granulats 8/15 est de l'ordre de 55 %. Cette valeur est supérieure à celle des granulats 3/8 qui est de l'ordre 51%. Cela permet d'augmenter le volume de la matrice du ciment qui susceptible d'augmenter la masse du béton.

III.4.2. Résistance mécanique

III.4.2.1. Résistance à la compression

Les mesures ont été effectuées sur les demi-éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ issues de l'essai de flexion.

La figure III-12 présente les résultats des essais de compression du matériau composite à base de granulats de liège expansé.

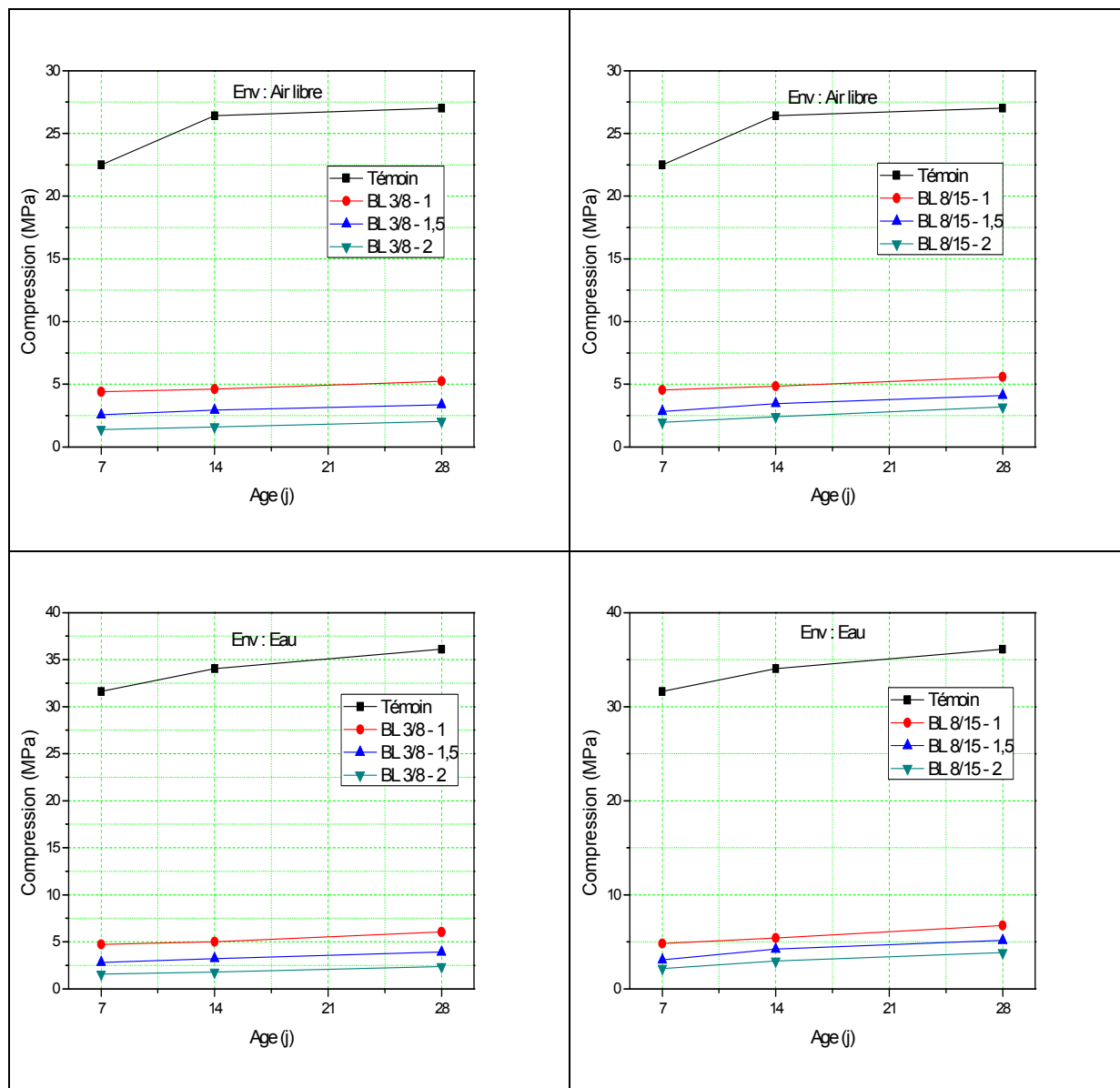


Figure III-12: Variation de la résistance à la compression des différents bétons

Dans la figure III.12 qui présente la variation de la résistance à la compression des différents matériaux élaborés en fonction de l'âge et à différents environnements (Air libre-Eau), nous

pouvons remarquer que l'allègement de béton à base de sable calcaire par les granulats de liège expansé diminue considérablement la résistance de compression. Cela est dû à l'augmentation des vides et par conséquent la porosité du matériau augmente. Le taux de décroissance est de l'ordre de 79 % et 81 % pour BL 8/15-1 et BL 3/8-1 respectivement dans l'environnement de l'air libre et de 81 % et 83 % dans l'environnement de l'eau. L'évolution de la résistance en compression du béton témoin croît en deux paliers à cause de l'augmentation de la porosité interconnectée due à l'évaporation rapide au jeune âge. Par contre le béton de liège, l'évolution presque régulière car l'évaporation avec le liège est plus difficile et engendre une progression régulière de l'hydratation du ciment avec cinétique régulière.

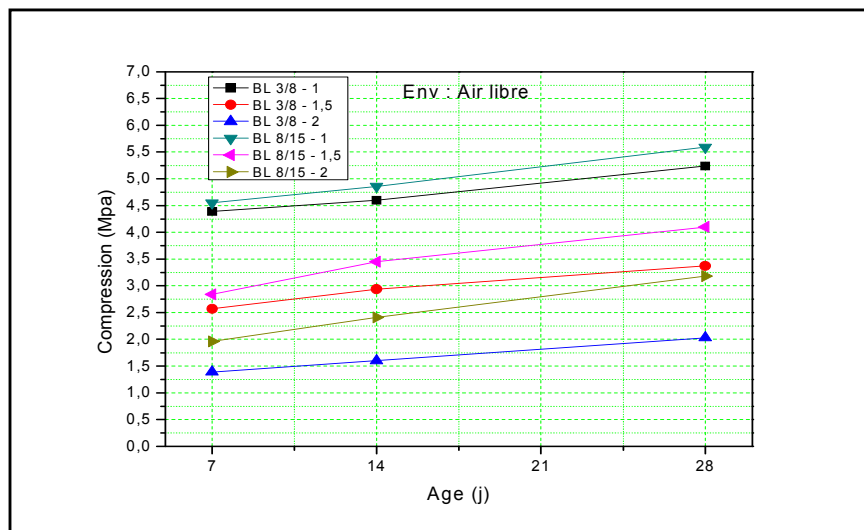


Figure III-13: Evolution de la résistance à la compression des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'air libre en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s .

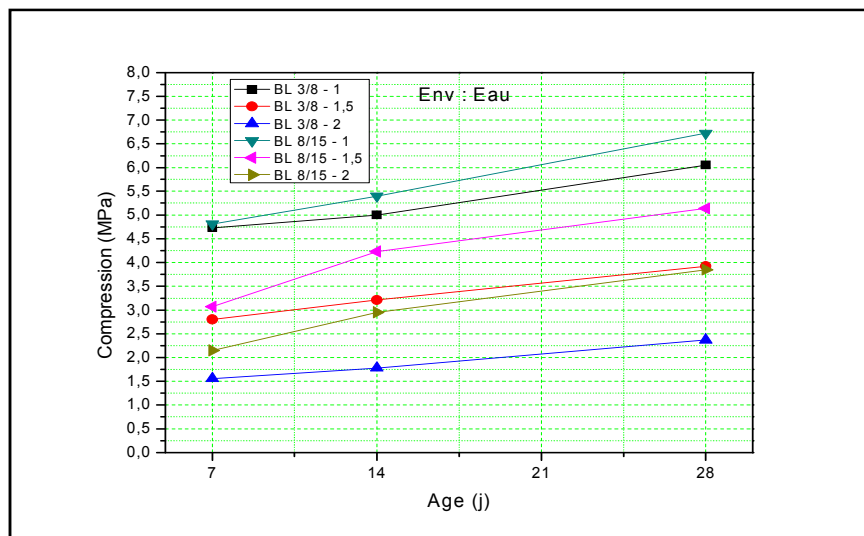


Figure III-14: Evolution de la résistance à la compression des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'eau en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s .

La résistance à la compression augmente avec le temps et avec l'augmentation de la durée de cure humide dans l'eau, cette augmentation est due au développement de l'hydratation en fonction du temps. (Figures III.13 et III.14).

La figure III.15 résume les résultats obtenus de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de rapport liège /sable. On remarque d'après cette figure que l'ajout de liège allant du dosage 1 à 1.5 diminue la résistance des bétons conservés dans l'eau de l'ordre de 24 % (de 6.72 à 5.14 MPa) pour BL 8/15 et 35 % (de 6.05 à 3.92MPa) pour BL 3/8.

La décroissance pour BL 8/15-2 est 43 % (de 6.72 à 3.85MPa) et de 61 % (de 6.05 à 2.37MPa) pour BL 3/8-2.

Donc les granulats de liège expansé 3/8 rendent le béton de sable calcaire moins résistant que les granulats de liège 8/15.

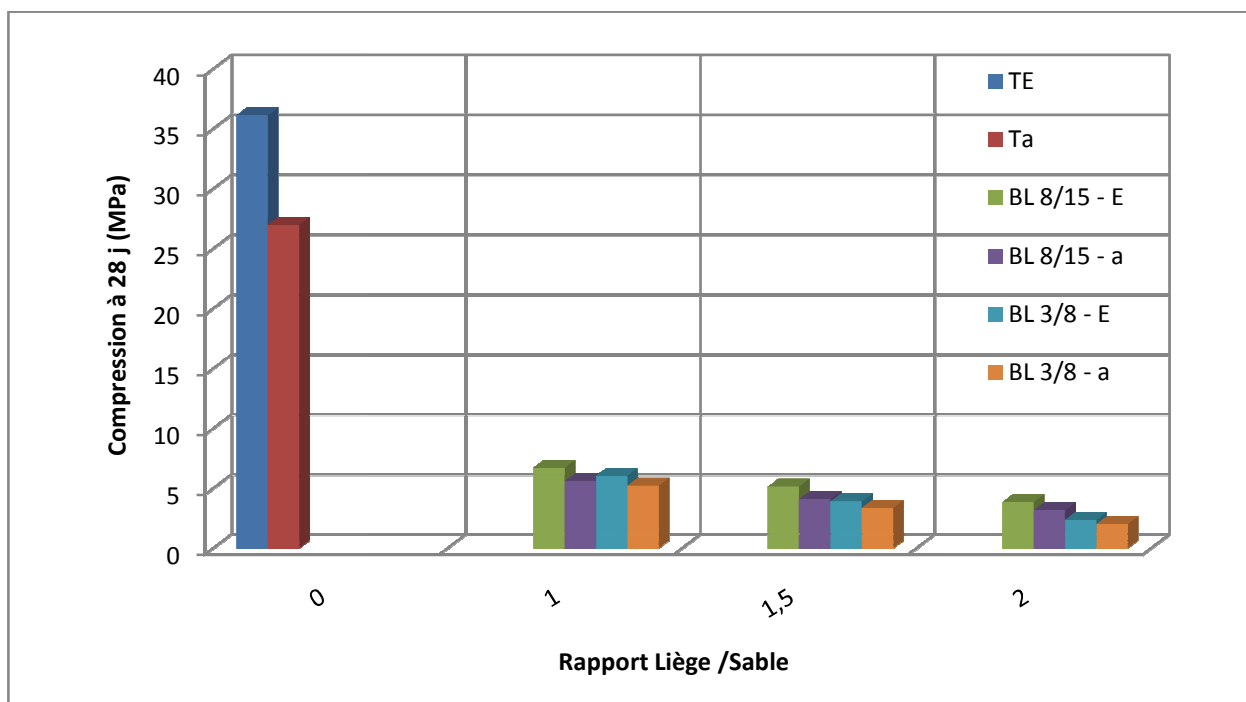


Figure III-15: Evolution de la résistance à la compression à 28j conservés dans l'eau en fonction de rapport Liège/sable.

