



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par

BEN ACHOUR Mebarka et MOUSLI Khiera

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux de génie civil

Thème

Valorisation des résidus cellulosiques
(liège)

Pour le développement D'un béton léger
thermiquement performants

Soutenu le 18/09/2018

Devant le jury :

Mr. MARAH Ahmed
Mme .DAMENE Zineb
Mr. ZIREGUE Ahmed

M.C.A. U. Laghouat
M.C.B. U. Laghouat
M.C.B. U. Laghouat

Président
Examineur
Encadreur





Dédicace

Je dédie ce travail,

*À ma famille : ma mère et mon père
frères et mes sœurs*

*À mes amis et à tous ceux que j'aime
et qui m'aiment.*

Ben Achour Mebarka



Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre dieu qui a bien voulu nous donner la force pour effectuer le présent travail.

Nos gratitudee sont grandes, envers notre encadreur Mr **Ahmed. Ziregue**, pour avoir accepté de diriger ce travail malgré ses innombrables tâches. Nous tenons à le remercier vivement pour ses précieux conseils et ses critiques constructives qui ont orienté ce modeste travail jusqu'à son aboutissement.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui ont consacré un peu de leur temps pour examiner et évaluer notre travail.

Nous désirons exprimer nos remerciements au corps enseignant du département Génie civil et à l'ensemble de l'équipe du laboratoire ainsi qu'à nos collègues qui nous ont apporté leur soutien et leur aide.

Enfin, nous savons combien la présence de nos famille à nos cotés a été importante pour surmonter les moments difficiles, c'est à eux que nous dédions particulièrement ce mémoire.

Ben Achour Mebarka

Et

mousli kheira

ملخص

هذا العمل هو جزء من مجال بحث واسع يتمثل في ترمين واستغلال المواد المحلية وكذا النفايات الصناعية في تطوير مواد بناء خاصة من أجل تخفيض الاستهلاك المفرط للطاقة في مجال البناء و كذلك من أجل حل المشاكل البيئية المتعلقة باسترجاع النفايات الصناعية و المنزلية. هذا البحث يهدف إلى دراسة إمكانية استعمال خرسانة خفيفة من الرمل عن طريق إضافة حبيبات الفلين ودراسة تأثير إضافة هذه الحبيبات على الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية و الحرارية للمركبات التي تم الحصول عليها.

في هذا العمل قمنا بدراسة خصائص نوعين من الرمل (رمال كلسية و الرمال الغرينية) ، والتي توجد بكميات كبيرة في منطقة الأغواط ، والنفايات المعاد استخدامها عبارة عن حبيبات الفلين . حيث تم إدخال هذه الإضافات بنسب مختلفة: 20 % ، 30 %، 40 %، 50 % ، 60 % بالنسبة للحجم الإجمالي للمؤونة.

النتائج المتحصل عليها بينت انه كلما زادت كميات حبيبات الفلين كلما انخفضت الكتلة الحجمية و التوصيل الحراري و ازداد العزل الحراري لكنه يؤدي إلى خفض كبير في المقاومة الميكانيكية للخرسانة و لهذا من اجل تحسين هذه المقاومة قمنا بإضافة نسبة 10 % من فحم السليس حيث بينت النتائج انه يحسن نسبيا في السلوك الميكانيكي للخرسانة .

كما بينت النتائج انه من اجل عزل حراري جيد و مقاومة أحسن يفضل استعمال الرمال الغرينية في خرسانة الفلين عوض الرمال الكلسية .

الكلمات المفتاحية: استعادة النفايات ، الخرسانة خفيفة الوزن ، خرسانة الفلين ، حبيبات الفلين ، الفلين الموسع ، الرمال الكلسية ، الرمل الغريني ، العزل الحراري.

Résumé

Cette étude fait partie d'une thématique de recherche principale axée sur la valorisation et l'exploitation des ressources locales ainsi que certains résidus industriels solides pour la mise au point de matériaux de construction spécial ; afin de réduire la consommation d'énergie excessive dans la construction. Ainsi que de résoudre les problèmes environnementaux liés à la récupération des déchets industriels et domestiques.

Cette recherche vise à étudier la possibilité d'utiliser du béton léger de sable en ajoutant des granules de liège et en étudiant l'effet de l'ajout de ces granulats sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composants obtenus.

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement de deux types de sable (sable calcaire et sable alluvionnaire), qui se trouvent en grande quantité dans la région de Laghouat, et les déchets de réutilisation sont des granulats de liège. Ces granulats ont été introduits en différents pourcentages: 20%, 30%, 40%, 50%, et 60% par rapport au volume total de la matrice.

Les résultats obtenus montrent que plus la quantité de granules de liège est élevée, plus la masse volumique et la conductivité thermique sont faibles, plus l'isolation thermique est élevée. Mais cela conduit à une réduction significative de la résistance mécanique du béton. Afin d'améliorer cette résistance, nous avons ajouté 10% de la fumée de silice car les résultats ont montré qu'il améliore relativement le comportement mécanique du béton.

Les résultats ont également montré que pour une meilleure isolation thermique et une meilleure résistance, les sables alluvionnaires devraient être utilisés dans le béton de liège au lieu de sable de calcaire.

Mots clés : valorisation des déchets, béton léger, béton de granulat légers, bétons de liège , grains de liège, liège expansé, sable calcaire, sable alluvionnaire , isolation thermique .

Abstract

This study is part of a main research theme focused on the valorization and exploitation of local resources as well as some solid industrial residues for the development of special building materials. In order to reduce excessive energy consumption in the construction as well as solving environmental problems related to the recovery of industrial and domestic waste.

This research aims study the possibility of using lightweight sand concrete by adding cork granules and studying the effect of the addition of these aggregates on the physico-mechanical and thermal properties of the compounds obtained.

In this work, we studied the behavior of two types of sand (calcareous sands and alluvial sands), which are found in large quantities in the Laghouat region, and the reuse waste is cork aggregates. These additives were introduced in different percentages: 20%, 30%, 40%, 50%, and 60% for the total volume of the components.

The results obtained show that the higher the quantity of cork granules, the lower the density and the thermal conductivity, the higher the thermal insulation. this leads to a significant reduction in the mechanical strength of the concrete. In order to improve this resistance, we added 10% of the silica fume as the results showed that it is relatively improved in the mechanical behavior of the concrete.

The results also showed that for better thermal insulation and better resistance, alluvial sands should be used in cork concrete instead of limestone sand.

Key words: waste recovery, lightweight concrete, light aggregate concrete, cork concrete, cork grain, expanded cork, calcareous sand, alluvial sand, thermal insulation.

Table des matières

Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Notations employés	
Annexes	
Introduction générale	01
CHAPITRE I : GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1 Introduction	03
I.2. La valorisation de résidus	04
I.2.1 Stratégies de traitement des déchets	05
I.2.2 Définitions	06
I.2.3 Pourquoi Valoriser ?	06
I.2.4 Intérêt du recyclage dans le génie civil	07
I.3. Béton léger	08
I.3.1. Classification des bétons légers	08
I.3.2. Propriétés des bétons légers	10
I.3.2. 1. Porosités	10
I.3.2. 2. Légèreté	11
I.3.2.3 Absorption d'eau et sensibilité à l'humidité	12
I.3.2.4. Comportement et performances mécaniques	13
I.3.2. 5. Durabilité des bétons légers	15
I.3.2.6. Autres propriétés du béton léger	16
I.3. 3. Formulation de béton léger	17
I.4. Utilisation d'ajout cimentaire dans la composition du béton léger	18
I.5. Les Adjuvants :	19
I.6. Béton des granulats légers	20
I.6. 1. Définition d'un granulat léger	20
I.6. 2. Différents types de granulats légers	21
I.6.3 Classification des granulats légers	21
I.6.4. Les avantages de l'utilisation du béton de granulats légers	25
I.7. Béton de liège	26
I.7.1. Caractérisations du liège	27
I.7.2. Différentes utilisations du granulat de liège	28
I.7.3. Structure et composition	28
I.7.4. Préparation du liège	30
I.7.5. Propriétés du liège	30
I.7.6. Caractéristiques physico-mécaniques et thermique des bétons de liège	31
I.7.6.1. Comportement mécanique	32
I.7.6.2. Comportement thermique	32
I.8. Nécessité de l'isolation thermique	33
I.8.1. Zones "sensibles" d'une habitation – Les Ponts Thermiques	33
I.9. Conclusion	36
CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTABLES	
II.1 Introduction	37
II.2 Matériaux Utilisent	37
II.2.1 Sable	37

II.2.1.2 Caractéristiques physiques des deux sables utilisés	37
II.2.1.2.1. Masse volumique	37
II.2.2.2Analyse granulométrique	39
II.2.2.4 Propreté des sables	42
II.2.2. Ciment	44
II.2.3 Adjuvant	45
II.2.4 Fumée de silice	46
II.2.5. Les grains de liège	47
II.2.5.1Granulométrie	47
II.2.5.2. Masse volumique	48
II.2.5.3. Mesure du coefficient d'absorption	51
II.2.5.4. Cinétique D'Absorption des grains de liège	52
II.2.5.5. Cinétique désorption des grains de liège	53
II.2.6. L'eau de gâchage	53
II.3. Elaboration des différentes formulations	53
II.4. Préparation des matériaux	56
II.5. Techniques expérimentales	57
II.5.1. Essais réalisés sur le béton frais	58
II.5.1.1. Essai d'écoulement	58
II.5.2. Les caractéristiques physico-mécaniques	58
II.5.2.1. Essais de flexion et compression sur éprouvettes 40x40x160 mm	58
II.4.3. Caractérisation hydrique	60
II.5.3.1. Essai de capillarité (Sorptivité)	60
II.5.4. Etude de Retrait	61
II.5.5. Masse volumique apparente	62
II.5. 6. Caractéristiques thermiques	63
II.5.6.1. Technique de la Source Plane TPS	63
II.5.6.1.1. Avantages de la méthode TPS	63
II.6. Conclusion	66

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III. 1 Introduction	67
III. 2 Présentation des résultats	67
III.2.1. Détermination du rapport E/C	67
III.2.2. Détermination du pourcentage de fumée de silice	70
III.2.3. Détermination de la quantité d'eau absorbée	71
III.2.3.1 Cinétique d'adsorption et la désorption de grains de liège	71
III.2.4. Essai d'écoulement	72
III.2.5. La masses volumiques à l'état sec	72
III.2.6. Propriétés mécaniques	73
III.2.7 Etude du retrait	76
III.2.8 L'absorptivité	79
III.2.9. Etude des caractéristiques thermiques	82
III.2.9.1 Conductivité thermique à l'état sec	82
III.2.9.2. Conductivité thermique à l'état saturé	85
III.2.9.3Diffusivité thermique	87
III.2.10. Conclusion	91
Conclusion générale	92

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1. Classification des bétons légers selon la masse volumique	09
Tableau I.2. Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction	10
Tableau I.3 : Caractéristiques habituelles des bétons légers.....	24
Tableau I.4: Densité et conductivité thermique de différents isolants dont le liège.....	33

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTABLES

Tableau. II.1. Masses volumiques apparentes et absolues des sables étudiés.....	39
Tableau. II.2. Analyse granulométrique par tamisage du SC.....	40
Tableau. II.3. Analyse granulométrique par tamisage du sable SA.....	41
Tableau. II.4. Classes de propreté d'après les valeurs de l'équivalent de sable	43
Tableau II.5 : Propriétés physiques des deux types de sables utilisés.....	44
Tableau II.6 : Propriétés physiques du ciment utilisé	45
Tableau II.7 : Analyse chimique du ciment utilisé.....	45
Tableau II.8 : Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé.....	45
Tableau II.9: Composition chimique de la fumée de silice	46
Tableau. II.10. Analyse granulométrique par tamisage des grains de lièges.....	48
Tableau II-11 : Masse volumique de granulat léger et Porosité inter-granulaire.....	51
Tableau II-12 Composition des différents constituants des mortiers préparés.....	55
Tableau II-13 : Composition des mélanges à élaborer sans fumée de silice.	55
Tableau II-14 : Composition des mélanges à élaborer avec fumée de silice.	56

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III.01 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.....	68
Tableau III.02 : Valeurs de la résistance en compression en fonction du rapport E/C.....	68
Tableau III.03 : Coefficient d'absorption d'eau des grains de liège et la teneur en eau massique $H(\%)$	71
Tableau III.04 : Variation de la masse volumique en fonction des pourcentages de résidus de liège.....	73
Tableau III.05 : Les résultats des résistances à la compression des différents bétons.....	74
Tableau III.06 : Les résultats des résistances à la traction par flexion des différents bétons.....	75
Tableau III.07: Les valeurs de la conductivité thermique λ à sec.....	82
Tableau III.08: Les valeurs de la conductivité thermique λ saturé.....	86
Tableau III.09: Les valeurs de la diffusivité thermique α des béton cellulaires élaborés.....	88

ANNEXES

Tableau III.01 : La masse volumique apparente de sable calcaire.
Tableau III.02 : La masse volumique absolue de sable calcaire.
Tableau III.03 : La masse volumique apparente de sable alluvionnaire.
Tableau III.04 : La masse volumique absolue de sable alluvionnaire.
Tableau III.05 : La masse volumique apparente de liège.
Tableau III.06 : La masse volumique absolue de liège.
Tableau III.07 : La masse volumique du béton de liège des quatre compositions en fonction de teneur de liège
Tableau III.08 Evolution du sorptivité en fonction de temps du béton de liège (alluvionnaire).

Tableau III.09 Evolution du sorptivite en fonction de temps du béton de liège (alluvionnaire +fumée de silice).

Tableau III.10 Evolution du sorptivite en fonction de temps du béton de liège (calcaire).

Tableau III.11 Evolution du sorptivite en fonction de temps du béton de liège (calcaire +fumée de silice).

Tableau III.12 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (sable alluvionnaire + liège).

Tableau III.14 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (sable calcaire + liège).

Tableau III.15 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (sable calcaire + liège+fumée de silice).

Tableau III.15 : Les résultats des résistances à la traction par flexion des différents bétons.