➤ Résistance à la compression en fonction de la masse volumique apparente

L'évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la masse volumique apparente est présentée dans les figures III.16 et III.17 des deux bétons BL 3/8 et BL 8/15 dans les deux environnements (Air libre-Eau).

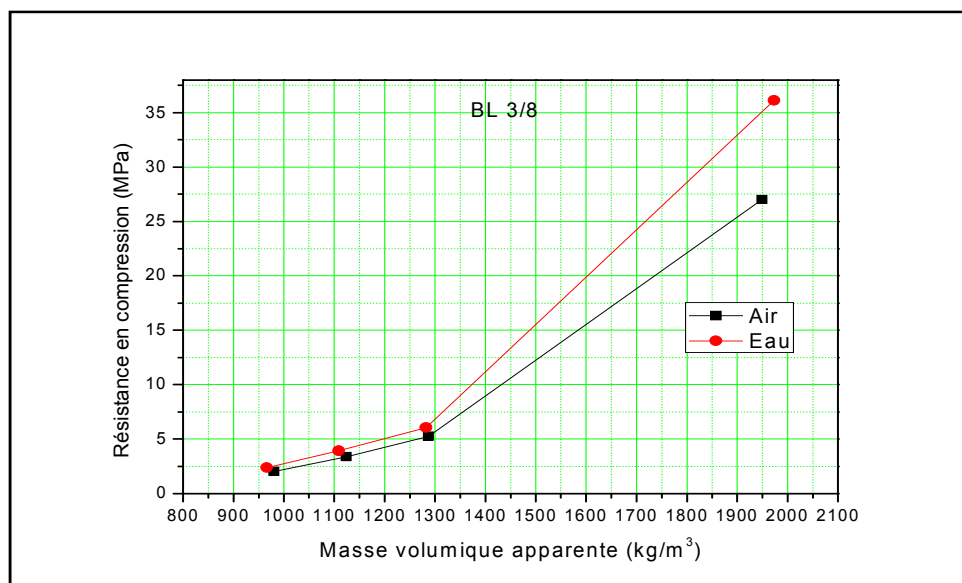


Figure III-16: Variation de la résistance en compression des BL 3/8 en fonction de la masse volumique apparente.

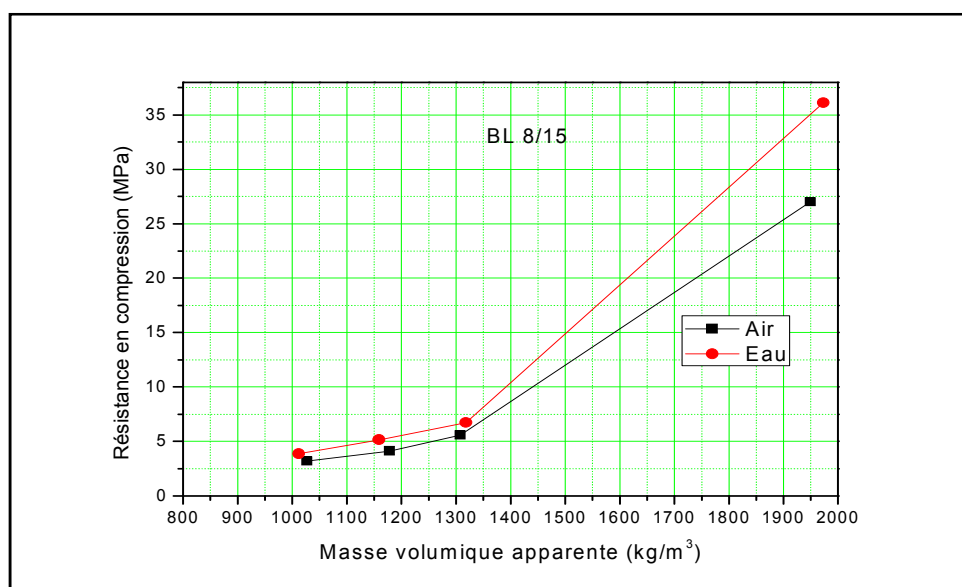


Figure III-17: Variation de la résistance en compression des BL 8/15 en fonction de la masse volumique apparente.

Les figures III.16 et III.17 montrent que la résistance à la compression des BL 3/8 et des BL 8/15 diminue lorsque la masse volumique diminue. Une chute très rapide est constatée en passant du béton témoin au béton le moins allégé. Cette décroissance est de plus en plus faible en augmentant le dosage en granulats. Une amélioration de la résistance est obtenue pour le mode de conservation dans l'eau et ceci pour les deux types de bétons.

III.4.2.2. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion à trois points a été mesurée sur les éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 pour chaque composition.

La résistance à la flexion à 28 jours pour les différentes compositions étudiées est donnée par la figure III.18.

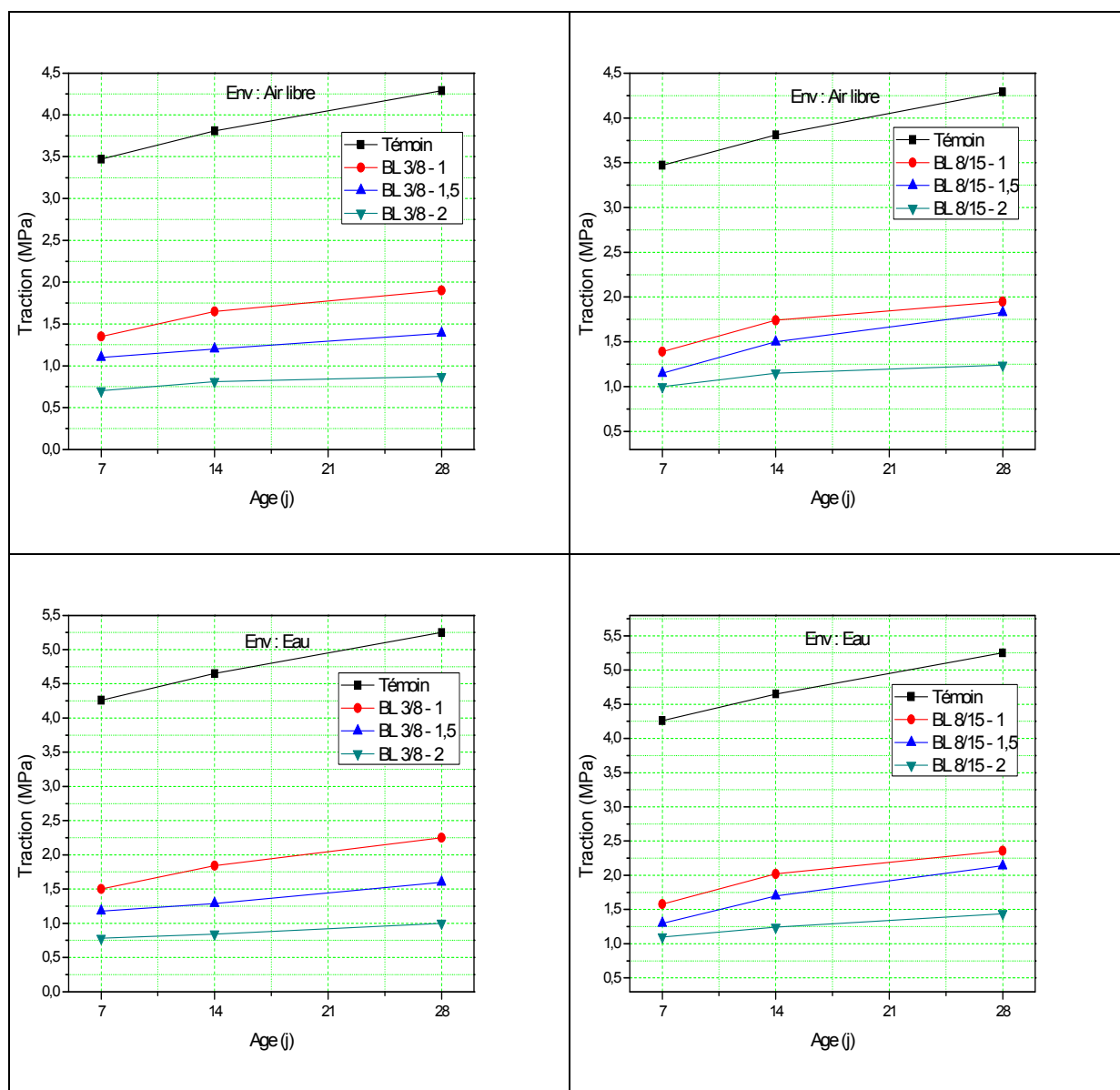


Figure III-18: Variation de la résistance à la traction des différents bétons

D'après la figure III.18. On remarque, avec l'ajout de liège, une chute très rapide de résistance en traction du béton de référence présente 57 % (de 5.25 à 2.25 MPa) pour le BL 3/8-1 et 55 % (de 5.25 à 2.36 MPa) pour BL 8/15-1, dans l'environnement de l'eau.

Les figures III.19 et III.20 illustrent la variation de la résistance en traction des BL 3/8 et BL 8/15 en fonction du dosage en liège et en fonction de l'âge et mode de conservation.

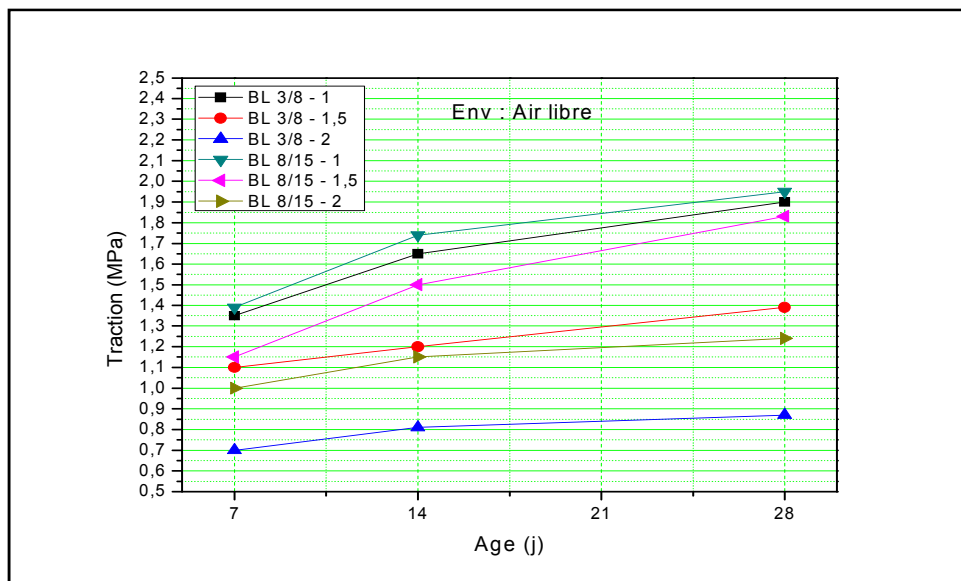


Figure III-19: Evolution de la résistance à la traction des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'air libre en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s .

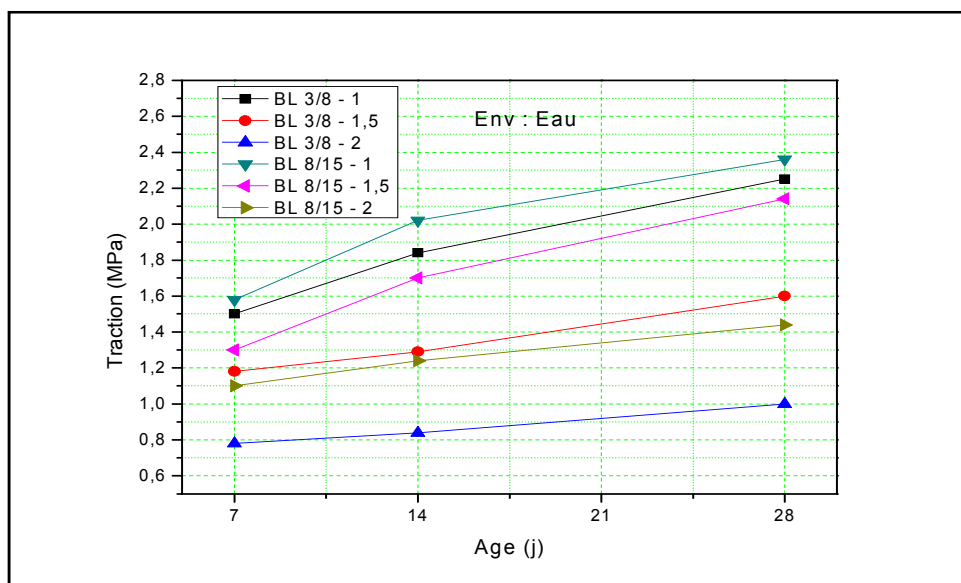


Figure III-20: Evolution de la résistance à la traction des BL 3/8 et BL 8/15 conservés dans l'eau en fonction de l'âge et de rapport V_g/V_s .

On observe que l'augmentation du volume de liège expansé réduit légèrement la résistance à la traction. L'allure des courbes semble être identique à celle de la variation de la résistance à la compression.

La figure III.21 montre l'évolution de la résistance en traction à 28 jours en fonction du dosage en liège.

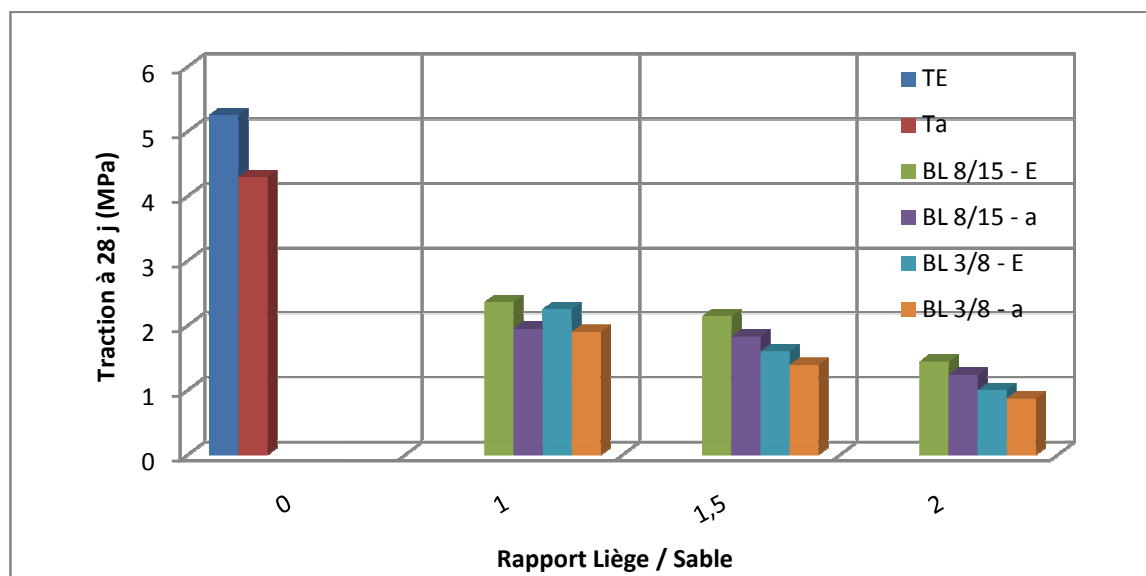


Figure III-21: Evolution de la résistance à la traction à 28j des bétons conservés dans l'eau en fonction de rapport Liège /Sable

On remarque que pour le même rapport (Liège/sable) les valeurs de la résistance en traction des BL 3/8 sont inférieures à celles des BL 8/15.

➤ Résistance à la traction en fonction de la masse volumique

Les figures III.22 et III.23 présentent l'évolution de résistance en traction en fonction de la masse volumique apparente des matériaux élaborés.

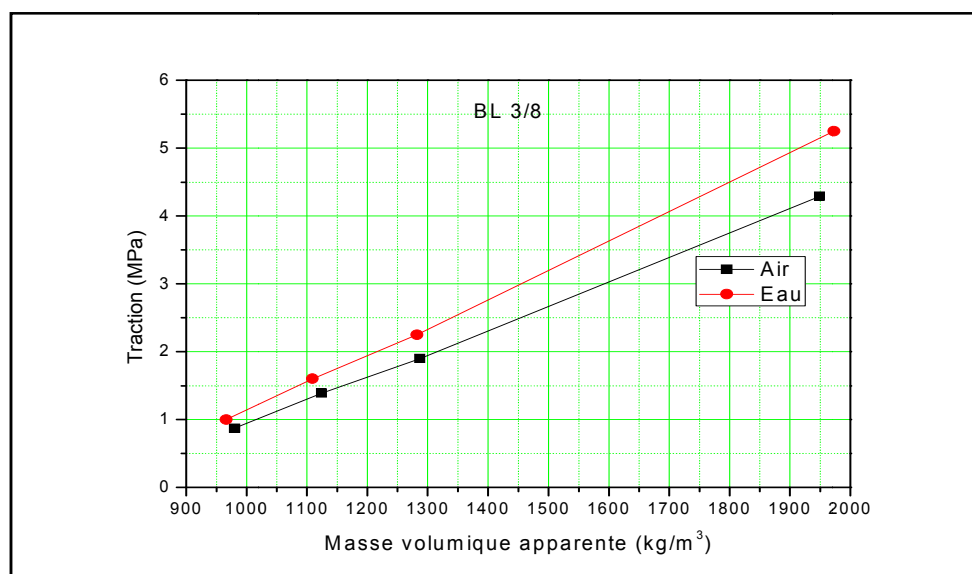


Figure III-22: Variation de la résistance en traction des BL 3/8 en fonction de la masse volumique apparente.

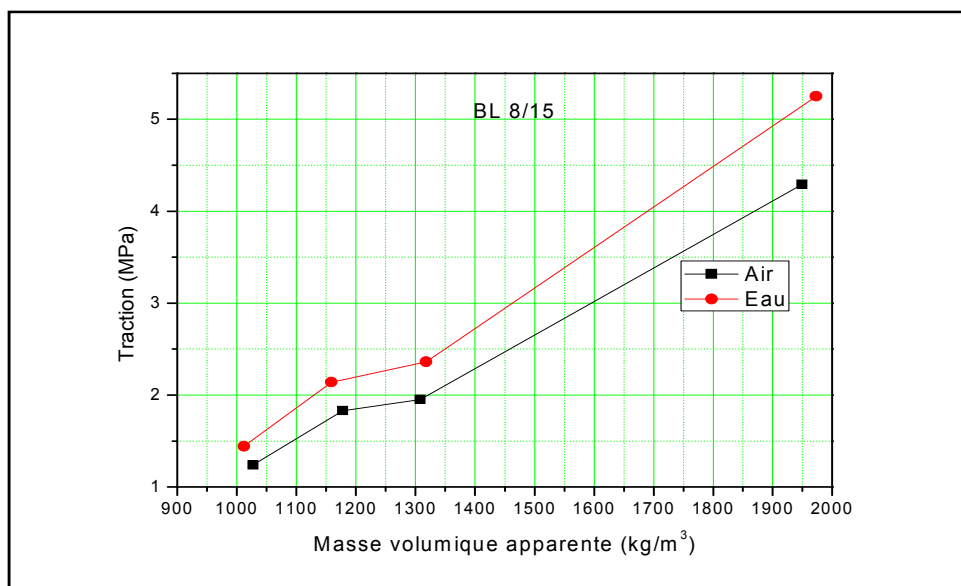


Figure III-23: Variation de la résistance en traction des BL 8/15 en fonction de la masse volumique apparente.

On constate que la résistance à la traction diminue lorsque la masse volumique du béton diminue, ceci est tout à fait logique car la résistance à la traction est, comme pour les bétons classiques, une fonction croissante de la masse volumique.

D'après les résultats des résistances mécaniques obtenus on remarque que :

- Le béton de sable calcaire utilisé a des bonnes caractéristiques mécaniques ($R_{c28} = 36.12 \text{ MPa}$, $Tr_{28} = 5.25 \text{ MPa}$).
- l'allègement du béton calcaire par les granulats de liège expansé engendre une chute très importante dans la résistance à la compression et dans la résistance à la traction, par rapport au béton témoin (sans granulats de liège).
- On trouve que la résistance à la compression varie entre 3.85 et 6.72 MPa pour le BL 8/15 et de 2.37 à 6.05 MPa pour le BL 3/8. tandis que la résistance à la traction varie entre 1.44 et 2.36 MPa pour le BL 8/15 et de 1 à 2.25 MPa pour le BL 3/8
- La cure des bétons influent sur les résistances mécaniques, on voit que les résistances des bétons conservés dans l'eau est plus grand que ceux conservés dans l'air libre. Ce bénéfice à la compression allant de 20 à 25% Pour les BL 8/15 et de 15 à 17 % pour les BL 3/8. et il est de 33 % pour le béton témoin. et le gain de la résistance à la traction variant entre 15 et 21 %.
- Les bétons légers à base de granulats de liège expansé 8/15 ont des résistances à la compression et à la traction, plus grands que celles des bétons de granulats de liège

expansé 3/8. et cela très clair, car pour chaque rapport Liège/Sable (V_g/V_s), on voit que la masse volumique des BL 8/15 est supérieur que celle des BL 3/8.

III.4.2.3. Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction

Nous avons essayé de tirer la relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction, et de trouver une corrélation reliant ces deux paramètres. La figure III-24 présente la corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction pour les différents bétons élaborés.

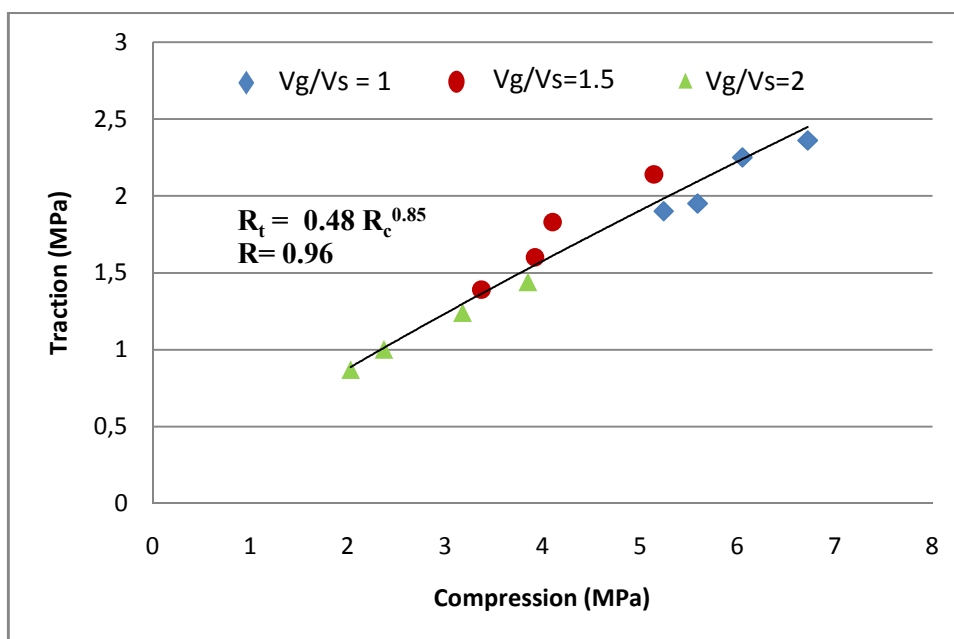


Figure III-24: Corrélation entre la résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion pour les différents bétons (Air-Eau)

Nous avons trouvé une relation de type puissance :

$$R_t = 0.48 R_c^{0.85} \quad (R_c \text{ en MPa}) \dots\dots\dots (III-6).$$

Avec un coefficient de corrélation de 0.96

Cette relation est peut être plus proche au celle a été trouvé par MERABTI Salem [17],

$$R_t = 0.31 R_c^{0.84} \dots\dots\dots (III-7). \text{ , avec un coefficient de corrélation de 0.97}$$

Et au contraire de résultat trouvait par M.BONZEL, $R_t = 0.23 R_c^{0.67} \dots\dots\dots (III-8)$. qui semble sous-estime la résistance à la traction avec un coefficient de corrélation $R = 0.88$ [10].