Tableau III.16 : Les résultats des résistances à la compression des différents bétons

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Stratégies de traitement des déchets.	05
Figure I.2 : Valorisation des déchets	06
Figure I.3 : Classification des bétons légers.....	08
Figure I.4 : Structures des bétons légers.	09
Figure 1-5 : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores	11
Figure 1.6 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment	14
Figure 1.7 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique	15
Figure I.8 : Relation entre l'épaisseur d'une dalle et sa résistance approximative au feu	16
Figure I.9 : Différents granulats légers naturels	22
Figure I.10 : Différents granulats légers artificiels.....	23
Figure I.11 : Structure et composition de liège.....	28
Figure I.12 : Composition chimique de liège.....	29
Figure 1.13 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la fraction L/B	32
Figure I.14 : Zones "sensibles" d'une habitation.....	34

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTABLES

Figure. II.1. Méthode de mesure de la masse volumique absolue et apparente.....	38
Figure. II.2. Appareil de tamisage et Série de tamis.....	40
Figure. II.3. Les courbes granulométriques des sables étudiés	41
Figure. II.4. Mesure des particules fines.....	42
Figure. II.5 : Superplastifiant « Medaplast SP40 » Fabriqué en Algérie par la société GRANITEX.....	46
Figure. II.6. Les grains de liège.....	47
Figure. II.7 Courbes granulométriques des grains de lièges.....	48
Figure II-8 : Schémas de principe de mesure des masses volumiques réelles.....	50
Figure. II :9 : Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.....	52
Figure. II.10 : Confection des éprouvettes de béton de liège.....	57
Figure. II.11. Maniabilimètre B (180x90x90mm).....	58
Figure II.12. Dispositif de flexion par trois points.....	59
Figure II.13. Ruptures en compression.....	60
Figure II.14. schéma de l'essai de capillarité.....	60
Figure. II.15. Montage expérimentale utilisé dans l'essai d'absorption.....	61
Figure II.16. Appareillage pour la mesure du retrait.....	62
Figure. II.17. Appareil de retrait utilisé.....	62
Figure. II.18. Mesure de propriétés thermique à l'aide du system «Hot Disk».....	64
Figure. II.19. Dispositif de serrage.....	65
Figure. II.20. La sonde Hot Disk.....	65

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure III.1. Evolution du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.....	68
Figure III.2 Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C après (7 jours).....	69
Figure III.3. Variation de la résistance a la résistance a traction par flexion en fonction du rapport E/C après (7jours).....	69

Figure III.4 : Influence du fumée de silice sur la résistance a la compression après (7 jours)	70
Figure III.5 : Influence du fumée de silice sur la résistance de traction par flexion après (7jours).....	70
Figure III.6: Cinétique d'adsorption et la désorption de grains de liège.....	71
Figure III.7 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de liège.....	72
Figure III.8 : Variation de la masse volumique en fonction de pourcentage des grains de liège.....	73
Figure III.9 : Evolution de la résistance a la compression en fonction de la teneur des grains de liège.....	74
Figure III.10 : Evolution de la résistance a la traction par flexion en fonction de la teneur des grains de liège.....	75
Figure III.11 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-AL).....	77
Figure III.12 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-AL+FS).....	77
Figure III.13 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-CAL).....	78
Figure III.14 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-CAL+FS).....	78
Figure III.15 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sportivité du béton de liège (sable de calcaire).....	80
Figure III.16 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sportivité du béton de liège (sable de calcaire+ fumée de silice).....	80
Figure III.17 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sportivité du béton de liège + (sable de alluvionnaire).....	81
Figure III.18 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sportivité du béton de liège + (sable de alluvionnaire+fumée de silice).....	81
Figure III.19 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du dosage en agent expansif a l'état sec.....	84
Figure III.20. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des bétons de liège.....	85
Figure III.21. Evolution de la conductivité thermique à saturation en fonction de la densité.....	87
Figure III.22. : Evolution de la diffusivité thermique à l'état sec en fonction de la masse volumique (béton de sable calcaire).....	88
Figure III.23. : Evolution de la diffusivité thermique à l'état sec en fonction de la masse volumique (béton de sable alluvionnaire).....	89
Figure III.24. : Evolution de la diffusivité thermique à l'état sature en fonction de la masse volumique (béton de sable calcaire).....	89
Figure III.25. : Evolution de la diffusivité thermique à l'état sature en fonction de la masse volumique (béton de sable alluvionnaire).....	90

Notations employées

Φ : porosité intrinsèque du liant.

V : volume total occupé par la pâte de liant (m^3)

E : module d'élasticité des bétons.

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

σ : Résistance à la compression du béton sur cubes à (j) jours (kg/cm^2).

M : module de finesse.

V : Vitesse de décantation de la particule en (cm/s).

ρ_{app} : masse volumique apparente (kg/m^3).

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

M : Masse du matériau.

ρ_1, ρ_0 : Masse volumique du solide et du fluide en (g/cm^3).

η : viscosité.

D : Diamètre de la particule.

g : Accélération de la pesanteur.

S : Surface spécifique (cm^2/g).

k : Constante de l'appareil Blaine.

e : Porosité de la couche tassée.

t : Temps mesuré en secondes.

ρ : Masse spécifique du ciment (g/cm^3).

C : Compacité.

P : Porosité.

G : gravier.

S : sable.

SA :sable alluvionnaire

SC : sable calcaire .

FS : fumée de silice .

T : température ($^{\circ}\text{C}$).

HR : l'humidité relative %

ESp : équivalent de sable au piston

ESv : équivalent de sable visuel

SD : Sable de dune

Rt : résistance à la traction (MPa).

Ft : Charge à la rupture (N).

b : largeur de la section carrée du prisme (mm).

Rc : résistance à la compression (MPa)

$\Delta L/L$: variation dimensionnelle (mm)

Lf : La longueur finale.

Li : La longueur initiale

L0 : La longueur initiale après 24h de moulage.

E/C : rapport eau sur ciment.

E :eau.

C : ciment.

ϵ : la porosité totale

Vv : volume des vides (m^3).

Vt : volume total

M(t) : masse de l'échantillon humide à l'instant t.

M(0) : masse initiale de l'échantillon à l'état sec.

ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm^3).

i : volume d'eau absorbé par unité de surface.

Sw : sorptivité ($\text{mm.mn}^{-0.5}$).

λ : Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

a : Diffusivité thermique ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

λ_{sec} : conductivité thermique à l'état sec.

λ_{sat} : conductivité thermique à l'état saturé.

a_{sec} : Diffusivité thermique à l'état sec.

a_{sat} : Diffusivité thermique à l'état saturé

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique. Dans plusieurs pays du monde, différents déchets sont utilisés dans le domaine de la construction et spécialement dans les bétons comme poudre, fibres ou agrégats.

Chaque procédé de valorisation permet de réaliser des économies de matières premières et contribue de façon directe au respect et à la sauvegarde de l'environnement. Le concept de valorisation des déchets est né de l'idée que l'entreprise doit considérer ses déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser! En effet beaucoup de matériaux sont réutilisables dans diverses applications après leur fin de vie attribuée.

Dans le domaine de construction le recyclage et la valorisation des déchets industriels ont connu au cours des dernières décennies un regain considérable en particulier pour l'élaboration des matériaux légers isolants et isolants porteurs.

Dans un bâtiment, les déperditions thermiques proviennent notamment de diverses parties opaques (mur, toit et plancher) qui contiennent du béton. Il est donc intéressant d'envisager des formulations de béton de à propriétés d'isolation thermique améliorées. L'utilisation de granulats légers, qui possèdent de bonnes propriétés thermiques grâce à leur structure poreuse, peut être une solution pour améliorer la capacité d'isolation des éléments en béton. Cette technique d'isolation répartie limite la déperdition de chaleur par des ponts. Cela peut permettre d'éviter des dispositifs constructifs lourds comme les techniques d'isolation extérieure.

Dans cette recherche, nous voulons étudier l'efficacité des résidus de liège et son effet sur les propriétés du béton et des constructions en général.

Notre travail a pour objectif l'analyse de l'influence des propriétés des granulats de liège sur le comportement mécanique et thermique des bétons légers en suivant une approche expérimentale.

Le programme expérimental s'appuie sur les caractéristiques de la matrice cimentaire et le pourcentage des granulats légers ainsi que le rapport E/C. Afin d'avoir ses effets sur les caractéristiques mécaniques et les propriétés d'isolation thermique des bétons de granulats légers.

Afin d'atteindre ces objectifs ; notre travail est subdivisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à des généralités sur la valorisation des déchets et le béton léger en particulier le béton des granulats légers de liège.
- Le deuxième chapitre constitue une description des techniques expérimentales utilisées et la caractérisation des matières premières.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux relatifs au comportement physico-mécanique et thermique du béton léger à base de liège.

Enfin, et sur la base des résultats obtenus, une conclusion générale et des perspectives pour les recherches à venir sont présentées.

CHAPITRE I
GENERALITES ET SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Le secteur de la construction est un des principaux contributeurs aux impacts sur l'environnement. Il est donc indispensable d'agir pour réduire ces impacts, en particulier ceux du secteur du bâtiment. Les règlements thermiques, d'exigence croissante, se sont ainsi imposés en définissant un ensemble de critères que les bâtiments doivent satisfaire. La notion d'éco-construction est donc apparue et le matériau de construction doit évoluer pour faire face à ses exigences. Le recours à des matériaux avec des constituants d'origine végétale, comme les matériaux dits bio sources, est, par conséquent, une solution à explorer et à valider.

L'utilisation des matériaux biosources dans la construction présente donc des enjeux environnementaux. De par leur origine végétale, les matériaux bio sources présentent des avantages environnementaux non négligeables. En effet, ces matériaux contribuent à limiter l'épuisement des ressources finies en exploitant en alternative des ressources renouvelables issues le plus souvent des sous-produits d'autres filières (agriculture, industrie du bois, ...). Ils permettent également de fixer le carbone limitant ainsi les émissions de CO₂. En outre, ces matériaux se basent le plus souvent sur une production locale, limitant d'autant l'impact environnemental lié au transport.

De plus, les matériaux bio-sources sont de bons isolants thermiques et incluent une faible énergie grise. Leur utilisation comme matériaux de construction est par conséquent un moyen efficace pour diminuer les dépenses énergétiques du bâtiment durant sa durée de vie.

Ce chapitre à caractère bibliographique, débute par une description approfondie du béton léger et des matériaux utilisés pour l'allègement (résidus de liège). Les compositions chimiques, les propriétés physiques, et les différentes procédures de fabrication de ces matériaux sont présentées. Les résultats concernant le comportement mécanique et thermique des bétons étudiés seront également exposés.

I.2. la valorisation de résidus

Toute activité de production ou de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et a de multiples risques pour la santé humaine.

Par valorisation, on entend toute transformation de résidus ou de sous-produits industriels alimentaires en vue de les réintroduire sur le marché à titre de nouveaux ingrédients ou comme nouveaux produits.

L'agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) définit la valorisation comme "le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir de déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie".

Chaque procédé de valorisation permet de réaliser des économies de matières premières et contribue de façon directe au respect et à la sauvegarde de l'environnement. Le concept de valorisation des déchets est né de l'idée que l'entreprise doit considérer ses déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser! En effet beaucoup de matériaux sont réutilisables dans diverses applications après leur fin de vie attribuée. **(Mme Boucherba. N ; 2014)**

La valorisation de la biomasse est poussée par deux facteurs. D'une part, l'industrie des matières plastiques doit faire face à une diminution des ressources pétrolières et a une prise de conscience des populations de l'impact des matériaux plastiques sur notre environnement (dégagement de CO₂). Ainsi les politiques actuelles se basent sur trois grands principes : le respect de l'environnement et des hommes, la réduction des déchets et des matières polluantes et le remplacement partiel ou total des dérivés pétrochimiques par des ressources renouvelables.

D'autre part, les déchets provenant de l'agriculture représentent la plus grande part des déchets produits ; Une partie de ces déchets est valorisée comme source d'énergie pour l'exploitation agricole, dans l'alimentation animale ou dans la fabrication de papier et de panneaux de particules. **(Edwige Privas ; 2014)**

Les déchets naturels peuvent jouer un rôle important dans les années futures. Il faut donc rechercher de nouvelles applications, des conditions de synthèse et de transformation nouvelles, propres et reproductibles ainsi que des coûts réduits alliés à des propriétés originales. D'un point de vue économique, une valorisation globale des ressources renouvelables, avec l'utilisation de chaque constituant, permettra une diminution des coûts.

I .2.1 Stratégies de traitement des déchets

Malgré les quantités importantes des déchets dans notre pays qui atteignent actuellement 4.892.000 tonnes/an (dont 184.000 tonnes sont considérés dangereux et toxiques) une gestion des déchets solides n'est pas à l'heure actuelle développée. Quelque fois la récupération de certaines matières valorisables est pratiquée, mais la qualité reste très insuffisante.

La stratégie d'une bonne gestion des déchets s'appuie sur deux grands principes :

- Il faut prendre en compte simultanément les notions de matière, d'énergie, d'environnement et d'économie.
- Des lorsque ces stratégies ont pour objectif le retour des déchets dans le milieu naturel, il y a lieu de s'inspirer des lois qui régissent le fonctionnement de ce milieu.

Ces lois existent à travers les cycles biogéochimiques qui régissent la circulation des éléments chimiques (**Boutemeur et al,2002**).