III.4.2.4. Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente

La figure III.25 montre la corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente pour les différents bétons (Air-Eau)

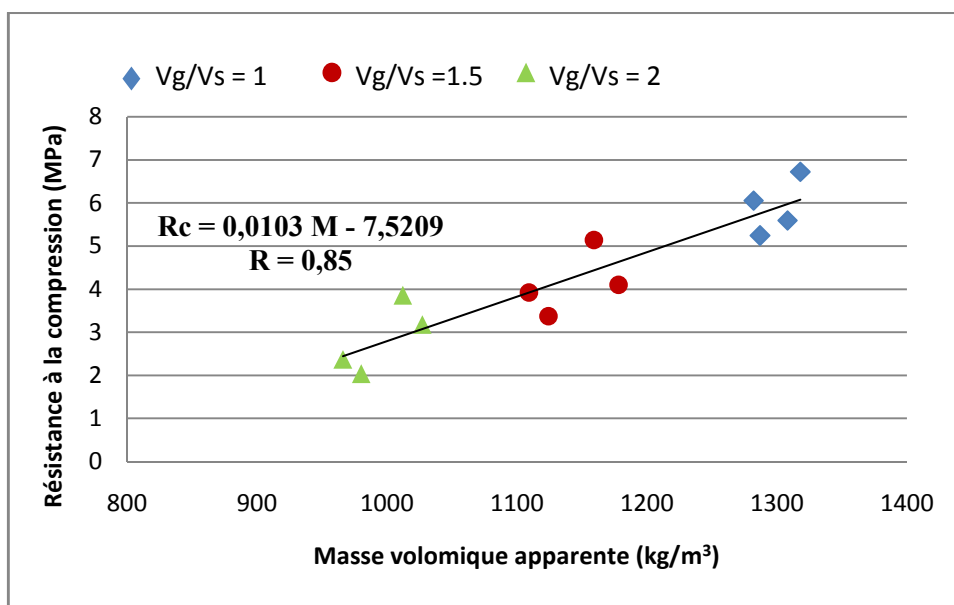


Figure III-25: Corrélation entre la résistance à la compression en fonction la masse volumique apparente pour les différents bétons (Air-Eau)

On a trouvé une relation linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente γ , pour les différents bétons et différents environnements.

$$R_c = -7.5209 + 0.0103 \gamma ; \quad (\gamma \text{ en kg/m}^3) \dots\dots\dots (III-9).$$

Il semble que la résistance à la compression est proportionnelle à la masse volumique apparente

Le résultat est trouvé par MERABTI Salem [17], nous donne des valeurs plus grandes.

$$R_c = -10.16 + 0.016 \gamma ; \quad (\gamma \text{ en kg/m}^3) \dots\dots\dots (III-10).$$

III.4.3. Variations dimensionnelles

Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ munies de plots à leurs extrémités conformément à la norme NF P 433. Ces éprouvettes sont placées dans un retractor muni d'un comparateur qui nous permet de mesurer le retrait à chaque âge. La conservation des éprouvettes est faite à deux environnements (air libre – eau), à une température variant entre 9°C et 15°C et une humidité relative entre 35 et 50 %.

On distingue le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée.

La variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation.

III.4.3.1. Evolution du retrait en fonction de l'âge

Lors du séchage, et en absence de toute charge extérieure, les échantillons diminuent spontanément de volume. Cette diminution s'appelle variation dimensionnelle ou encore retrait. Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. L'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage ; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite. Le retrait a des conséquences très graves (des fissures dans la construction) s'il n'est pas limité.

Les fissures de retrait sont provoquées par la contraction du béton dont les mouvements sont partiellement ou complètement empêchés. La diminution de volume provoque des contraintes internes de traction qui peuvent être à l'origine des fissures de la pâte.

Les résultats des mesures de retrait pour les différentes compositions des bétons de liège expansé sont présentés dans les figures (III-26, III-27, III-28).

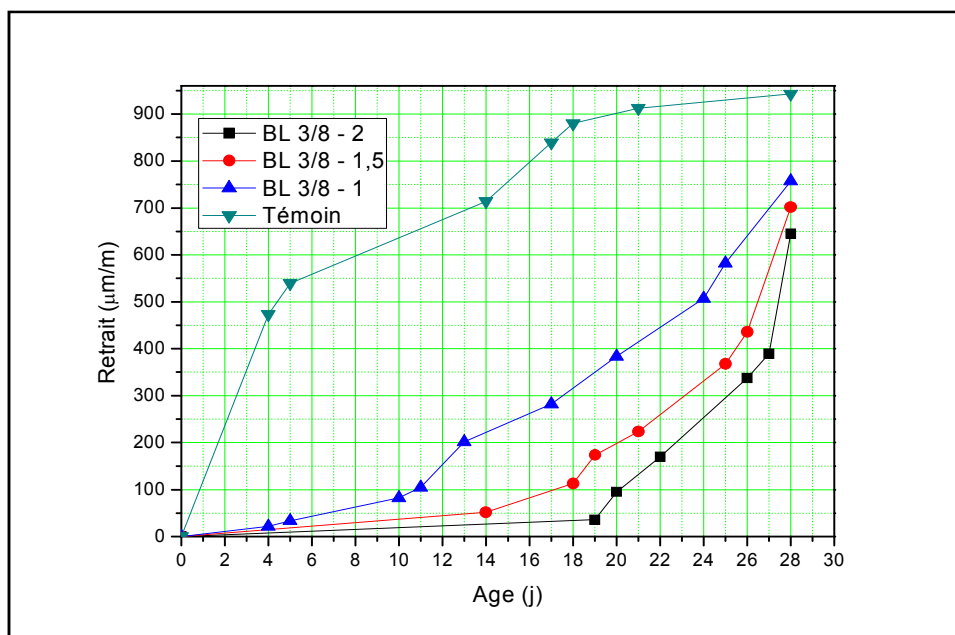


Figure III-26: Evolution de retrait en fonction du temps des bétons T et BL 3/8

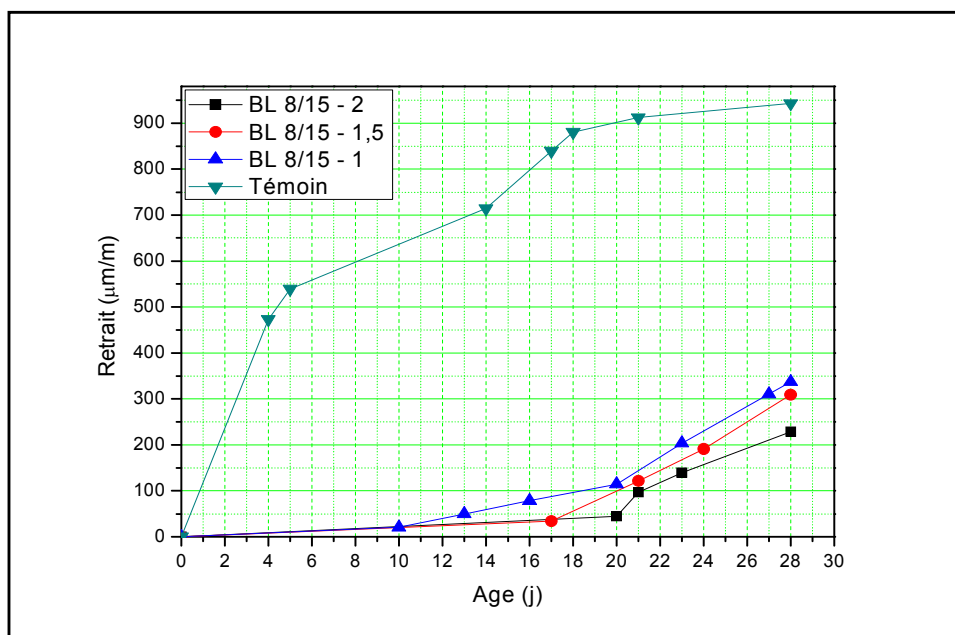


Figure III-27: Evolution de retrait en fonction du temps des bétons T et BL 8/15

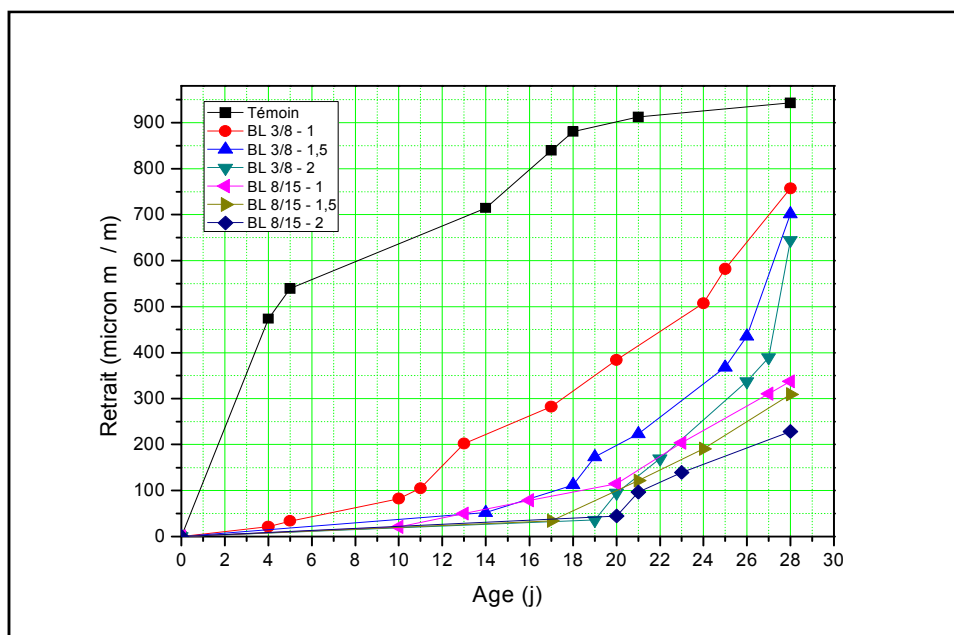


Figure III-28: Evolution de retrait en fonction du temps des différents bétons

On constate que quelque soit le pourcentage de liège expansé, le retrait est inférieur à celui du béton témoin. Car la décompression des granulats de liège (le retour à leur état initial après compression) diminue le retrait du béton ce qui confirme les résultats faible du retrait par rapport au béton témoin

Ceci est probablement due au climat de l'environnement car les granulats de liège expansé possèdent le caractéristique d'absorber l'humidité, ce qui susceptible d'influer sur le retrait.

On remarque que le retrait est inversement proportionnel avec la concentration du liège. La comparaison des deux bétons élaborés par granulats du liège expansé 3/8 et 8/15, montre un retrait plus élevé pour les granulats 3/8 en raison de sa capacité importante d'absorption d'eau.

L'effet d'un dosage important du ciment favorise plus l'augmentation du retrait ceci explique également les résultats élevés obtenus par rapport au témoin.

Nous pouvons remarquer aussi qu'au jeune âge le retrait du béton témoin croît plus rapidement par rapport les autres compositions.

III.4.3.2. Gonflement du béton à base des granulats de liège

La figure III-29 présente l'évolution du gonflement en fonction du temps des différents pourcentages de liège.