La gestion des déchets passe par cinq stratégies possibles qui sont représentés à la figure 1.1

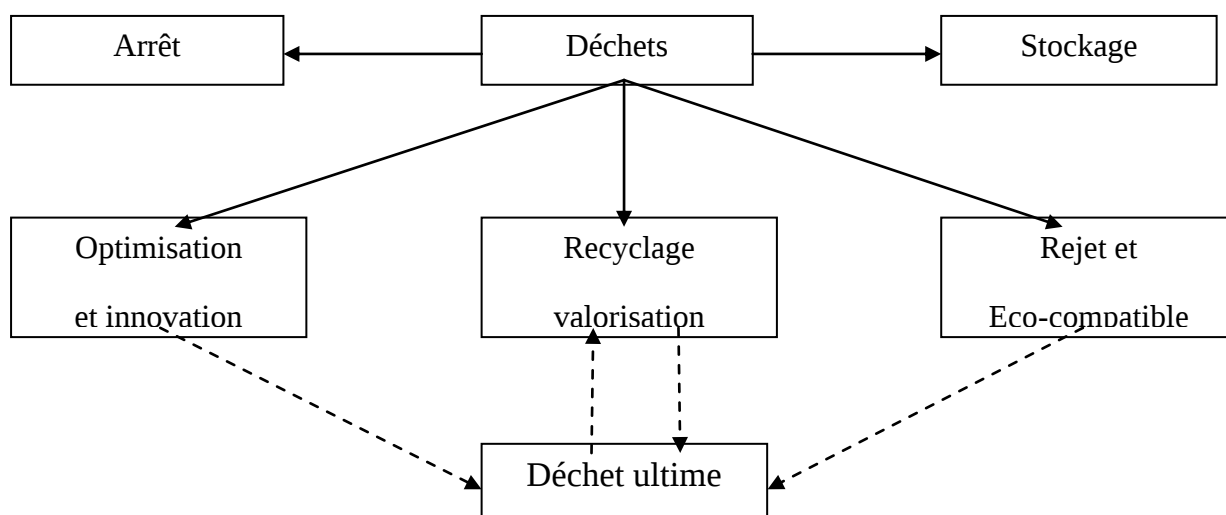


Figure I.1 : Stratégies de traitement des déchets (Boutemeur et al, 2002).

Seules les stratégies de valorisation, de rejet éco-compatible et de stockage concernant directement la gestion des déchets (**Michel, 1981**).

Leur mise en œuvre concrète passe par un certain nombre de filières techniques, elles articulent autour des objectifs généraux suivants :

- Valorisation énergétique.
- Valorisation en matière première organique et minérale.
- Valorisation en science des matériaux.
- Valorisation en agriculture.
- Valorisation en technique de l'environnement.

- Technique dite d'élimination.

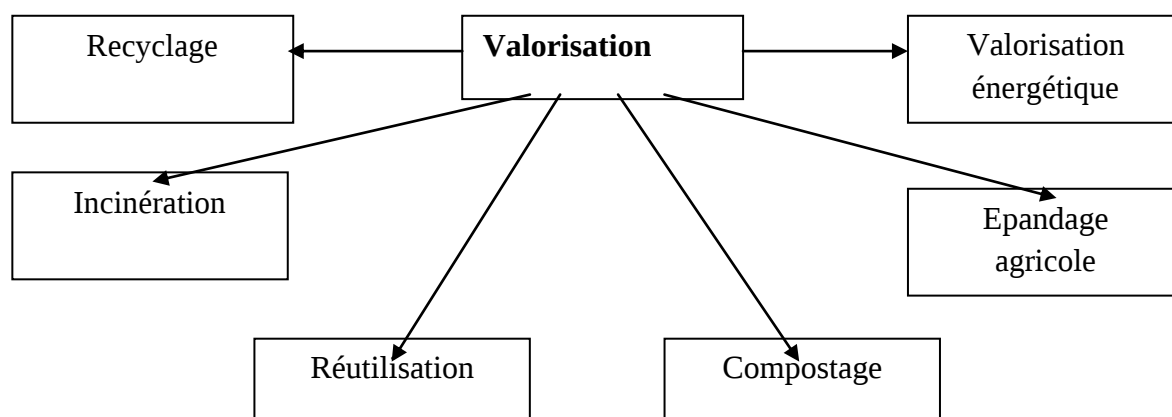


Figure I.2 : Valorisation des déchets [Clastres ; 2004].

I.2.2 Définitions

On entend par :

- **Déchet** : tout résidu d'une production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné.
- **Récupération** : séparation de certains produits ou matériaux des déchets à des fins de réemploi de réutilisation et de recyclage.
- **Recyclage** : réintroduction d'un matériau récupéré dans le cycle de production dont il est issu (même circuit de fabrication).
- **Compostage** : Le procédé de traitement biologique de déchets et la transformation des constituants organiques d'un déchet en un produit stabilisé (compost).
- **Incinération** : C'est un procédé thermique qui consiste à la destruction complète du déchet et sa transformation en éléments simples et inertes sous l'action d'une forte chaleur et de l'oxygène de l'air. Il faut noter que les résidus solides de combustion (cendres, mâchefers...) représentent 25 % à 30 % du poids des déchets, ils sont valorisés en tant qu'ajouts cimentaires.
- **Valorisation** : tout traitement ou utilisation des déchets qui permet de leur trouver un débouché ayant une valeur économique positive. Le terme général valorisation englobe réemploi recyclage et réutilisation.

I.2.3 Pourquoi Valoriser ?

L'intérêt qui est porté de plus en plus à la valorisation des déchets et des sous produits industriels est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement. Les arguments peuvent être résumés en :

- Augmentation de la production.
- Le coût de stockage ou de traitement est de plus en plus élevé.
- Une législation de plus en plus sévère.
- Une meilleure gestion de la recherche.

I.2.4 Intérêt du recyclage dans le génie civil

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats (GDCBFNB, 1994). Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de 10 à 15 millions de tonnes (GDCBFNB, 1994). En 2001, la quantité réelle issue du recyclage n'était cependant que de 5 millions de tonnes (UNPG, 2001).

Face aux 400 millions de tonnes de granulats naturels produits en 2001 (UNPG, 2001), le granulat recyclé de déchets de démolition ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter ou de limiter de façon significative l'exploitation des gisements naturels. **(SERIFOU. M ;2013)**.

Recycler des déchets afin de les utiliser comme granulats pour les routes ou la construction permet:

- une économie des ressources naturelles ;
- une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- la réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que :

- pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ;
- le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant **(Thai et al., 2009)** .
- la récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO₂ des cimenteries.

I.3. Béton léger

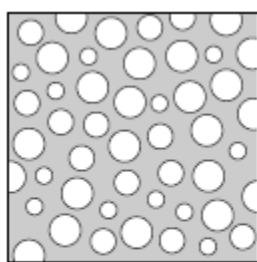
La première utilisation du béton léger est connue avant J.C. dans les constructions de l'Empire Roman en méditerranée. Mais ce n'est qu'en 1928 que le béton léger fut commercialisé. Les Etats Unis sont le premier pays qui l'a fabriqué industriellement et utilisé pour l'usage structurel pendant les années 1940. Le béton de structure de granulats légers est mis en œuvre dans plusieurs types de construction comme les bâtiments résidentiels, les ossatures d'immeubles, les tabliers de ponts, les constructions offshores ... (ACI04).

Le béton léger est défini par sa masse volumique inférieure ou égale à 2000 kg/m³(Eurocode 2 – 1992). Comparé au béton ordinaire de densité normale, qui a une masse volumique entre 2200 et 2600 kg/m³, la masse volumique du béton léger est diminuée par la substitution d'une certaine partie solide du matériau par des poches d'air que nous appellerons vides(**Hung Nguyen ;2013**).

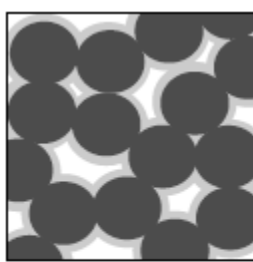
I.3.1. Classification des bétons légers

Il existe Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton (**Bederina .M,2007**):

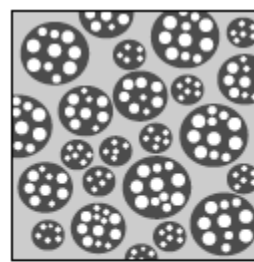
- la matrice : le béton, dans ce cas, est appelé « **béton cellulaire** ». Les bulles d'air sont créées, lors du malaxage, soit par réaction chimique, soit par action physique.
- entre les gros granulats: le béton, dans ce cas, est appelé « **béton caverneux** » (ou sans fines, ç-à-d sans sable).
- dans les granulats : le béton, dans ce cas, est appelé «**béton de granulats légers**».



Béton cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

Figure I.3 : Classification des bétons légers

La **Figure I.3** montre quelques exemples de structures de bétons légers appartenant aux différentes catégories des bétons légers (**Bederina .M ;2007**).

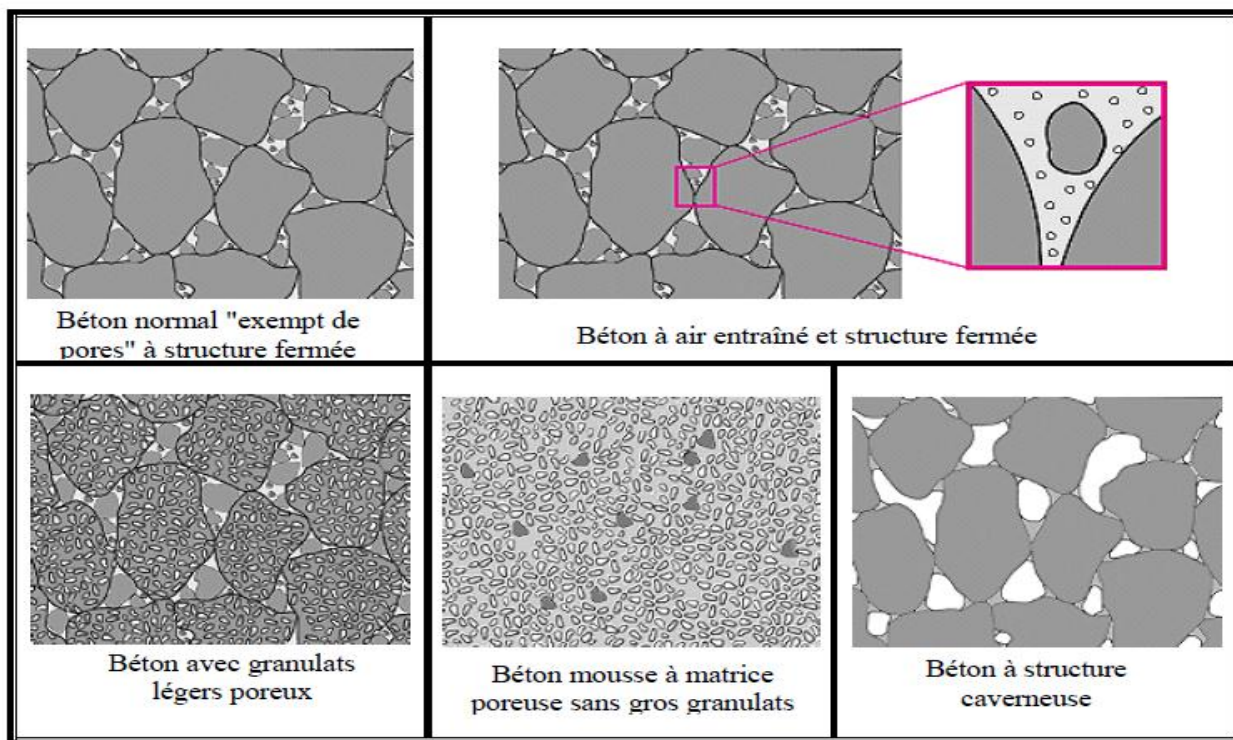


Figure I.4 : Structures des bétons légers.

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide (**Michigan, (1994).**) distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci, comme l'indique le **tableau I.1.**

Tableau I.1 : Classification des bétons légers selon la masse volumique (RILEM ;1970)

Classification	ρ (kg/m ³)	R _c (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	< 7

De même (**Kass J.L et Compbell D ;1972**), en Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction Cette classification a été recommandée par la suite par les RILEM(**RILEM ;1970**), selon le **tableau 1.2 :**

Tableau 1.2 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction selon la norme (ACI 21 213R-87).

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

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit (Veronique Cerezo ;2005):

- **Des bétons de remplissage**

Leur masse volumique apparente est comprise entre **300 et 1000 kg/m³**, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.

- **Des bétons porteurs isolants**

Leur masse volumique apparente est comprise entre **1000 et 1400 kg/m³**, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

- **Des bétons de structure**

Leur masse volumique est comprise entre **1400 et 1800 kg/m³**. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible.

I.3.2. Propriétés des bétons légers

I.3.2. 1. Porosités

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités. Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée ϵ_g , due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique. La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle

d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant ϵ_1 . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H, varie entre $0,01 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre $5 \mu\text{m}$ et 1 mm . L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique. **(Veronique Cerezo ;2005)**

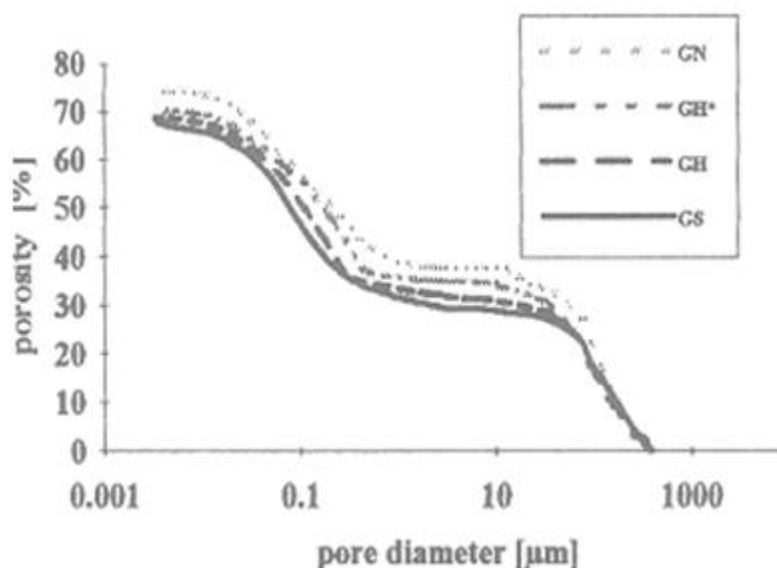


Figure I -5. : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores **(Jacobs & Mayer ; October 1992: Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete)**

I .3.2. 2. Légèreté

L'emploi de granulats légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. A titre de comparaison, la masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m^3 alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m^3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m^3 pour un béton de bois et qu'elle varie entre 350 et 650 kg/m^3 pour un béton cellulaire (norme NF P 14-306). L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction **(Veronique Cerezo ;2005).**

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant ϵ_1 .