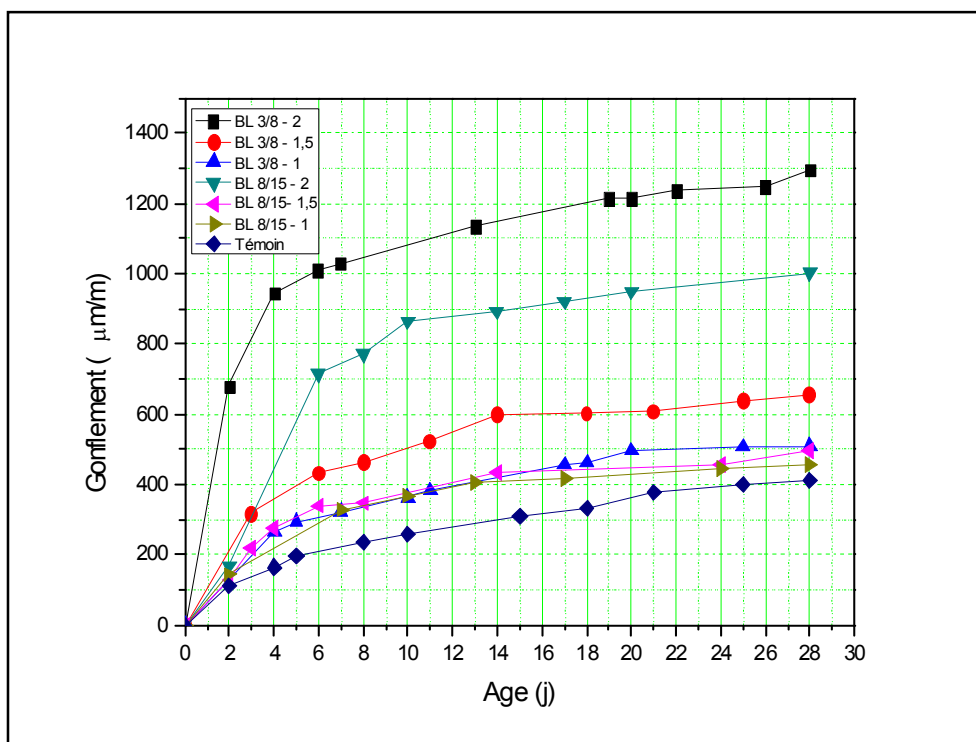


Figure III-29: Evolution du gonflement en fonction du temps

Le béton témoin et les bétons légers conservés dans l'eau pendant 28 jours peuvent subir des gonflements. Il est clair que le gonflement est proportionnel avec la quantité du liège à ajouter, cette relation due à la forte capacité d'absorption d'eau des granulats du liège et surtout les granulats 3/8, pour cela on trouve que le béton à base de granulats 3/8 est plus gonflant que celui de granulats 8/15, Tandis que le béton témoin a le faible gonflement.

III.4.4. Essai d'absorption d'eau

III.4.4.1. Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué sur des éprouvettes (7x7x28) cm³ sur une période de trois heures. Les échantillons testés sont les bétons légers avec granulats de liège 3/8 et 8/15 et béton témoin qui sont conservées dans les environnements (air libre – Eau) pendant 28 jours.

Les figures (III-30, III-31) montrent l'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps.

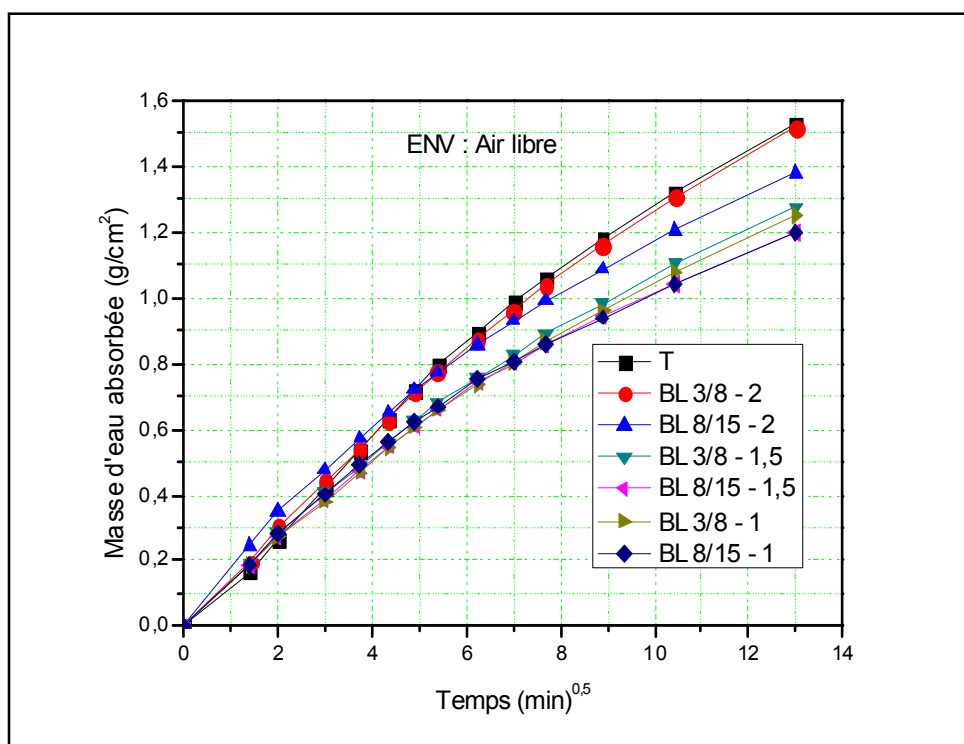


Figure III-30: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps- Environnement: Air libre.

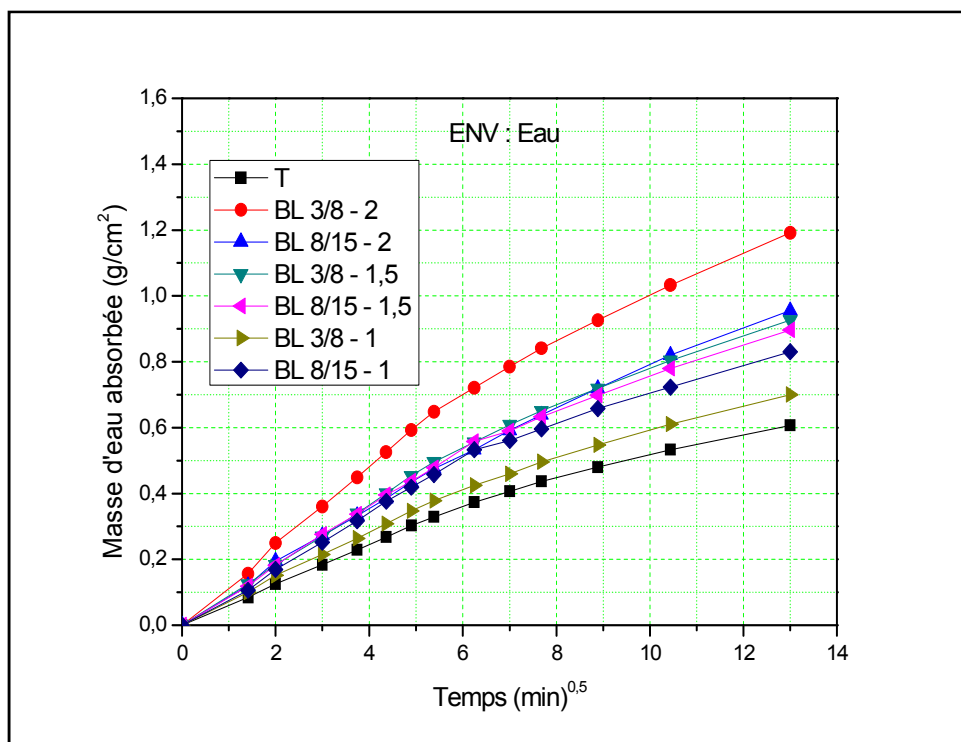


Figure III-31: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps - Environnement : Eau.

On remarque, selon les résultats obtenus, que

- L'augmentation des dosages des granulats pour chaque types des bétons, soit béton léger à base de granulats de liège 3/8 soit 8/15 entraine une augmentation d'absorption d'eau, le coefficient d'absorption d'eau du béton confectionné avec rapport de $V_g/V_s = 2$ est grande que celle du rapport $V_g/V_s = 1.5$ et $V_g/V_s = 1$.

$$C_a(V_g/V_s=2) > C_a(V_g/V_s=1.5) > C_a(V_g/V_s=1).$$

- Le béton témoin conservé à l'air libre a la plus grande absorption d'eau au contraire du béton témoin conservé à l'eau qu'il a la plus faible quantité d'eau absorbée.
- Les bétons légers avec granulats 3/8 (BL 3/8 - 2 ; BL 3/8 - 1.5 ; BL 3/8 - 1) absorbent une quantité d'eau plus grande que celle absorbés par les bétons légers avec granulats 8/15 (BL 8/15 - 2 ; BL 8/15 - 1.5 ; BL 8/15 - 1).
- L'absorption d'eau des bétons conservés à l'eau est faible que ceux sont conservés à l'air libre.

III.4.4.2. Essai d'absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau est mesurée sur des éprouvettes (7x7x28) cm³ après séchage jusqu'à masses constantes des bétons conservés à deux environnements (air libre et l'eau) à 28 jours puis immersion totale pendant 24 heures pour les différents bétons étudiés.

L'ensemble des résultats d'absorption d'eau par immersion est récapitulé dans le tableau suivant.

Tableau III-12: Evolution des porosités de différentes compositions

Env	Porosité (%)						
	Témoin	BL 8/15 - 1	BL 8/15 - 1,5	BL 8/15 - 2	BL 3/8 - 1	BL 3/8 - 1,5	BL 3/8 - 2
Air	18.38	21.29	22.19	22.40	24.94	25.21	25.55
Eau	14.87	19.56	20.03	20.19	22.41	24.19	24.63

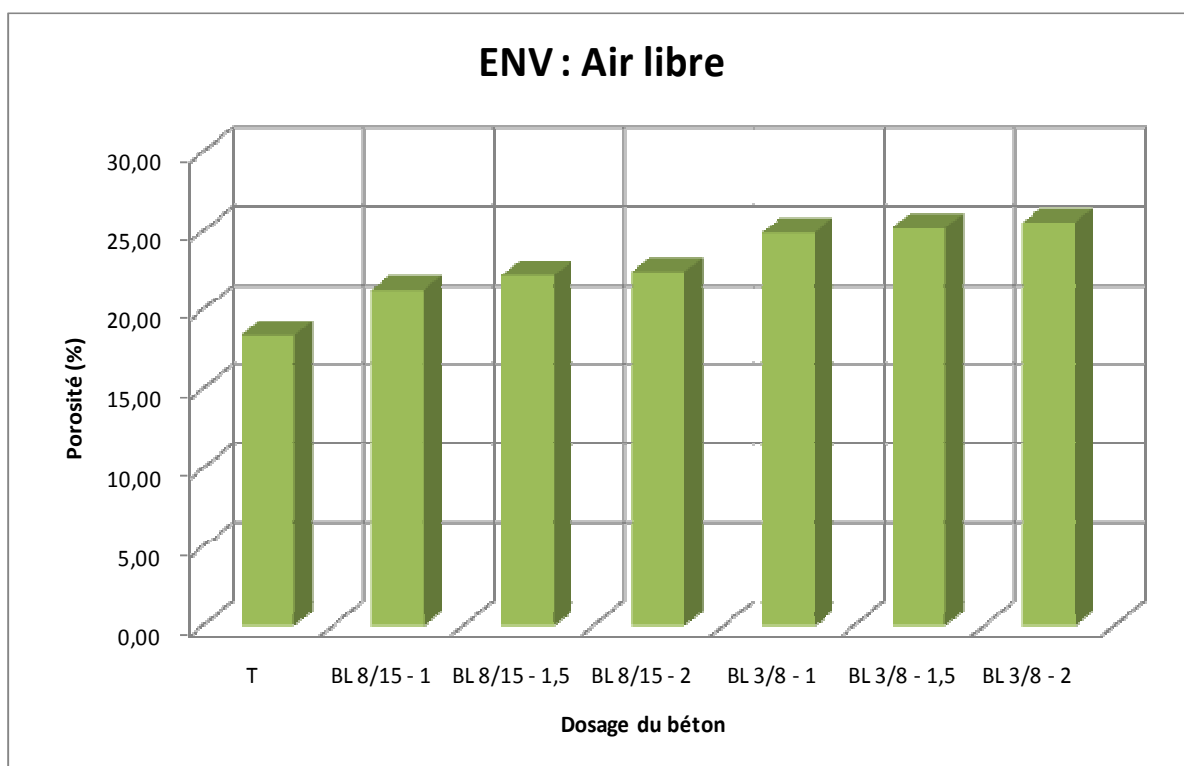


Figure III-32: Absorption d'eau par immersion (Environnement : Air libre)