La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H, varie entre 0,01 μm et 5 μm et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre 5 μm et 1000 μm . (**Jacobs & Mayer; 1992**).

L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$\epsilon_1 = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{liant}}} \dots \dots \dots (1)$$

V vide : Volume des vides contenus dans la matrice de liant (m^3)

V liant : Volume total occupé par la pâte de liant (m^3)

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

$$\epsilon_{\text{meso}} = \frac{V_{\text{vide}}}{V_t} \dots \dots \dots (2)$$

Avec :

V vides: Volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule (m^3)

Vt : Volume total occupé par le matériau (m^3)

1.3.2.3 Absorption d'eau et sensibilité à l'humidité

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

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

➤ Absorption de l'eau

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber ou de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé et s'exprime en

pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique) d'un matériau sec.

$$\omega_m = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \dots \dots \dots (I.1)$$

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

$$\omega_v = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 100 \dots \dots \dots (I.2)$$

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

➤ Adsorption et désorption

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

I.3.2.4. Comportement et performances mécaniques

Il existe une relation entre les résistances mécaniques et le dosage en ciment en particulier la résistance à la compression. Le ciment ayant une densité beaucoup plus élevée que celle des granulats légers et de l'eau, pour n'importe quel granulats particulier, la résistance augmente avec l'augmentation de la masse volumique, mais, selon le type de granulats, un béton de 20 MPa peut nécessiter entre 260 et 330 Kg de ciment par mètre cube, alors qu'un béton de 40 MPa en exigera de 420 à 500 kg/m³. Des résistances à la compression plus élevées exigent des dosages en ciment très élevés par exemple, un dosage en ciment de 630kg/m³ est nécessaire pour obtenir une résistance de 70 MPa , (**Saiti Issam ; 2014**).

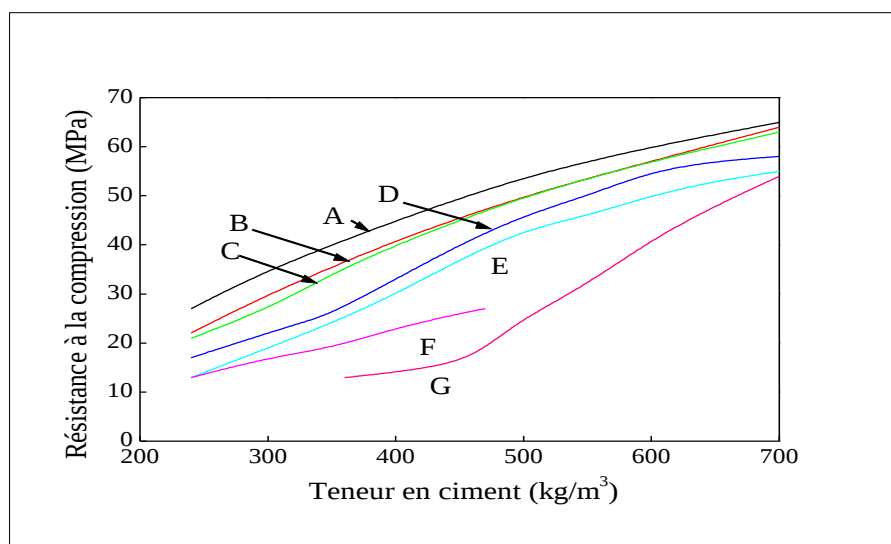


Figure I.6 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment avec : **A:** cendres volantes frittées et granulat fin ordinaire, **B:** laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire, **C :** cendres volantes frittées, **D :** schiste fritté, **E:** ardoise expansée
F: argile expansée et sable, **G:** laitier expansé d'après (Adam M. Neville, 2000),

Les niveaux des performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre ϵ_g , qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats ϵ_g diminue. Dans le cas du béton cellulaire, la grande proportion de vides d'air dans le matériau est un facteur essentiel dans le niveau de performances. On distingue deux types de pores: les **macrospores** (diamètre supérieur à 60 μm) et les micropores (diamètre < 60 μm) (**Jacobs & Mayer ;1992**). Des études expérimentales montrent qu'il existe une relation linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique. Dans le cas de granulats d'argile expansée de type (Liapor, Arnauld ;1986) a obtenu une relation Linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique **figure 1-7**.

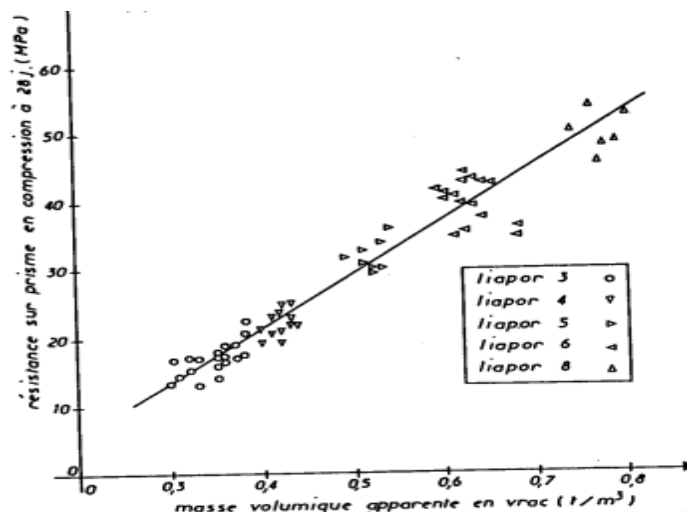


Figure 1-7 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique
(Arnould ;1986)

Comme pour le béton de densité normale, la fumée de silice améliore l'évolution de la résistance du béton léger. D'autres ajouts peuvent être aussi incorporés dans le béton léger.

De façon générale, pour un béton de même résistance, le dosage en ciment doit être plus élevé dans un béton léger que dans un béton de densité normale ; le dosage supplémentaire en ciment peut dépasser 50% dans le cas des résistances élevées (Arnould ; 86 : granulats de béton légers, Paris (1986)).

I.3.2. 5. 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 de 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 (Roger Iacroux-Albert Fuentes ;1982, Rilem ; 1980, Rilem ;1974).

La composition minéralogique des granulats légers manufacturés, obtenus par des procédés de fabrication à très haute température, donne aux granulats une bonne stabilité face aux attaques chimiques. Le bon choix du type de ciment et du rapport eau/ciment est cependant essentiel pour assurer la durabilité des bétons légers face aux agressions chimiques.

I.3.2. 6. Autres propriétés du béton léger

➤ La résistance au gel

Elle est très bonne, malgré la teneur en eau absorbée, car de nombreux pores non saturés subsistent, qui permettent l'expansion de la glace. Il faut noter en outre une bonne aptitude au bétonnage par temps froid, car la faible conductivité thermique permet au béton de conserver la chaleur de prise du ciment. (Gueddouda.M.K et al ; 2007)

➤ La résistance au feu

Elle se mesure par la durée de tenue d'un élément, à une température déterminée, est meilleure que celle du béton traditionnel, en raison des valeurs peu élevées de la conductivité thermique et du coefficient de dilatation. Ainsi, par exemple la durée de résistance d'une dalle de 12cm d'épaisseur est d'environ 2h avec un béton normal, et 4h avec un béton léger; de même, les pertes de résistances mesurées à 650° sont respectivement de l'ordre de 40 à 50 dans le premier cas, et de 15% seulement dans le second. La figure I.8 montre, pour le béton léger et le béton normal, la relation approchée qui existe entre l'épaisseur d'une dalle et sa résistance au feu (déterminé par le critère ASTM E 119) (Bentchikou. M ;2008).

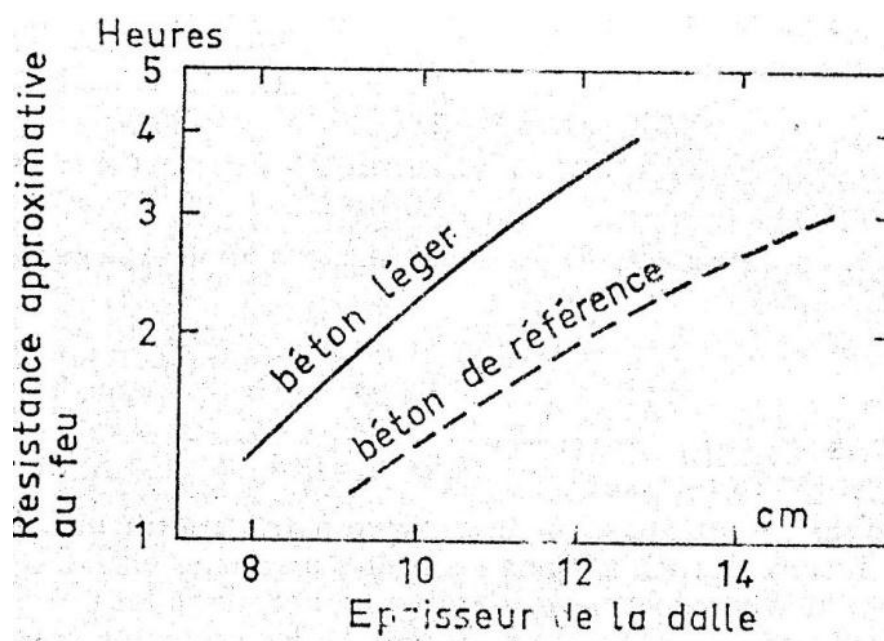


Figure I.08 :Relation entre l'épaisseur d'une dalle et sa résistance approximative au feu (Bentchikou. M ;2008)

➤ Aspect acoustique

L'isolation acoustique obtenue par des parois homogènes en béton léger, est avant tout, une question de poids et d'imperméabilité à l'air; il est dû à l'existence de nombreuses cellules fermées dans les agrégats. Certaines parois en bétons pleins de granulats légers, complétées par des enduits étanches, peuvent avoir des performances acoustiques supérieures

à celle prévues par la « loi de masse ». Cette amélioration se manifeste pour des épaisseurs supérieures à 15 cm (**Rilem ;1980**).

I.3. 3. Formulation de béton léger

La formulation d'un mélange de béton léger consiste en une combinaison économique des différents constituants de ce mélange, qui est généralement composé : d'eau, d'ajout, de liant (ciment), et de granulats, en vue d'obtenir des caractéristiques optimum souhaitées aussi bien pour le béton frais que pour le béton durci (**Reine Ahouéfa Katte ; 2014/2015**).

De façon générale, il existe une corrélation directe entre la masse volumique et la résistance du béton. En effet plus le béton est léger moins la résistance l'est. Néanmoins, l'évolution de la technologie du béton a permis de trouver des moyens d'améliorer les performances des bétons légers. En effet, les ajouts minéraux et les adjuvants ont permis de réduire la demande en eau tout en améliorant les propriétés rhéologiques et la microstructure du matériau. La fumée de silice est maintenant recommandée pour augmenter la résistance à la compression mais également pour diminuer les risques de ségrégation des granulats. L'utilisation de cet adjuvant est contrôlée par la norme NF EN 13263-1. En effet, pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou la ségrégation tout en réduisant la chaleur d'hydratation. Pour les bétons durcis, la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense, qui conduit à des bétons extrêmement compact, à caractéristiques mécaniques élevées (Infociments, 2011). Le dosage habituel en fumée de silice est d'environ 10 % du poids du ciment. Les cendres volantes et les laitiers peuvent aussi être utilisés pour des raisons économiques et pour améliorer la résistance à long terme. Les bétons légers à haute performance développés par Wilson & Malhotra (**WILSON, et al ; 1988**) contiennent entre 20 et 30 % de cendres volantes en remplacement du ciment.

Plusieurs méthodes de formulation existent dans la littérature. Elles prennent en compte plusieurs paramètres qui peuvent affectés la résistance souhaitée à savoir : le taux d'absorption et d'humidité des granulats, la granulométrie des agrégats, le rapport eau sur ciment et la quantité d'air entraîné (**ACI Committee 211, 2004**).

Il n'existe pas de méthode absolue pour la formulation des bétons. En effet, le choix de la méthode de formulation est très dépendant du concepteur. En ce qui concerne les bétons légers, le paramètre qui mérite une attention particulière est l'absorption des granulats qui fait intervenir la prise en compte de deux types d'eau : l'eau absorbée par les granulats et l'eau de gâchage (**Reine Ahouéfa Katte 2014/2015**).

Les dosages en ciment et en eau sont généralement déterminés en fonction de la résistance à la compression et de l'affaissement spécifiés. Grâce aux adjuvants modernes (plastifiants, super- plastifiants etc.), le rapport eau sur ciment peut maintenant se situer entre 0,25 et 0,50 contrairement aux rapports supérieurs à 0,50 traditionnellement utilisés pour contrer l'absorption des granulats. Le choix des granulats fins et des gros granulats a par ailleurs un effet important sur les propriétés du béton (SHINK, 2003).(**Reine Ahouéfa katte 2014/2015**).

I. 4. Utilisation d'ajout cimentaire dans la composition du béton léger

Le béton léger est un mélange. Il est possible d'y intégrer des adjuvants et autres matériaux pour changer et améliorer certaines de ses caractéristiques. Selon (Neville 2000), il est possible d'ajouter de la fumée de silice dans la formulation du béton léger pour améliorer ses résistances mécaniques. La fumée de silice est un ajout cimentaire qui réagit avec le ciment et l'eau du béton (action pouzzolanique) et comble les vides interstitiels entre les granulats du béton. « Les cendres volantes, les poudres de silice et les autres matériaux contenant de la silice peuvent être utilisés comme agents pouzzolaniques au ciment. » (Pacewska et al ; 2002)

➤ Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la production du silicium et des alliages de ferro-silicium. Cette petite poudre est formée de particules sphériques de silice amorphe extrêmement fines (de l'ordre de 0,1 micromètre) (Marchand et Pigeon, 2002). On emploie généralement la fumée de silice en remplaçant entre 5 à 10 % du ciment Portland, ce qui a pour effet de réduire la taille moyenne des pores capillaires dans le béton; de diminuer sa perméabilité; augmenter sa résistance aux attaques chimiques; et augmenter sa résistance en compression.