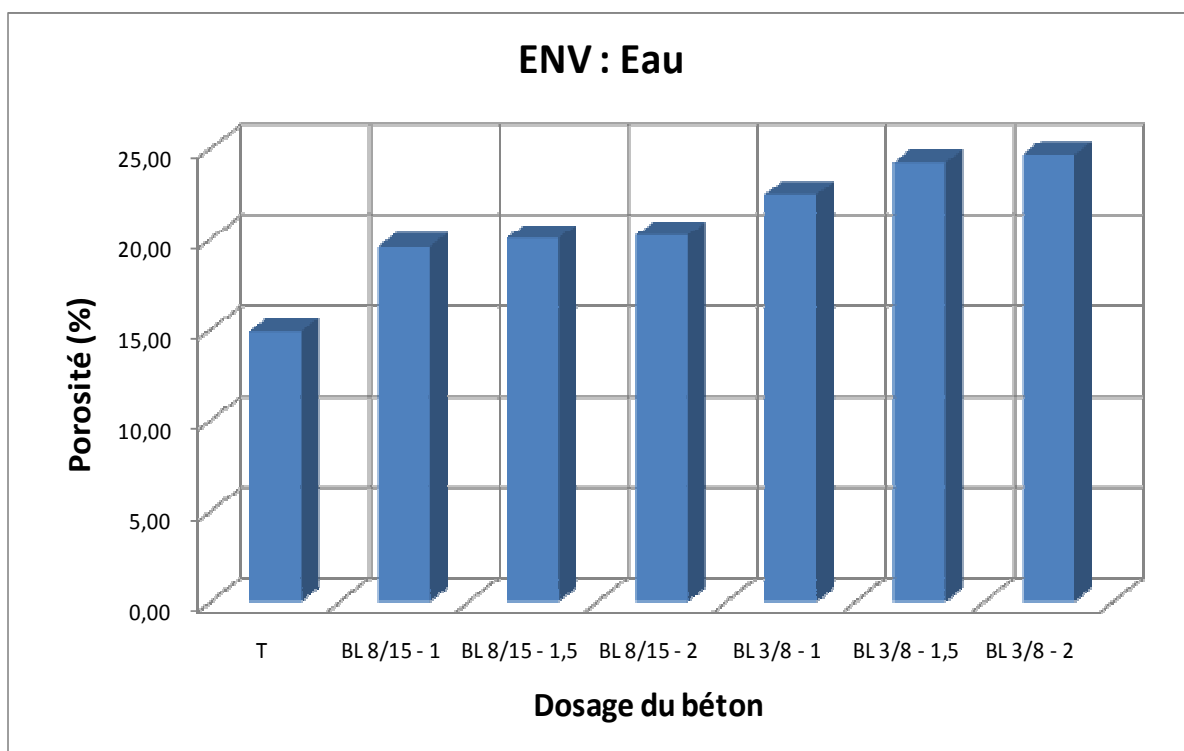


Figure III-33: Absorption d'eau par immersion (Environnement :Eau)

D'après les résultats obtenus on constate que l'augmentation du dosage des granulats du liège expansé, est proportionnelle à la porosité des bétons élaborés car les compositions poreuses absorbent une quantité d'eau plus élevée. Les compositions plus compactes, moins poreuses sont plus étanches à l'eau.

La porosité du béton à base de granulats du liège expansé 8/15 est faible par rapport à celle du béton à base des granulats du liège expansé 3/8 .

La cure des différents bétons diminue la porosité de ces dernières.

III.4.5. Aspect interne des bétons légers

Afin de connaître la répartition de granulats dans le béton, des coupes d'échantillon de différents dosages pour les deux types de bétons, ont été photographiées et représentées dans la figure III-34 pour le béton allégé avec le liège expansé 8/15. Et dans la figure III-35 pour le béton allégé avec le liège expansé 3/8.



Figure III-34: Photos de coupes d'échantillons de BL 8/15



Figure III-35: Photos de coupes d'échantillons de BL 3/8

D'après les photos de coupes d'échantillons des bétons de granulats de liège expansé 3/8 et 8/15, on observe une distribution homogène des granulats dans la matrice. Cette homogénéité est plus remarquable pour les bétons de pourcentages en granulats plus élevé.

III.4.6. Caractéristiques thermiques

la conductivité thermique est une caractéristique la plus importante des bétons légers allégés par des granulats de liège expansé. les compositions étudiés sont destinés à être utilisés comme des matériaux de construction isolant-porteurs, dont la tenue mécanique est assurée par la matrice constituée de bétons de sable calcaire et l'isolation par la faible conductivité thermique des granulats de liège expansé.

L'essai thermique a été réalisé sur des éprouvettes $(4 \times 4 \times 10) \text{ cm}^3$ qui sont les résultats de sciage des éprouvettes $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ pour les différents bétons étudiés dans l'état sec et l'état saturé.

Les résultats de la mesure de la conductivité thermique (λ) des bétons calcaires légers BL 3/8 et BL 8/15 sont représentés dans les tableaux et les figures ci-dessous.

Tableau III-13: Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 3/8.

Dosage en liège (Vg/Vs)	Etat sec		Etat saturé	
	Masse volumique (kg/m^3)	λ (W/m.k)	Masse volumique (kg/m^3)	λ (W/m.k)
2	980	0.35	966	1.10
1,5	1124	0.67	1109	1.25
1	1287	0.74	1282	1.46
0	1949	1.44	1973	2.52

Tableau III-14: Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 8/15.

Dosage en liège (Vg/Vs)	Etat sec		Etat saturé	
	Masse volumique (kg/m^3)	λ (W/m.k)	Masse volumique (kg/m^3)	λ (W/m.k)
2	1027	0.45	1012	1.03
1,5	1178	0.70	1159	1.11
1	1308	0.80	1318	1.34
0	1949	1.44	1973	2.52

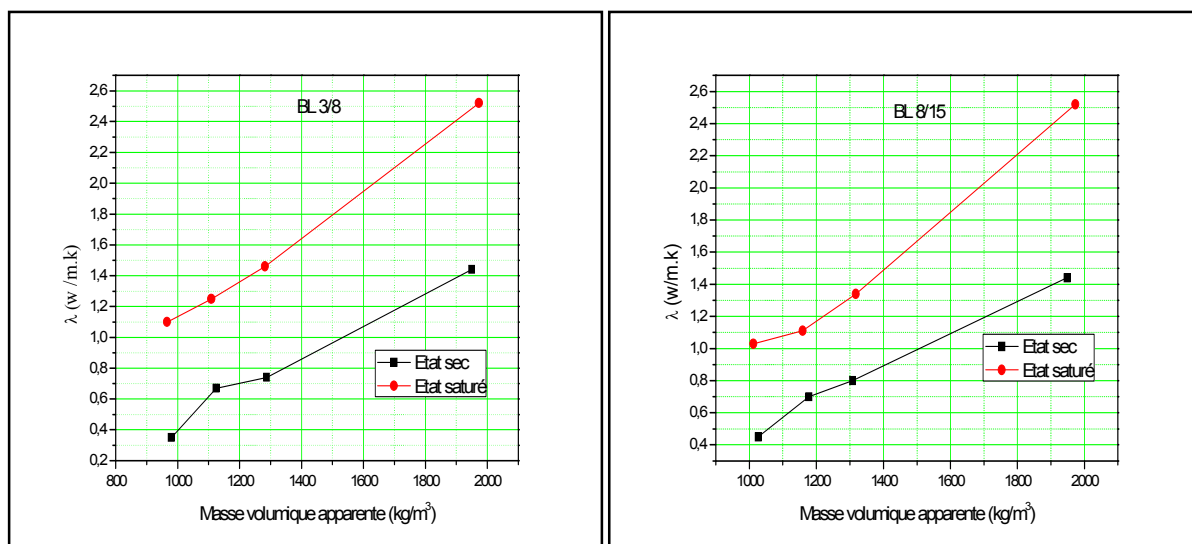


Figure III-36: Variation de la conductivité thermique du BL 3/8 et 8/15 en fonction de la masse volumique apparente.

D'après les graphes et le tableau ci-dessus (figure III.36, tableau III.14). On remarque que la conductivité thermique du BL 3/8 et du BL 8/15 augmente légèrement avec l'augmentation de la masse volumique apparente jusqu'à un dosage de premier allègement $V_g/V_s=1$ qui présente les conductivités thermiques de 0.74 et 0.80 W/m.k, pour le BL 3/8-1 et le BL 8/15-1 respectivement et cela à l'état sec et de 1.46 et 1.34 W/m.k à l'état saturé.

Au delà de ce dosage on remarque une augmentation sensible de la conductivité thermique de béton témoin.

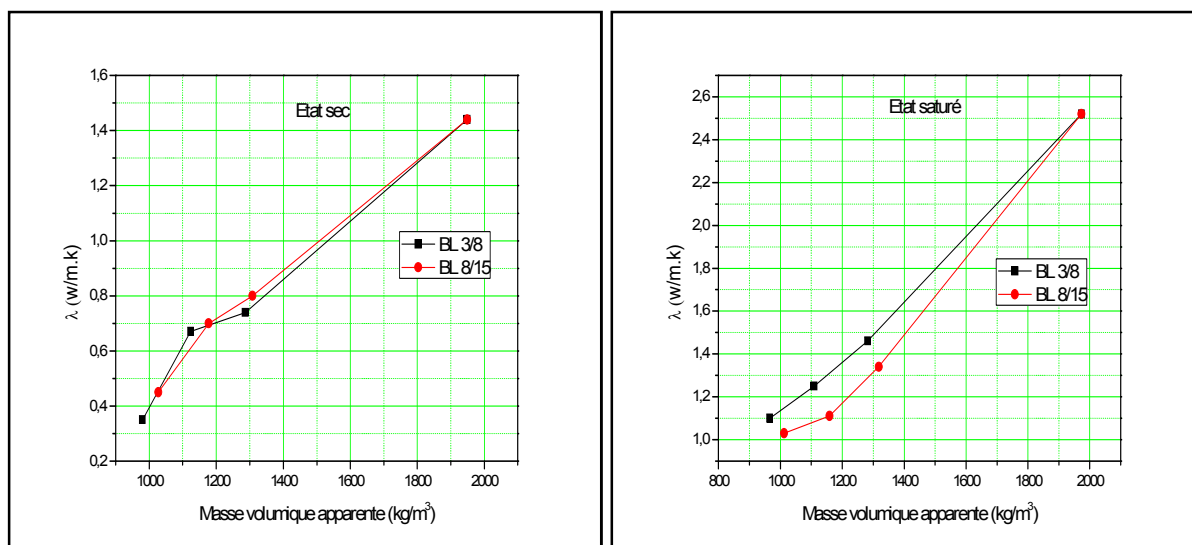


Figure III-37: Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente à l'état sec et saturé.

On observe que l'humidité a une influence notable sur la conductivité thermique des matériaux étudiés : plus le matériau est humide, plus son pouvoir d'isolation est faible. (figure III.36). Les valeurs de la conductivité thermique du BL 8/15 sont supérieures à celle du BL 3/8 à l'état sec, mais à l'état saturé c'est le contraire, en raison du pouvoir d'absorption d'eau des granulats de liège 3/8 qui augmente leurs conductivités thermiques. (Figure III.37).

Les figures III.38 et III.39 montrent l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la porosité des BL 3/8 et BL 8/15 en deux états sec et saturé.

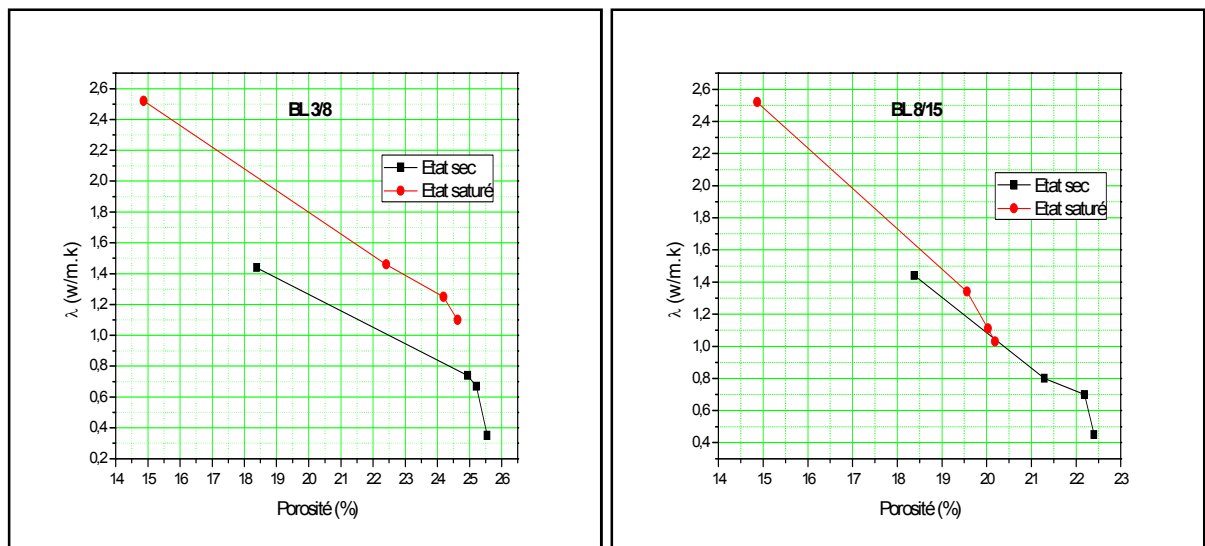


Figure III-38: Variation de la conductivité thermique du BL 3/8 et BL 8/15 en fonction de la porosité.

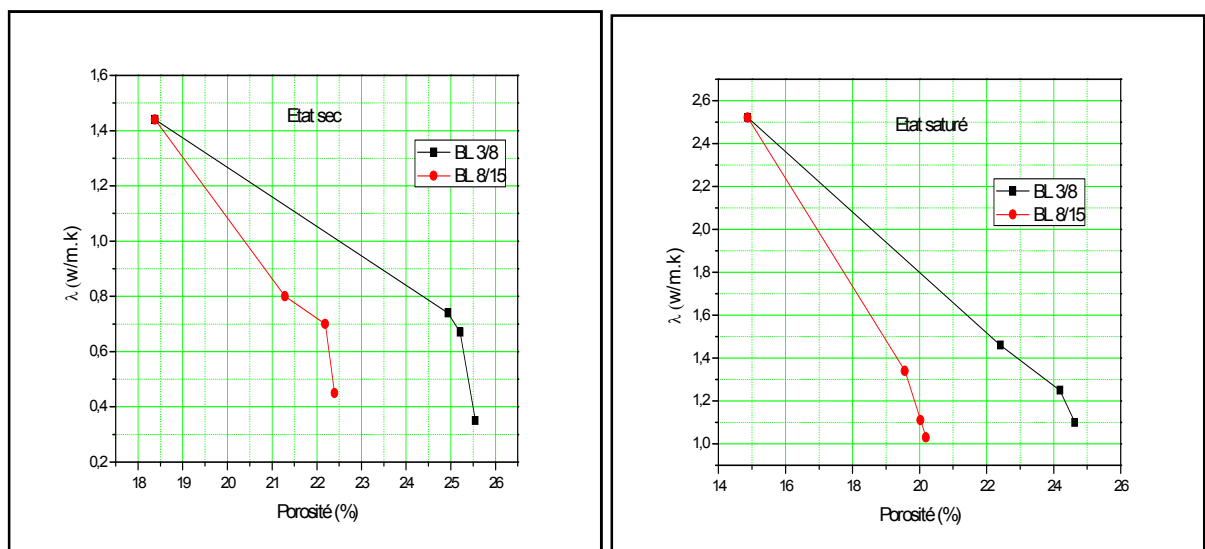


Figure III-39: Variation de la conductivité thermique en fonction de la porosité à l'état sec et saturé.

On voit clairement que l'augmentation de concentration du liège dans le béton engendre dans le matériau une porosité plus importante en conséquent la diminution de la conductivité thermique. (Figures III.38 et III.39).

D'après les résultats obtenus on remarque que :

- L'utilisation de sable calcaire pour l'élaboration du béton de conductivité thermique ($\lambda = 1.44 \text{ W/m.k}$) améliore leur isolation thermique de 18 % par rapport au béton plein ($\lambda = 1.75 \text{ W/m.k}$).
- La conductivité thermique du béton élaboré est proportionnelle avec la masse volumique apparente et inversement proportionnelle avec la porosité.
- L'humidité a un effet important sur le transfert de la chaleur dans les matériaux étudiés, elle augmente la conductivité thermique.
- Les bétons BL 3/8 ont des conductivités thermiques faible que les bétons BL 8/15 et cela dans l'état sec c'est-à-dire sont les plus isolants. Au contraire, dans l'état saturé, les bétons BL 8/15 sont les plus isolants.
- Pour le béton BL 8/15 et BL 3/8 la conductivité thermique pour le dosage maximum en granulats est 0.45 et 0.35 W/m.k respectivement qui représente le 1/3 et 1/4 de celle du béton témoin. Celle d'un béton ordinaire est d'environ 1.44 W/m.k, donc l'allègement du liège permet de diminuer de presque 69 % et 75 % la conductivité thermique par rapport un béton normal.
- Le BL 3/8 avec un rapport $V_g/V_s = 2$ a une conductivité thermique comparable à celle du plâtre.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à présenter et interpréter les résultats des essais physico-mécaniques et thermiques des bétons de liège élaborés, ainsi que les variations dimensionnelles de ces derniers.

L'étude de l'allègement du béton calcaire par les granulats de liège expansé a montré que :

- Les gammes de masse volumique dans lesquelles varient ces bétons de liège sont **1308 à 1027 kg/m³** pour le BL 8/15 et de **1287 à 980 kg/m³** pour le BL 3/8.
- La résistance à la compression et à la traction diminue avec l'ajout de liège :

$$6.72 > R_c (\text{BL } 8/15) > 3.85 \text{ MPa}, 6.05 > R_c (\text{BL } 3/8) > 2.37 \text{ MPa}.$$

$$2.36 > Tr (\text{BL } 8/15) > 1.44 \text{ MPa}, 2.25 > Tr (\text{BL } 3/8) > 1 \text{ MPa}.$$

- Le retrait de différentes compositions est inférieur à celui du béton témoin. Car la décompression des granulats de liège (le retour à leur état initial après compression) diminue le retrait du béton.
- L'étude de la porosité a montré que l'ajout des granulats de liège diminue la porosité des bétons de sable calcaire. Le **BL 3/8** est plus poreuse que le **BL 8/15** selon nos résultats.
- L'essai de capillarité a montré que la sorptivité augmente aussi avec l'augmentation du dosage de liège expansé.
- La conductivité thermique la plus faible est de **0,35 W.m⁻¹.K⁻¹** Pour le dosage maximum en liège a été obtenu avec le **BL 3/8**. Pour le **BL 8/15**, elle est de **0,45 W.m⁻¹.K⁻¹**. Celle d'un béton témoin est d'environ **1.44 W/m.k**, donc l'allègement du liège permet d'améliorer de **69 %** et **75 %** le pouvoir isolant par rapport un béton normal.

Conclusion générale et recommandations

L'objectif de ce travail consiste à étudier le comportement physico mécanique et thermique des bétons légers confectionnés à partir de sable de concassage et allégés avec les granulats de liège expansé.

L'allègement a pour but de procurer un matériau de masse volumique et de conductivité thermique plus faibles et aussi de résistance mécanique suffisante.

Parmi les ressources prélevées en masse, on connaît moins l'épuisement des gisements de sable, qui devient difficile à trouver pour faire du béton. Ce qui amène de plus en plus à la prescription de bétons comprenant de sable résultant des opérations de concassage.

Dans un intérêt économique et environnemental, on essaye de valoriser les sous-produits de transformation du liège, fortement produit en Algérie, car il est le troisième producteur mondial.

En vue de la valorisation des déchets des carrières de concassage et les déchets issus de la fabrication des panneaux de liège expansé, en incorporant ces matériaux locaux à la matrice cimentaire pour obtenir un composite thermiquement isolant. Cette démarche contribue à l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments et apporte ainsi une alternative intéressante sur le plan économique et environnemental.

Une synthèse bibliographique a été réalisée sur la possibilité de l'utilisation de sable calcaire dans la confection du béton et l'influence d'introduction les granulats du liège (cru et expansé) sur les caractéristiques mécaniques et thermiques du béton. Il ressort que qu'il est possible de fabriquer un bon béton en utilisant un sable concassé contenant jusqu'à 15% de fines sans affecter ses performances mécaniques. Le liège est la matière naturelle qui détient les meilleures propriétés d'isolation et correspond tout à fait à notre objectif.

Pour étudier l'effet de la taille des granulats de liège expansé sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons, deux classes granulaires sont employées granulats 3/8 et 8/15.

L'examen des différents résultats obtenus lors de la réalisation de ce travail a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La masse volumique apparente des compositions diminue avec l'augmentation de la quantité des granulats de liège expansé. On trouve que:

$$1308 > \rho_{app} (BL\ 8/15) > 1027\ \text{kg/m}^3 \text{ et } : 1287 > \rho_{app} (BL\ 3/8) > 980\ \text{kg/m}^3.$$

- Par sa compacité importante le béton allégé avec les granulats de liège expansé 3/8 est le plus léger.
- L'augmentation du pourcentage de liège est inversement proportionnelle aux résistances mécaniques (compression et traction). On trouve que :
A la compression : **6.72** > Rc (BL 8/15) > **3.85 MPa**, **6.05** > Rc (BL 3/8) > **2.37 MPa**.
A la traction : **2.36** > Tr (BL 8/15) > **1.44 MPa** , **2.25** > Tr (BL 3/8) > **1 MPa**.
- Le béton léger à base de granulats de liège expansé 8/15 est plus résistant que ce à base de granulats 3/8.
- Le béton de sable calcaire permet de réduire la conductivité thermique à **18 %** par rapport au béton plein ($\lambda = 1.75 \text{ W/m.k}$).
- L'allègement du béton calcaire par l'ajout de liège expansé diminue considérablement la conductivité thermique c'est-à-dire améliore l'isolation thermique.
- Pour le béton **BL 8/15** et **BL 3/8** la conductivité thermique pour le dosage maximum en granulats est **0.45** et **0.35 W/m.k** respectivement qui représente le **1/3** et **1/4** de celle du béton témoin. Celle d'un béton ordinaire est d'environ **1.44 W/m.k**, donc l'allègement du liège permet de diminuer de presque **69 %** et **75 %** la conductivité thermique par rapport un béton normal.
- Le BL 3/8 avec un rapport $V_g/V_s = 2$ a une conductivité thermique comparable à celle du plâtre.
- La conductivité thermique du béton élaboré est proportionnelle avec la masse volumique apparente et inversement proportionnelle avec la porosité.
- A l'état sec, les bétons allégé avec les granulats de liège expansé 3/8 sont les plus isolants et à l'état saturé c'est le contraire.
- Le retrait semble être inversement proportionnel avec l'ajout de liège et cela probablement due au pouvoir des granulats d'absorber l'humidité de l'environnement.
- Le gonflement de BL 3/8 est plus important que BL 8/15. Ceci due en raison de l'aptitude hygroscopique des granulats de liège expansé 3/8.
- L'absorption d'eau par immersion est très élevée pour les compositions élaborées. Elle est d'environ de **24.63 %** pour BL 3/8-2 et **20.19 %** pour BL 8/15-2.