La technologie de ces nouveaux bétons peut être profitable pour développement à cause de la richesse de différente variété de granulats légers dans le monde en va présenter quelque ces granulats légers (**Herihiri. O ;2010**).

➤ Pouzzolane

Les Romains de l'Antiquité fabriquaient du ciment pouzzolane en brûlant de la lime et des cendres volcaniques. Ces cendres venaient de Pozzuoli, en Italie, près du Mont Vésuse, dont elles tiennent leur nom maintenant (Hart, 2001). Aujourd'hui, le nom pouzzolane fait référence aux composés inorganiques, comme des cendres volantes, utilisées comme substitut cimentaires au ciment Portland. Il est possible d'inclure dans le béton des matériaux naturels

comme des fibres végétales, des cendres volcaniques, de l'écorce de riz, de la terre, du coton, du bambou etc. Les matériaux artificiels et naturels qui contiennent de l'alumine ou de la silice s'appellent des pouzzolanes. Ces ajouts cimentaires peuvent remplacer entre 15 % et 40 % du ciment Portland, sans réduire significativement la résistance et la durabilité à long terme du béton (Traduction libre, Agustin et al , 1990).

La plupart des matériaux pouzzolaniques sont des résidus de production tant industriels qu'agricoles. Agustin et al., (1990) ont mesuré les pourcentages de silice dans les productions agricoles pour le blé, le maïs, le bambou, le tournesol, l'écorce de riz et autres (tableau 5). Selon ces mêmes auteurs, ce sont les cendres d'écorce de riz qui ont le plus grand pourcentage de silice (93%). Il est donc avantageux d'utiliser les cendres d'écorce de riz, comme pouzzolane, pour augmenter la résistance du béton (réduction des pores capillaires) et réduire ainsi les coûts du béton (**Herihiri. O ; 2010**).

I. 5. Les Adjuvants :

Dans le béton, les adjuvants sont devenus des composants indispensables pour atteindre les propriétés recherchées. On utilise ces adjuvants chimiques, entres autres, pour retarder ou pour accélérer la prise du ciment, pour réduire la quantité d'eau dans la pâte. Pour fluidifier ou pour entraîner de l'air. Leurs multiples applications résultent de leurs effets chimiques ou physiques sur les grains de ciment et sur la pâte de ciment.

Malgré cette diversité, deux catégories d'adjuvants sont plus souvent utilisées pour la confection de bétons légers. Il s'agit des plastifiants pour leur aptitude à fluidifier le béton ayant un faible rapport EIL et les agents entraîneurs d'air pour contrer les effets dus aux cycles de gel-dégel.

➤ Les Super Plastifiants

On utilise les super plastifiants pour réduire le rapport E/L, ce qui permet d'augmenter les résistances à la compression du béton tout en améliorant sa maniabilité.

Les super plastifiants sont des produits de synthèse, fabriqués pour les besoins de l'industrie du béton. Ils sont constitués de polymères dont la composition et la taille sont ajustées pour optimiser l'effet dispersant. La pureté de ces produits de synthèse permet de les utiliser à fort dosage, sans être au prise avec des effets secondaires tels que l'entraînement d'air et les retards de prise du ciment. Cependant, leur coût est relativement élevé.

Les superplastifiants se subdivisent en deux grandes familles, soit les polycondensés de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS) et les polycondensés de formaldéhyde et de

naphtalène sulfonaté (PNS). On retrouve également quelques autres types tels que des lignosulfonates modifiés, des polyacrylates et des esters (**Ramachandran et Malhotra, 1984**).

Les particules de ciment présentent un grand nombre de charges négatives et positives sur leur surface. Ces charges ont tendance à flocculer en présence d'un liquide aussi polaire que l'eau. La formation de flocons emprisonne une quantité d'eau grandement supérieure à celle nécessaire au mouillage des grains. L'ajout d'un super plastifiant va, par adsorption à la surface des grains, permettre de charger les grains de ciment de même signe de manière à créer une répulsion de ces derniers. Les particules, plus mobiles, se repoussent entre elles et favorisent ainsi un empilement optimal qui est à l'origine de la réduction d'eau (**Herihiri .O ; 2010**).

I.6. Béton des granulats légers

Les bétons légers de structure, utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs, sont généralement fabriqués avec des granulats légers manufacturés (argile, schistes et laitiers expansés ou cendres volantes frittées). La résistance à la compression minimale recommandée par l'ACI est alors de 17 MPa à 28 jours. Les bétons légers de faible densité sont fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulles d'air peut être faite par génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entraînement d'air au cours du malaxage. Ces bétons sont de très bons isolants Thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une Résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi Disponibles (verre et polystyrène expansés).

Les bétons de résistance modérée sont dotés de propriétés intermédiaires. Ils peuvent être fabriqués avec des granulats concassés naturels, comme la pierre ponce, les tufs et autres roches d'origine volcanique, ou avec un mortier aéré. La pierre ponce fut par ailleurs le premier granulats léger à être utilisé, notamment pour la construction du dôme du Panthéon et du Colisée à Rome (**Melanie Shink ; 2003**).

I.6. 1. Définition d'un granulats léger

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

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, ce qui explique leur légèreté. Ils peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et ayant subi ou non des transformations. Leur utilisation dans le béton a pour but de diminuer de façon plus ou moins importante, selon le granulat léger choisi, la masse volumique. Par contre, cette réduction de la masse volumique a pour conséquence de diminuer la résistance à la compression(**Ziregue.A ;2005**).

I.6.2. Différents types de granulats légers

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

- **Les granulats légers pour bétons structuraux**

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

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

Les billes de polystyrène expansé, fa perlite, la vermiculite ou tout simplement des agents moussants sont couramment utilisés pour la confection de bétons légers isolants ou de remplissage. (**Ziregue.A ;2005**)

I.6.3 Classification des granulats légers

Nous pouvons distinguer les granulats légers selon leur origine naturelle ou artificielle :

a) granulats naturels

Les principaux granulats de cette catégorie sont les diatomés, la pierre ponce, les scories, les cendres volcaniques et le tuf. A l'exception des ditomées, tous sont d'origine volcanique (**Veronique Cerezo ;2005**) ; en les concassant, on obtient donc des granulats légers. (**A. Steopoe 1970**).Les granulats léger naturels ne sont pas très utilisés même si leur emploi permet de confectionner des bétons de résistance moyenne(**Veronique Cerezo ;2005**).

ce sont des matériaux minéraux naturels non préparé qui n'ont subi que de traitement mécaniques tels que lavage, broyage et tamisage (**Gotteicha.M ;2005, G.Bauduin,DJ Mathieu et R.Phan tan Luu ;1987**).



Figure I.9 :Différents granulats légers naturels (**A. Steopoe ;1970**).

b) granulats artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase à Taiwan et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie; soit à partir de sous produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène Expandé) (**A. Steopoe 1970**), soit végétal (copeaux de bois, granulats des lièges) et fibre cellulosique (cas de l'Alfa). Ces granulats sont souvent désignés par une variété de noms commerciaux, mais sont mieux classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisant à l'expansion et, par conséquent, à une diminution de la densité apparente. On distingue :

b.1- granulats naturels ayant subi un traitement thermique

Ces matériaux sont des minéraux naturels préparés (**George dreux Jean festa ;1998**), ils sont mieux classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisent à l'expansion et, par conséquent, à une diminution de la densité apparente (**Veronique Cerezo ;2005**). 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.

b.2- granulats artificiels ne subissant pas de traitement thermique : comme le Mâchefer

b.3- granulats artificiels obtenus par divers traitements spéciaux : Comme le laitier expansé et les cendres volantes frittées (**Ziregue Ahmed ;2005**).

La figure I-10 présente quelques exemples de granulats artificiels.



Figure I.10 : Différents granulats légers artificiels (**A. Steopoe ; 1970**).

c) granulats organiques

Produits organique, naturels ou artificiels, tels que liège, copeaux de bois, balle de riz, polystyrène expansé, matériaux dont l'utilisation rentre dans le cadre de valorisation des déchets qui a un effet positif sur l'aspect environnemental et l'apport économique de ce type de granulats.

Le polystyrène expansé (PSE) élément utilisé dans la composition du béton sujet de notre travail est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et L'emballage des produits industriels ou alimentaires.

Le PSE est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté en Cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane, C_5H_{12})(**Bing Chen, Juanyu Liu ;2004**).

Le béton léger est obtenu dans cette catégorie de matériaux en remplaçant totalement ou partiellement les agrégats standards par un composé de faible poids (léger) pour atteindre des densité plus faible, leur masse volumique varie suivant la classe granulométrique de 400 à 1300 kg/m³ en diminuant le pourcentage de billes de polystyrène constituant le gros granulat par rapport au mortier (**J.P Yvrard ;1998**).

Avec les types de granulats légers naturels ou artificiels cités ci-des sus on peut confectionner des bétons légers dont les caractéristique s selon Neville (**Veronique Cerezo ;2005**) sont dans le **tableau I.5**.

Tableau I.3 : Caractéristiques habituelles des bétons légers(Veronique Cerezo ;2005)

Type de béton		Masse volumique globale des granulats kg/m ³	Masse volumique sèche du béton kg/m ³	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Retrait de séchage (10 ⁻⁶)	Conductivité thermique (Jm/m ² s °C
Laitier expansé	Fin	900	1850	21	500	0.69
	Grossier	650	2100	41	600	0.76
Argile expansée au four giratoire	Fin	700	1200	17	600	0.38
	Grossier	400	1300	20	700	0.40
Argile expansée au four giratoire avec sable naturel	Grossier	400	1500	20	-	0.57
			1600	35	-	-
			1750	50	-	-
			1900*	70**	-	-
Argile frittée expansée	Fin	1050	1500	25	600	0.55
	Grossier	650	1600	30	750	0.61
Ardoise expansée au four giratoire	Fin	950	1700	28	400	0.61
	Grossier	700	1750	35	450	0.69
Cendre volante frittée	Fine grossier	1050	1500	25	300	-
		800	1540	30	350	-
			1570	40	400	-
Cendre volante frittée avec sable naturel	Grossier	800	1700	25	300	-
			1750	30	350	-
			1790	40	400	-
Pierre ponce		500-800	1200	15	1200	-
			1250	20	1000	0.14
			1450	30	-	-
Perlite		40-200	400-500	1,2-3	2000	0.05
Vermiculite		60-200	300-700	0.3-3	3000	0.10
Cellulaire	Cendre Volante	950	750	3	700	0.19
	Sable	1600	900	6		0.22
Cellulaire autoclavé		-	800	4	800	0.25
* Avec cendre volante et fumée de silice. ** A 1 a						

I.6.4. Les avantages de l'utilisation du béton de granulats légers

L'utilisation du béton de granulats légers en structure peut être bénéfique au niveau du coût d'un projet et de la fonctionnalité de la structure ou de l'ouvrage [ACI03]. Même si le coût par mètre cube d'une structure de béton de granulats légers est souvent plus élevé que celui en béton ordinaire, le coût total d'un projet utilisant le béton léger est souvent réduit grâce aux avantages liés au béton de granulats légers par rapport du béton ordinaire :

- La réduction de la charge transmise à la fondation mène à la réduction des dimensions de la fondation et des têtes de pieux, ainsi qu'à la diminution du nombre de pieux et du renforcement.
- La réduction du chargement statique mène à la réduction des dimensions des structures portantes.
- La réduction du chargement statique réduit la force d'inertie sismique.
- Pour le béton précontraint préfabriqué, le béton de granulats légers permet de fabriquer des structures plus longues et plus larges sans augmenter la masse totale.
- L'épaisseur de la structure résistante au feu peut être diminuée grâce à l'isolation thermique du béton de granulats légers, ce qui mène à la réduction du volume de béton.
- La diminution du volume de béton conduit à une réduction du coût de transport.

L'utilisation du béton de granulats légers permet également de construire sur un sol de faible capacité portante, grâce à la réduction de la masse totale de l'ouvrage [CAR86] ainsi qu'à une augmentation de la productivité grâce à la réduction de la masse totale de matériaux à manipuler (NEV00). **(Hung Nguyen ;2013)** .

➤ Isolation

Une des propriétés intéressante des bétons de granulats légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Le béton parfaitement sec est plus isolant que le béton humide. Ces bétons légers constituent aussi de bons isolants phoniques. La corrélation entre la masse et le coefficient de conductivité thermique se traduit par des performances en matière d'isolation thermique, d'autant plus sensible que la densité diminue (**Nguyen, Beaucour, Ortola, Noumowé ;2011**). Grâce à leur conductivité thermique et à leur coefficient de dilatation plus faibles, les bétons légers présentent une résistance au feu meilleure que celle des bétons courants, à condition que les granulats soient d'origine minérale. La structure cellulaire des bétons légers leur assure une bonne imperméabilité à l'eau, tout en favorisant les échanges de vapeur, ce sont aussi des matériaux résistant au gel(**Nguyen, Beaucour, Ortola, Noumowé ;2011**) .

➤ Durabilité

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 la perméabilité du béton. Cette propriété est plutôt contrôlée par la pâte de ciment durcie et par la qualité des interfaces pâte-granulats. Dans les bétons légers à haute performance, l'utilisation d'un faible rapport eau/ciment ainsi que la densification et la diminution de la microfissuration des interfaces, liée à la meilleure compatibilité élastique entre les granulats et la matrice, ne favorise pas le transfert de matières à l'intérieur du matériau (Sugiyama & Coll., Zhang & Gjorv).