Pour des études ultérieures, nous recommandons de réaliser d'autres travaux de recherche sur :

- Amélioration de la résistance des bétons légers à base de granulats de liège par l'utilisation des adjuvants.
- Utilisation des granulats de liège naturel mais avec traitements par le ciment et la chaux et à différents milieux.
- Renforcer le béton léger allégé avec le liège par l'ajout de fibres synthétiques et l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance afin de l'utiliser comme un béton de structure.
- Utilisation un autre liant comme le plâtre.
- Réalisation des essais de la durabilité du matériau composite.

Références bibliographiques

- [1] **Norme française, NF EN 206-1** : BETON, Partie 1: Spécification, performances, production et conformité.
- [2] **Ziregue Ahmed**, « Valorisation de coproduits industriels : influence de différents facteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment », **Magister,2005**, Université Amar Telidji, Laghouat.
- [3] **Dreux.G et Festa.J** « Nouveau guide du béton et ses constitutions » huitième édition, Paris,1998 troisième tirage 2007.pp-131-132-162-332 à 346-364.
- [4] **Document technique réglementaire , (D.T.R C 3-2), Alger 1997**
- [5] **NF EN 13055-1** ;Granulats légers, Partiel: Granulats légers pour bétons et mortiers,2002.
- [6] **M.Arnoud, M.Virlogeux**, Granulats et bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986.
- [7] **A.Ledhem**, « Construction à l'étude d'un béton de bois, mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois », Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, 1997.
- [8] **A.Ferhat**, « Caractérisation physicomécanique à court terme d'un béton léger élaboré à partir d'agrégat pouzzolanique », Mémoire de Magister de l'université d'oran, P174, 2002.
- [9] **M. Shink**, « Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des Bétons de granulats légers », Thèse de doctorat de l'université de Laval Avril 2003.
- [10] **Adam.M.Neville**, propriétés des bétons, traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris, 2000.p 470
- [11] **Béton armé : Règles BAEL, Bétons de granulats légers artificiels, par Jean PERCHAT.**
- [12] **J.Yamasaki,S.Nimura, I.Naka.Jima**, developpment of special light weight concrete.
- [13] **AZIZ,M.A., MURPHY, C.K. and RAMASWAMY , S.D.**, « Lightweight concrete using cork granules.». International Journal of Lightweight Concrete , I(1), 1979, pp 29-33
- [14] **Fernando G. Branco, António Tadeu, Maria de Lurdes Belgas C. Reis** « Can cork be used as a concrete aggregate? ».International Journal for Housing Sciences, Vol. 31, N.1, 2007, pp.1-11.
- [15] **HERNANDEZ-OLIVARES,F.BOLLATI,M.R,DEL RIO, M.and PERGA-LANDA B.**, « Development cork-gypsum composites for building applications, Construction & Building Materials »,13,1999, pp 179-186.
- [16] **F. G. Branco, A. Tadeu, Maria de Lurdes Belgas C. Reis**, «Experimental evaluation of the durability of cork concrete.»

- [17] **MERABTI Salem**, 'Matériaux composites isolants à base des déchets de liège', Mémoire de Magister 2005 , université de Blida.
- [18] **A. EL BAKKOURI, H. EZBAKHE, T. AJZOUL, A. EL BOUARDI**, « Etude thermomécanique du béton allégé avec du liège et du béton allégé avec des grignons d'olive ». 12èmes Journées Internationales de Thermique, pp 307-310,Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [19] **S R Karade, F Caldiera , M Irle, K Maher (2002)**, « Cork granules as lightweight aggregate ». Sustainable concrete construction: proceedings of the international conference. University of Dundee, Scotland, UK, September 2002. Edited by : Ravindra K Dhir,Thomas D Dyer,Judith E Halliday.Printed par Thomas Telford.pp 253-262.
- [20] **R. Eires, A. Camões & S. Jalali**, « Eco-friendly construction materials using gypsum and industrial wastes.». Rotterdam, Netherlands.2008
- [21] **S. Kenai, A. Attar, B. Menadi** "Cement Industry and Concrete Technology in Algeria: Current Practices and Future Challenges" . International Conference on Durability of Building Materials and Components .ISTANBUL - TURKEY] May 11-14th , 2008.
- [22] **Omar MEZIDI** , « Etude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifiés à la poudrette de caoutchouc. ». Magister ENP, 2008. p 21-22-24.
- [23] **Habbouche, A.**, « Propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage » Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, 2002.
- [24] **SKENDER Zakaria**, « Durabilité du béton à base de sable de concassage », Mémoire de magister, ENP 2009.
- [25] **BOUZOUALEGH Malik**, « Élaboration et caractérisation d'un béton à base de sable de concassage ». Mémoire de magister, ENP 2009.
- [26] **Chanvillard, G., et Basuyaux, O.**, « Une méthode de formulation des bétons de sable et résistance fixées ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. Vol 205.49-63,1996.
- [27] **Benna, Y.**, « Valorisation des sables de concassage », colloque Maghrébin de génie civil, Centre Universitaire de Biskra, novembre1999.
- [28] **F.Sadhouari , N. Goufi , A.Guezzouli** « valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons » 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran(Algeria) -October 12-14, 2009

- [29] **Ramirez, J.L., Barcena, J.M., Urreta, J. I.**, « Sables calcaires à fines calcaires et argileuses: influence et nocivité dans les mortiers de ciment » *Matériaux et construction*, 1987, 20, pp 202-213
- [30] **Kenai, S, Benna, y, et Mennadi, B.**, « The effect of stone in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete» *International conference on infrastructure regeneration and rehabilitation*, Sheffield, Editor R.N Swamy, 1999, pp 253-261
- [31] **Bonavetti, V. L., et Irassar, E.**, « The effect of stone dust content in sand » *Cement and concrete Research*, Vol 24, N°3, 1994, pp580-590.
- [32] **Ramirez, J.L., Barcena, J.M., Urreta, J.I.**, « Proposal for limitation and control of fines calcareous sand based upon their influence in some concrete proprieties » *Matériaux et structures*, Vol23. 1990, pp 279-287.
- [33] **R. Eires, J. P. Nunes, R. Fangueiro, S. Jalali, A. Camões**, « new eco-friendly hybrid composite materials for civil construction. ».
- [34] **KAROUNE Samira**, « Effets des boues résiduelles sur le développement des semis du chêne liège (*Quercus suber* L.) ». Mémoire de Magistère En Ecologie Végétale Année : 2007-2008. Université Mentouri. Constantine.
- [35] **Ana Vaz-sá et al** «Why insulate? The arguments for sustainability. »CIB World building Congress 2007,
- [36] **António Pedro O, Carvalho**, «ACOUSTICAL BEHAVIOR OF A NEW LIGHTWEIGHT PARTITION MADE WITH GYPSUM BOARD AND CORK. » Presented at the 130th meeting of the Acoustical Society of America, St. Louis MO, Nov. 1995.
- [37]**Simon AMBOISE , Aurélie PEYRICHOU**, « Concours génération développement durable. Comment économiser l'énergie à la maison ? Technique d'isolation par liège et tapisserie. » Mars 2007.
- [38] <http://www.institutduliege.com>
- [39] **Luís Gil**, « Cork as a building material.Technical Manual.» Edition, APCOR – Portuguese Cork Association. www.realcork.org
- [40] **Le Chêne liège par Josiane Ubaud**, (S.H.H.N.H.)La Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault on (<http://www.shhnh.com>).
- [41] Documents de l'usine de la fabrication de Liège Aggloméré Noir Expansé Pur et Bandes d'étanchéité, Jijel.
- [42] **ALIECOR**, « Granules liège noir expansé pur ». Fiche Technique 03/2011

[43] **Salif CAYE**, « Caractérisation des propriétés mécaniques, acoustiques et thermiques de matériaux locaux de construction au Sénégal ». Thèse de doctorat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Mars 2001.

[44] **M.Rabehi**, « Contribution à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage : Relation entre la résistance à la compression, la profondeur de carbonatation et l'absorption initiale des bétons. » Mémoire de Magister 2005.UAT, Laghouat.

[45] **AGEDEN** - Energies Renouvelables en Isère « Propriétés et performances thermiques des matériaux », Avril 2008. on <http://www.ageden.org>

[46] http://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivit%C3%A9_thermique

[47] **Peter Domone and ,John Illston** « Construction Materials, Their nature and Behaviour ». Fourth edition, pp 51

[48] **A. Degiovanni** , « Conductivité et diffusivité thermique des solides » Techniques de l'ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, Fiche n° R 2 850

[49] **Ahmed Salim BRAHIM DJELLOUL**, « Radiométrie photothermique sous excitation aléatoire : application a la mesure de propriétés thermophysiques ». THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE REIMS.2008, pp 14-23

[50] **Pierre MEUKAM**, « valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments » Docteur 3° Cycle,2004 l'Université de Yaoundé I, Doctorat/ph.D . pp32-33-34.

[51] **Yves JANNOT** , Séminaire PER AUF « Métrologie thermique », LEA Dakar, 12-18/11/08.pp 31-34

[52] **Arnaud RIGACCI** ; « La mesure de conductivité thermique à travers l'exemple des super-isolants de type aérogels », Ecole des Mines de Paris p4.

[53] Document, Ministère de l'Energie et des Mines, 'Bilan Energétique National de l'Année 2009', Edition 2010.

[54] <http://www.lepetitliege.be/fr/isoler.html>

[55] <http://www.economiedenergie.fr/majic/pageServer/070300002y/fr/Isolants-thermiques-et-phoniques-ecologiques.html>.

[56] **NORME AFNOR**

- **NF P.18-400**- Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, Décembre 81

- **NF P 18-451**, Essai d'affaissement. Décembre 81.

- **NF P 18- 560, (Sept. 1990)** : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage

- **NF P 18-555 (decembre1990)** :mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau
- **NF P 18 -598, (Oct. 1991)** : Granulats – Equivalent de sable.
- **NF B 57-013** : « Liège – Granulés cru de liège – Détermination de l'humidité ».Paris 1973.
- **NF P 18 -303** Norme française de l'eau de gâchage pour béton.
- **NF P 18 – 305**, Béton prêt à l'emploi. Décembre 94
- **NF EN 12390-7**, Essai pour béton durci Partie7: Masse volumique du béton. Septembre 2001
- **NF EN 12390-5**, Essai pour béton durci Partie5: Résistance à la flexion sur éprouvettes Octobre 2001.
- **NF EN 12390-3** Février 2003. Essai pour béton durci, Partie3: Résistance à la compression des éprouvettes
- **NF P 15-433** Méthodes d'essais des ciments, détermination du retrait et du gonflement. février 1994.
- **NF P 10-502** , « Béton -capillaire », Paris 1989.
- [57] **EN 196-6** , Méthodes d'essais des ciments-partie 6 détermination de la finesse.
- [58] **EN 196-3**, Méthodes d'essais des ciments-partie 3 prise du ciment.
- [59] **Fiche “Béton – Mortier – Granulats” NBN EN 12350-6** Essais Pour Béton Frais Partie 6: Masse Volumique
- [60] **EN 1008** : Norme européenne de l'eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.
- [61] **NA 442** : Norme Algérienne, CIMENT, Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- [62] **LAFARGE, Fiche technique du ciment**
- [63] **R.dupain, R.Lanchon, J.C.Saint Arroman**, Granulats, sols, ciments et bétons, édition Casteilla, Paris, 1995
- [64] **N.E.Kedjour**, propriétés et pathologie du béton, réimpression 1993
- [65] **M.Bederina** , « Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables a base de déchets de bois ». Thèse de doctorat, ENP 2007.
- [66] **Gotteicha Messaouda**, « Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités », Mémoire de Magister 2005 ,U.A.T Laghouat.