Les grands volumes de vides occasionnés par les granulats légers pourraient augmenter la perméabilité aux gaz des bétons légers. La résistance à la corrosion des bétons légers à haute performance est cependant similaire à celle des bétons de granulats rigides. Des études menées sur plusieurs ponts et structures marines ont montré que l'intégrité microstructurale et la très faible microfissuration de ces bétons permettent de limiter significativement la diffusion des agents agressifs comme le chlore et le dioxyde de carbone à l'intérieur du matériau (Holm & Coll, Holm & Bremner , Mays & Barnes)(**Melanie , Shink ;2003**).

I.7 Béton de liège

Le liège expansé est un matériau fabriqué à partir de l'écorce du chêne liège, un tissu végétal formé de cellules mortes. Sa cuisson dans sa propre résine le fait s'agglomérer naturellement et donne du liège expansé pur. Ce matériau est utilisé en tant qu'isolant thermique et phonique dans les constructions : planchers, murs, toits,...

Alors qu'une grande majorité de producteurs français importent le liège de l'étranger, quelques-uns utilisent celui des forêts de leur région et privilégient la production de liège « blanc », nécessitant moins d'énergie puisque non expansé, par opposition au liège « noir ». La composition chimique du liège est : 45% subérine, 27% lignine, 12% cellulose et polysaccharides, 6% tanins, 5% cires, 5% cendres et autres composants. Le gaz enfermé dans les cellules est identique à l'air, sans dioxyde de carbone .

Le liège est des plus souples matériaux naturels connus. C'est un matériau léger, élastique, flexible et imperméable aux gaz et liquides, impérissable, bon isolateur électrique et thermique, isolateur phonique et diélectrique (**Lakreb .N ;2014/2015**).

La faible conductivité thermique du liège combinée à une raisonnable compression, font de ce matériau un excellent isolateur thermique lorsque des charges compressives sont présentes. Sa propriété de frottement (anti-glissement) le rend également bon pour des revêtements de sol ou dans les poignées. Aujourd'hui, les produits en liège sont utilisés pour

isolation thermique des réfrigérateurs et des fusées, pour l'isolation acoustique des sous-marins et les studios d'enregistrement, tels des joints dans les instruments en bois et les chambres de combustion, et en tant qu'absorbeur d'énergie dans les planchers, les chaussures et l'emballage, et naturellement comme taquets (Gil L, Moiteiro C ;2003) .

I.7.1 Caractérisations du liège

A- Culture et récolte du liège

A-1 Culture

Le chêne liège est originaire d'Afrique du Nord et du Sud de l'Europe mais est cultivé en majeure partie au Portugal, en Espagne et en Corse.

Son écologie le cantonne aux sols dépourvus de calcaire, aux conditions climatiques relativement modérées du littoral : hivers doux, sécheresse estivale tempérée par une certaine humidité atmosphérique.

A-2 Récolte

Le Portugal, l'Espagne, l'Algérie, le Maroc la Tunisie et la France comptent 87 % de la subéraie mondiale, qui couvre au total 2,7 millions d'hectares.

La récolte mondiale en 1999 s'est élevée à environ 340.000 tonnes de liège, dont 54 % pour le seul Portugal. En France, 5 tonnes de liège sont produites chaque année.

La «levée » du liège se déroule en 2 étapes:

- **le premier démasclage** : c'est la récolte du liège mâle. On dit alors que l'arbre est mis en production, puisque le liège mâle, sans grande valeur, est retiré afin que se développe du liège femelle économiquement plus intéressant car de meilleure qualité ;
- **la levée périodique du liège femelle** : La première récolte s'effectue lorsque l'âge de l'arbre atteint 25 ans, et peut être renouvelée environ tous les 8 à 12 ans, jusqu'à environ 120 ans.

Cette récolte doit avoir lieu entre juin et août.

Un hectare de chênes-lièges fournit de 80 à 120 kg de liège tous les 10 ans.

3 tonnes de liège mâle donnent 1 tonne de liège expansé noir aggloméré ou en granulés.

100 kg de liège femelle brut donnent :

- 50 kg de liège expansé noir,
- 22 kg de granulés de liège blanc agglomérés ou non,
- 10 kg de bouchons,
- 18 kg de chutes

B- Transformations du liège

B-1 La première transformation

Après la levée de l'écorce, les plaques de liège sont stockées sur le site ou séchées en local de stockage pendant 6 mois environ.

B-2 Fabrication du matériau

L'écorce, aux dimensions inégales, est réduite en granules calibrés. Ils sont ensuite expansés à la vapeur dans un four autoclave (environ 300°C). Pendant cette étape, les granules brunissent, se dilatent et s'agglomèrent entre eux sous l'action de la subérine (résine naturelle) qu'ils libèrent.

Les liants synthétiques ne sont plus utilisés pour l'agglomération des particules. Les plaques de liège expansé sont ensuite découpées aux dimensions voulues pour la mise sur le marché. (**Source : briques technologiques juillet 2006**)

I.7.2. Différentes utilisations du granulat de liège

Le liège peut aussi être utilisé en vrac dans le cas d'isolation de surfaces non exploitées (vides dans les murs,...), pour la fabrication de bouchons, semelles orthopédiques, parquets, ou mélangé pour fabriquer du mortier allégé...

I.7.3. Structure et composition

La particularité la plus intéressante du chêne-liège réside dans le fait qu'il produit une écorce extérieure homogène, formée d'un tissu élastique, imperméable et bon isolant thermique : le liège. Cette écorce est constituée de cellules mortes aux parois imperméabilisées par un composé chimique appelé subérine.

Tous les arbres produisent des couches de cellules subérisées comme forme de protection, mais seul le chêne-liège est capable de « construire » son écorce extérieure en ajoutant annuellement des anneaux de liège issus de l'activité d'un ensemble de cellules mères : le phellogène. L'homogénéité du liège résulte du fait que le phellogène du chêne-liège se maintient en activité pendant toute la durée de vie de l'arbre. Ce qui contraste avec les autres arbres dont chaque phellogène a une durée de vie réduite.

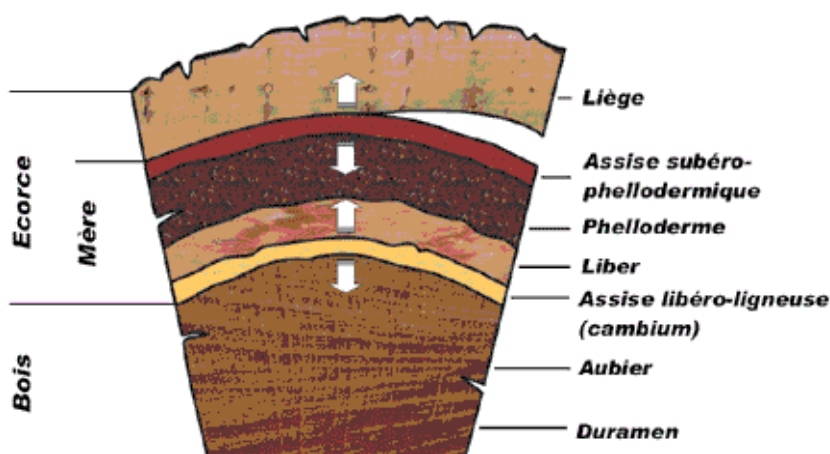


Figure I.11 : Structure et composition de liège

Formation La croissance en diamètre de la tige de chêne-liège résulte de deux assises génératrices de cellules, dont une que l'on nomme "phellogène", "mère du liège" ou plus scientifiquement "assise subéro-phellodermique", située entre le liège et le liber. L'assise

subéro-phellodermique produit vers l'extérieur le liège et vers l'intérieur le phelloderme ; l'assise libéro-ligneuse (aussi appelée cambium) produit quant à elle vers l'extérieur le liber (chargé de transporter la sève élaborée) et vers l'intérieur le xylème ou bois (chargé du transport de la sève brute).

Après un écorçage, la « mère » ainsi découverte se dessèche en partie pour former une croûte et se reforme plus en profondeur par dédifférenciation des cellules du liber.

➤ Composition chimique

Les cellules du liège ont la forme d'un prisme hexagonal ou pentagonal. La taille d'une cellule dépasse rarement 0,045 millimètre ; les plus petites cellules seulement 0,02 ou 0,01 millimètre. Au XVII^{ème} siècle, le physicien britannique Robert Hooke arrive à obtenir la première image du liège en utilisant un microscope de son invention. Il est ainsi le premier à observer une cellule de liège. Il découvre que les parois de ces cellules sont constituées de subérine, principal composant du liège, supportée par de la lignine et de la cellulose. La subérine est un mélange d'acides gras et d'alcools organiques lourds qui rendent le liège imperméable aux liquides et très faiblement perméable aux gaz. La subérine a des propriétés remarquables : elle ne fond pratiquement pas, est insoluble dans l'eau, dans l'alcool, dans l'éther, dans le chloroforme, dans l'acide sulfurique....

Composition chimique du liège

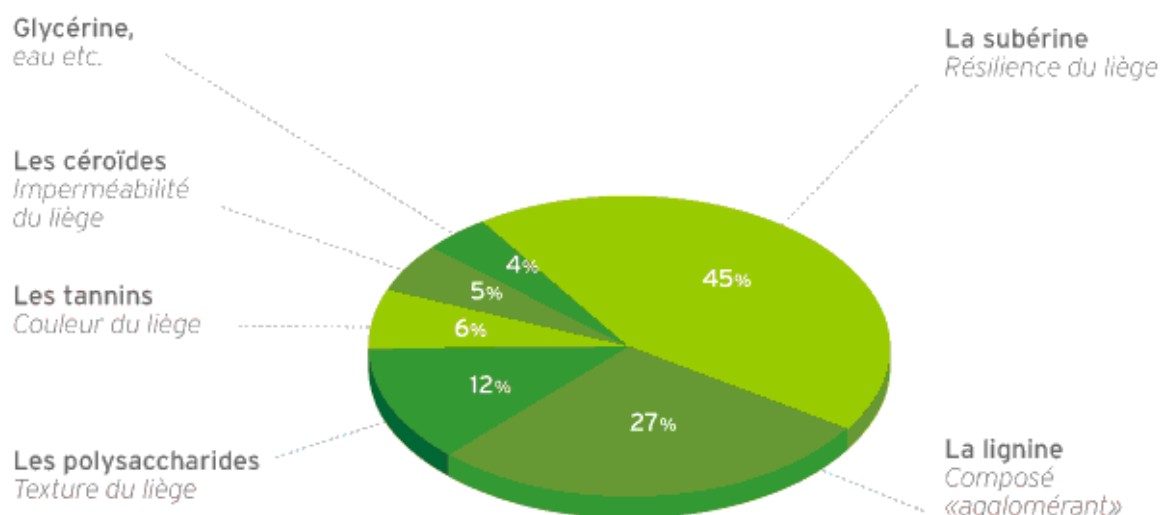


Figure I.12 : Composition chimique de liège

I.7.4. Préparation du liège

Elle comporte essentiellement les opérations suivantes (**Nassima Sotehi ;2010**):

✓ **Ecorçage ou démasclage**

Le cycle d'exploitation du chêne liège commence tout d'abord par l'écorçage. Une première étape de sélection du produit initial est effectuée dans les subéraies. La levée du liège s'exécute manuellement selon une pratique traditionnelle à l'aide d'une hachette spéciale très tranchante. D'abord deux profondes entailles horizontales sont pratiquées, l'une à la base du tronc et l'autre en haut, puis deux entailles verticales. Les plaques de liège sont enlevées avec le manche de la hachette. Les entailles pratiquées au cours de cette étape doivent être précises, car des lésions dues à une mauvaise manipulation peuvent compromettre la qualité du produit et causer à long terme la mort de l'arbre.

✓ **Triage et séchage**

Les planches de liège sont empilées à l'air libre pendant 6 à 12 mois afin de permettre au liège de s'affiner par oxydation.

✓ **Bouillage**

Cette étape s'effectue pendant 45 à 90 minutes dans de l'eau. Ce nettoyage permet d'éliminer une partie des substances hydrosolubles du liège (en particulier les composés phénoliques du liège), d'augmenter son épaisseur, de réduire sa densité et d'améliorer sa souplesse

✓ **Stabilisation**

Les plaques sont ensuite stabilisées pendant 2 à 4 semaines dans un lieu où l'aération et l'humidité sont réglables. Cette opération permet aux planches de s'aplanir, le liège sèche pour atteindre la consistance permettant la découpe.

✓ **Deuxième bouillage**

Le liège subit un tri. Les planches qui ne correspondent pas au calibre et à la qualité souhaitée sont éliminées, les autres planches sont bouillies une seconde fois, pendant environ 30 minutes, pour les rendre malléables.

✓ **Classement**

Les plaques de liège sont réparties en fonction de leur épaisseur et de leur sélection.

I.7.5. Propriétés du liège

La composition et la structure du liège lui confèrent de nombreuses propriétés:

- **Elasticité- Compressibilité– Souplesse.** Il est comprimé rapidement dans sa limite—élastique, et prend presque instantanément 85 % de son volume initial,

- Légèreté, sa faible densité est variable avec la qualité du liège. Elle est due à l'air contenu dans ses cellules,
- Adhérence, elle est permise par la force d'expansion d'une matière élastique et par la présence de micro ventouses (cellules coupées lors du cycle de fabrication) au contact des parois.
- Imperméabilité qui est due non seulement à la contre- pression exercée par le gaz des cellules, mais aussi à la présence dans les membranes du liège d'une forte proportion de substances grasses (subérine, cérine, ...). Le liège absorbe moins de 18 à 20 % d'eau si son volume augmente (au bouillage), résultant essentiellement de la dilatation des gaz contenus dans ces cellules.
- Durabilité. Du fait de sa faible perméabilité il résiste aux agents extérieurs.
- Faible conductivité phonique et thermique, du au fait que l'air reste enfermer dans ses cellules (minuscules compartiment étanches) est isolé par une matière non hygroscopique et de faible poids spécifique. La conductibilité thermique interne du liège en planche est de 0.2963 W/m. K, c'est la raison pour laquelle le tissu subéreux du chêne liège est parmi les substances douées de la plus haute capacité isolante. De plus, en réduisant par compression sa taille de moitié, la pression de l'air emprisonné à l'intérieur des cellules ferme les capillarités.
- Mauvaise combustibilité car il lui faut beaucoup d'oxygène pour brûler. De plus il carbonise en surface et cette couche empêche la propagation du feu.
- **Densité de liège**

la densité du liège peut varier entre 110 et 300 Kg.m⁻³ selon l'âge, les traitements subis par le liège et la proportion de lenticelles. Cette variation serait liée également aux dimensions des cellules. En effet, une densité élevée correspondrait à des parois épaisses et lourdes, d'après Gibson et al, 1981 et à des cellules de petite hauteur (15 µm). D'après Pereira, 2007, cette densité peut atteindre 1250 Kg.m⁻³ sous l'effet d'une forte compression (55 Mpa). Cette faible densité fait du liège un bon isolant thermique et acoustique. Cela permet également au liège de pouvoir être utilisé pour amortir les vibrations (chocs). (Gil, 1997; Silva et al, 2005 ; Pereira, 2007) (**Lakreb. N ;2014/2015**) .

I.7.6. Caractéristiques physico-mécaniques et thermique des bétons de liège

L'étude du comportement thermique et mécanique d'un matériau de construction, constitue un élément important à prendre en compte dans un habitat. Les paramètres thermique et mécanique auxquels nous nous intéressons dans cette étude sont la conductivité

thermique (λ) et la résistance à la compression (R), qui contribuent à une meilleure connaissance du comportement thermomécanique des matériaux d'isolation et de construction (El Bakkouri.A, et Al;2005).

I.7.6.1. Comportement mécanique

Les niveaux de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des bétons usuels de construction, puisque les premiers possèdent une porosité supérieure, ce qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité augmentent lorsque la porosité diminue. Des études expérimentales ont mis en relation performances mécaniques et masse volumique des bétons légers.(Elbakkouri ;2004) montre, dans ses études, que la résistance à la compression du béton est fortement influencée par l'incorporation du liège dans ce matériau (**Figure I.13**).

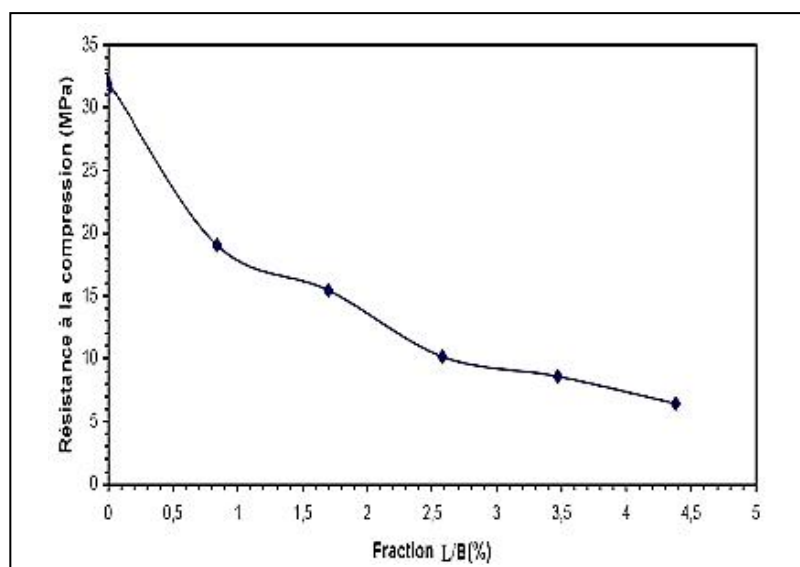


Figure I.13 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la fraction L/B(Elbakkouri ;2005)

Cependant, il faut nuancer cette corrélation entre performances et porosité en fonction du type de granulats légers et de la quantité employée dans le matériau. En effet, si le volume occupé par les granulats devient suffisamment important, ses propriétés piloteront les caractéristiques du matériau global.

I.7.6.2 Propriétés thermiques

Malgré leurs importances certaines dans de nombreux domaines d'application, les propriétés physiques du liège autres que les propriétés mécaniques n'ont été que très peu étudiées. Sa structure cellulaire, comparable à celle des mousses cellulaires, lui permet ainsi d'être un bon isolant thermique. Le liège est un matériau alvéolaire contenant 80 % d'air et

dont les dimensions cellulaires permettent d'éviter les phénomènes de convection (Castro et al. 2010; Silva et al. 2005; Lagorce-Tachon 2015). La conductivité thermique du liège est semblable à certains isolants alors que sa densité est bien plus importante (Tableau I.4).

Tableau I.4: Densité et conductivité thermique de différents isolants dont le liège

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

I.8. Nécessité de l'isolation thermique

Les deux critères nécessaires de la conception thermique des bâtiments sont la protection des occupants d'une manière automatique et passive, des facteurs climatiques pluies, vent, rayonnement, chaud ou froid de diverses parois, et l'optimisation de la consommation énergétique. Le concepteur doit faire en sorte que cette consommation (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par la réglementation et les possibilités financières des occupants, tout en assurant un niveau de confort défini par le maître d'ouvrage. L'isolation thermique introduite par les différents éléments de l'enveloppe de bâtiment constitue un important critère de performance énergétique. Elle permet de réduire les déperditions de chaleur, de réaliser des économies de chauffage, de limiter les émissions de gaz à effet de serre, et de bénéficier d'un meilleur confort de vie.

Une grande partie de déperdition de chaleur se faisant par les toits et les murs, par conséquent une bonne isolation thermique des parois permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60%.

I.8.1. Zones "sensibles" d'une habitation – Les Ponts Thermiques

En matière d'isolation thermique que ce soit en rénovation ou en construction, il est nécessaire de traiter avant tout les parties de l'habitation où les déperditions de chaleur sont les plus importantes : à savoir la toiture ou les combles.

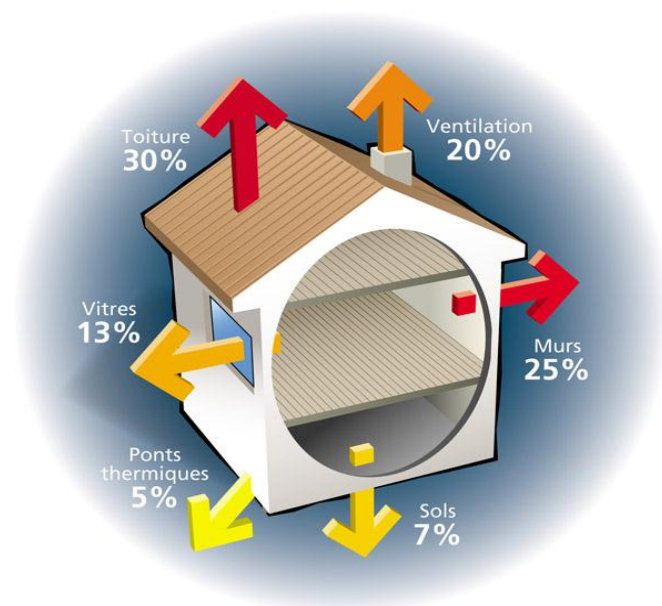


Figure I.14 : Zones "sensibles" d'une habitation

L'isolation peut être en général effectuée soit par l'intérieur soit par l'extérieur.

L'isolation par l'extérieur apporte l'avantage d'éliminer au maximum les ponts thermiques, lesquels entraînent une chute locale de la température et génèrent des zones froides localisées dans l'habitation et une sensation d'inconfort pour les occupants. En effet, un pont thermique désigne des points de la construction où la barrière isolante est rompue pour des raisons de mise en œuvre mal pensée ou un manque de rigueur dans la conception du projet. La chaleur peut donc s'échapper facilement à ces endroits. Ce sont généralement les points de raccord des différentes parties de la construction :

- Liaison entre un plancher bas et un terre-plein,
- Liaison entre un plancher bas et un mur,
- Liaison entre un plancher intermédiaire / un plancher haut,
- Liaison entre 2 murs, menuiserie / systèmes de fixation.

Les ponts thermiques sont souvent responsables de problèmes de condensation dans une habitation. Dans certaines constructions, les ponts thermiques peuvent représenter près de 40 % des déperditions totales de chaleur. Il est donc très fortement conseillé d'enrayer ces ponts thermiques plutôt que de poser plusieurs centimètres d'isolant sans les traiter.

<http://www.easy-liege.fr/contenu/41-isolation-thermique>.

a- Isolation des parois

Il existe trois types d'isolation des parois :

a.1 Isolation intérieure

Ce type d'isolation est le plus répandu, il est facile à mettre en œuvre, et nécessite des travaux directement dans l'espace intérieur du logement en mettant l'isolant sur la face intérieure du mur. L'isolation intérieure laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire, par contre elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter.

a.2 Isolation extérieure

Cette technique nécessite généralement une épaisseur de l'isolant plus faible. Elle consiste à mettre un isolant sur le mur de l'habitation, côté extérieur. Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation, de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse, et moins intéressante du point de vue énergétique.

a.3 Isolation intégrée au matériau porteur

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est généralement utilisée en construction neuve. Elle est performante et durable. La recherche des conditions de confort de l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois.

I.9. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a permis d'une part de situer l'état actuel de la recherche dans le domaine des matériaux composites utilisés dans la construction et la mise en évidence du recours aux produits issus de la récupération des déchets ;

En effet, cette nouvelle technique qui consiste à élaborer un composite à granulats légers composites a connue un essor considérable mais néanmoins demeure un vaste domaine d'investigation de la part la multitude des déchets susceptibles d'être recyclés.

Au terme de cette étude bibliographique susceptible d'être enrichie, nous confirmons l'originalité de notre travail consistant à caractériser et modéliser les paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites et ce par un choix judicieux des différents matériaux constituant le granulat.

CHAPITRE II
MATERIAUX ET METHODES
EXPERIMENTALES

II -1 Introduction

Dans ce chapitre ; nous allons présenter les caractéristiques des matériaux entrant dans la préparation des mélanges, ainsi que les modes opératoires de confection et de conservation des éprouvettes utilisées ainsi que les essais de caractérisations physico-thermiques et mécaniques que nous avons réalisés, dans le laboratoire de génie civil de l'université du Laghouat.

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

II -2 matériaux utilisés

II -2-1 sable

On entend par sable la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,080 mm et 5 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% (**Chauvin, J.J.1987**).

Dans notre travail, l'expérimentation a été entreprise sur deux types de sable ; un sable de calcaire noté par (SC) et un sable alluvionnaire désigné par (SA).

- Le sable de calcaire provenant de la région Nord de la ville de Laghouat, sa granulométrie est de (0/3)
- Le sable alluvionnaire SA a été extrait de l'Oued M'zi (région de Laghouat). sa granulométrie est de (0/3)

II.2.1.2 Caractéristiques physiques des deux sables utilisés

II.2.1.2.1. Masse volumique

➤ Masse volumique apparente

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

$$\rho_a = \frac{M}{V} \dots\dots\dots (II .01)$$

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

Nous avons mesuré la masse volumique apparente des sables étudiés, par la détermination de la masse d'un remplissage d'une mesure d'un litre, qui doit être effectué sans aucun tassement. 3 essais ont été effectués. La précision de la balance utilisée est de 0.1grammes. Les valeurs moyennes obtenues sont représentées sur le Tableau (II.1) :

➤ **Masse volumique absolue**

C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau (vides non compris) selon la norme **NFP18-555**, elle est déterminée Par la méthode de l'éprouvette graduée :

Nous avons rempli l'éprouvette d'un volume d'eau (noté V_1). Ensuite nous avons introduit dans l'éprouvette environ 400g de l'échantillon testé (notée M_s). Après l'élimination de toutes les bulles d'air par une légère agitation, nous avons lu le nouveau volume (noté V_2). La Lecture des volumes a été faite en bas du ménisque. La masse est alors calculée :

D'où la masse volumique : $\rho_s = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (II .02)$



Figure. II.1. Méthode de mesure de la masse volumique absolue et apparente

La mesure a été effectuée sur trois échantillons de 400 g chacun. La précision de lecture de volume d'eau est de 1cm^3 , la précision de la balance utilisée est de 0,1 g. Nous avons obtenu une valeur moyenne sur les trois échantillons .

Par la méthode de pycnomètre

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

$$\rho_s = \frac{m_2}{(m_1 + m_2) - m_3} \dots\dots\dots (II.03)$$

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.

Cette méthode est plus précise que la première.

Les valeurs obtenues sont représentées sur le Tableau (II.1) :

Tableau. II.1. Masses volumiques apparentes et absolues des sables étudiés

Masses volumique Type de sable	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable de calcaire (SC)	1.49	2.59
Sable alluvionnaire (SA)	1.51	2.54

II.2.2.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage (**Norme NFP 94-056**) (**AFNOR; 1996**) permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers (dimension nominale inférieure ou égale à 0.080 mm).

L'essai 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 sur la partie supérieure des tamis et l'opération de tamisage des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis par l'intermédiaire d'une tamiseuse électrique.

Dans notre étude, nous avons utilisé les tamis de modules 20 (0.080 mm), 23 (0.160 mm), 26 (0.315 mm), 39 (0.630 mm), 32 (1.25 mm), et 35 (2.50 mm).

Le tableau (II.2) et (II.3) présentent respectivement les résultats de l'analyse granulométrique de sable de calcaire SC et alluvionnaire SA.

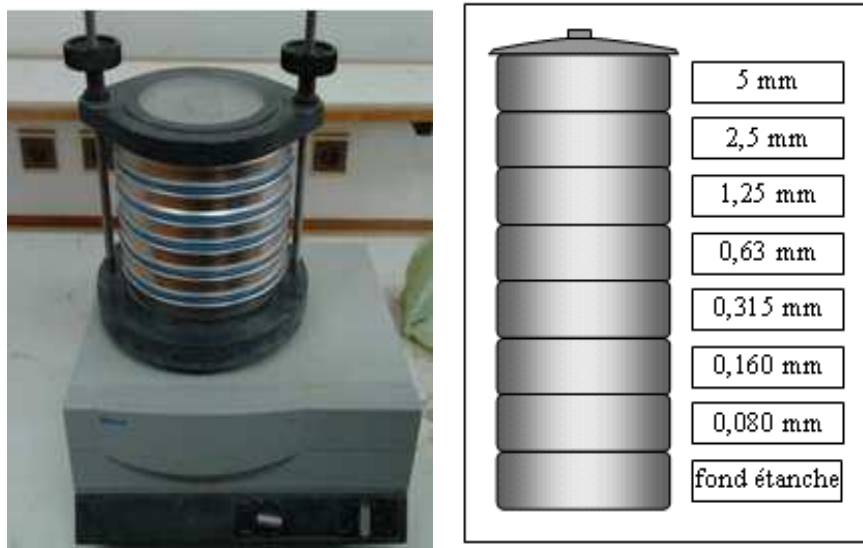


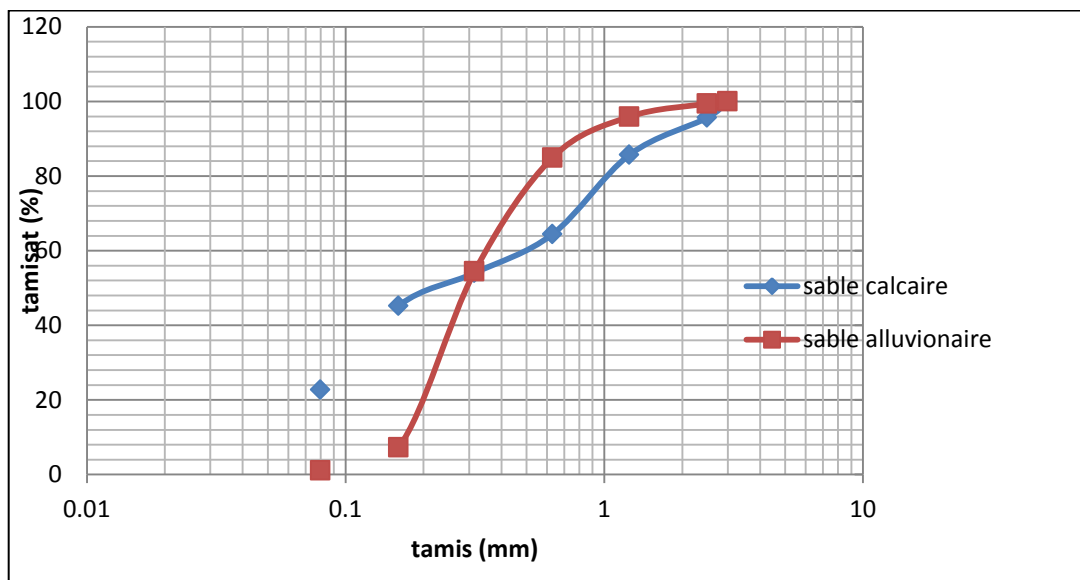
Figure. II.2. Appareil de tamisage et Série de tamis

Tableau. II.2. Analyse granulométrique par tamisage du SC

Tamis en (mm)	Refus partiels En (g)	Refus cumulés En (g)	Refus cumulés en (%)	Tamisats cumulés en (%)
3	0	0	0	100
2.5	61,02	61,02	4,36	95,64
1.25	138,87	199,89	14,28	85,72
0.630	298,04	497,93	35,58	64,42
0.315	145,09	643,02	45,95	54,05
0.160	123,26	766,28	54,76	45,24
0.080	315,19	1081,47	77,28	22,72
fines	317,9	1399,37	100,00	0,00

Tableau. II.3. Analyse granulométrique par tamisage du sable SA

Tamis en (mm)	Refus partiels En (g)	Refus cumulés En (g)	Refus cumulés en (%)	Tamisats cumulés en (%)
3	0	0	0	100
2.5	8,44	8,44	0,60	99,40
1.25	48,62	57,06	4,08	95,92
0.630	153,43	210,49	15,04	84,96
0.315	427,31	637,8	45,56	54,44
0.160	660,2	1298	92,72	7,28
0.080	85,87	1383,87	98,85	1,15
fines	16,03	1399,9	100,00	0,00

**Figure. II.3.** Les courbes granulométriques des sables étudiés

Les courbes granulométriques des deux types de sables montrent que nos sables ont une granulométrie continue et elles sont bien graduée et sa continuité bien répartie

➤ Module de finesse

Le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : **0.160 – 0.315 – 0.630 – 1.250 – 2.5 mm-3mm**. Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un module de finesse est d'autant plus faible que le granulat est riche en éléments fins.

Nous pouvons calculer le module de finesse pour les deux sables qui est définie par :

$$Mf = \frac{[\sum \text{des refus (en\%)} \text{ des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5]}{100} \dots\dots\dots (II .04)$$

Pour notre cas on trouve :

Module de finesse de sable **alluvionnaire** **Mf=1.58**

Module de finesse de sable **calcaire** **Mf=1.54**

En se référant aux valeurs des module de finesse on voit que les deux types de sables riches en éléments fins, mais le sable calcaire est plus fin que le sable alluvionnaire en conséquence il absorbe plus d'eau. Ce qui démontré à travers les valeurs des coefficients d'absorption.

II.2.2.4 Propreté des sables

La propreté d'un sable peut être apprécié par l'intermédiaire d'un essai appelé « équivalent de sable » (AFNOR, 1999) (Norme NF EN 933-8). Cet essai consiste à donner une indication sur l'importance des impuretés (argile, poussière, matière organique, ...etc.) contenues dans les sables. Ces impuretés influent négativement sur l'adhérence entre les grains de sable et le ciment, ce qui conduit à chuter la résistance mécanique des bétons et des mortiers. Selon la méthode de mesure, l'équivalent de sable est désigné par ESV pour l'équivalent de sable à vue et par ESP pour l'équivalent de sable au piston.

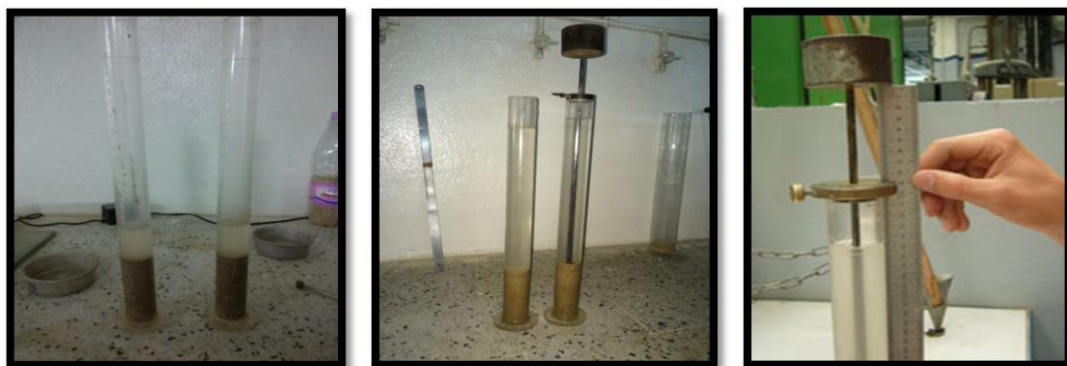


Figure. II.4. Mesure de l'équivalent de sable.

Le tableau (II.4) donne le classement des sables d'après la propreté :

Tableau. II.4. Classes de propreté d'après les valeurs de l'équivalent de sable**(Norme NFP 18-598)**

ESV (%)	ESP (%)	Interprétations
$ESv < 65$	$Esp < 60$	Sable argileux ; non convenable pour des bétons de qualité
$65 \leq Esv < 75$	$60 \leq Esp < 70$	Sable légèrement argileux ; convenable pour des bétons courants
$75 \leq Esv < 85$	$70 \leq Esp < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses ; parfaitement convenable pour des bétons de qualité.
$Esv \geq 85$	$Esp \geq 80$	Sable très propre : risque d'un défaut de plasticité du béton

D'après le **tableau II.4**: Pour notre cas on trouve

-Equivalent de sable alluvionnaire $Es=85$ on remarque que le sable est très propre, il contient un pourcentage des éléments fins très faible.

-Equivalent de sable calcaire $Es=68.5$ on remarque que l'Equivalent de sable est faible du fait que ce contient une quantité d'élément fin qui peut être les argiles.

➤ **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**.

$$C_p = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - P \dots\dots\dots(II .05)$$

$$C_p = \frac{v_{abs}}{V} = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \dots\dots\dots(II .06)$$

Où V_v est le volume des vides et V , le volume total apparente, étant la Porosité.

Les résultats de mesure donne :

Pour le sable alluvionnaire : $C_p = \frac{1.51}{2.54} = 0.59$ donc $p = 1 - C_p = \mathbf{0.41}$.

Pour le sable calcaire : $C_p = \frac{1.46}{2.59} = 0.56$ donc $p = 1 - C_p = \mathbf{0.44}$.

Le tableau II.5 résume les différentes propriétés physiques des deux sables utilisés.

Tableau II.5 : Propriétés physiques des deux types de sables utilisés.

Propriétés physiques	Normes utilisés	Sable alluvionnaire	Sable calcaire
Masse volumique absolue en (g/cm ³)	NF P 18-555 [147]	2.54	2.59
Masse volumique apparente en (g/cm ³)	NF P 18-555 [147]	1.51	1.46
Module de finesse	NF P 18-540 [148]	1.58	1.54
Equivalent de sable (%)	NF P 18-598 [149]	85	68,5
Coefficient d'absorption (%)	NF P 18-555 [147]	0,56	1,65
porosité	NF P 18-555 [147]	0.41	0.44

D'après les valeurs des caractéristiques physiques des sables utilisés on voit que le sable alluvionnaire est très propre et que le sable calcaire du fait qu'il renferme une proportion assez importante de fine son équivalent de sable est faible. D'autre part et en se référant aux valeurs du module de finesse on voit que le sable calcaire est plus fin que le sable alluvionnaire ceci aura une influence sur la maniabilité et la demande en eau des mortiers de sable. L'absorption du sable calcaire est largement supérieure à celle du sable alluvionnaire elle est huit fois la valeur du sable alluvionnaire, ce qui nécessite la prise en compte de la quantité d'eau absorbée par le sable calcaire l'hors du malaxage des mortiers à base de sable calcaire.

II.2.2. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, il représente 25 à 40 % du volume total du béton.

Le ciment utilisé est un ciment portland dont la dénomination est CPJ-CEM II/A selon la nouvelle normalisation algérienne. Les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques sont présentées dans les tableaux II.6, II.7 et II.8 (**Bederina .M;** 2007) :

Tableau II.6 : Propriétés physiques du ciment utilisé (Lafarge Algérie)

Masse volumique Absolue (ps) (kg/m ³)	Surface spécifique (A) (m ² /kg)	Temps de prise			
			Début (mn)	Fin (mn)	Durée (mn)
3076,92	289.04	à froid	2h 60mn	4h 10mn	1h 20mn
		à chaud	4h 10mn	1h 52mn	40mn

Tableau II.7 - Analyse chimique du ciment utilisé(Lafarge Algérie)

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
Quantité (%)	20.66	4.77	2.88	63.31	1.17	2.32	1.06

D'autre part, et d'après la formule de Bogue, les constituants principaux de ce ciment sont :

$$\begin{array}{ll}
 \text{C3} & = 57.88 \% \\
 \text{C2 S} & = 15.88 \% \\
 \text{C 3A} & = 7.20 \% \\
 \text{C4A} & = 8.75 \%
 \end{array}$$

Il est à noter que ces pourcentages respectent bien les limites recommandées pour les ciments usuels (**Dreux G., 1995**).

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les résistances mécaniques obtenues à différents âges sont:

Tableau II.8 : Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé

La résistance à 7 jours		La résistance à 14 jours		La résistance à 28 jours	
Rc (MPa)	Rt (MPa)	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Rc (MPa)	Rt (MPa)
21.60	06.33	30.50	08.74	38.50	09.87

D'après les caractéristiques mécaniques on voit bien que notre ciment est de bonne qualité.

II.2.3 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant « Medaplast SP40 » fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implantée à Oued Smar Alger. Le superplastifiant SP40 est une solution hydrosoluble de couleur marron, de pH égal à 8.2 et de densité de 1.22, spécialement formulé pour réduire la quantité d'eau de gâchage.

On utilise les super plastifiants pour réduire le rapport E/L, ce qui permet d'augmenter les résistances à la compression du béton tout en améliorant sa maniabilité.



Figure. II.5 superplastifiant « Medaplast SP40 »
Fabriqué en Algérie par la société GRANITEX

II.2.4 Fumée de silice

Les études sur le lien entre la granulométrie d'un béton et sa résistance mécanique ont conduit à proposer l'introduction d'une petite fraction d'éléments de taille plus réduite que celle des particules du ciment afin d'augmenter la résistance. Parmi les matériaux pouvant constituer ces éléments « fins », la fumée de silice qui présente un intérêt particulier car elle réagit chimiquement dans les mortiers et bétons en améliorant certaines propriétés telles que la maniabilité, la perméabilité, l'adhérence, et la résistance mécanique.

L'utilisation de la fumée de silice pour fabriquer des bétons à hautes performances est très répandue. Plusieurs recherches ont montré que certaines teneurs en fumée de silice dans le béton permettent d'améliorer la résistance en compression, le module d'élasticité et les propriétés mécaniques du béton au jeune âge (**Hung Nguyen ; 2013**).

Par ajout de fumée de silice a hauteur de 10% de la quantité de ciment , **ZHANG et GJORV** ont réussi a obtenir une résistance en compression a28 jours variant entre 57 et 104 MPA correspondant a une masse volumique des bétons de 1595 a 1880 kg/m³(**ZHA91-2**). Si une forte résistance au jeune âge est exigée (**yang ke ;2008**).

La fumée de silice (FS) a été incorporée avec le ciment dans le malaxeur et ce dans six mélanges de mortiers avec une proportion en masse de ciment de 10% et notamment en présence du super- plastifiant.

Tableau II.9: composition chimique de la fumée de silice (**yang ke 2008**)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	cao	mgo	K ₂ O	So ₃	Na ₂ O	si
%	89	0.3	0.9	0.3	1.5	1.7	0.3	0.6	3.2

II.2.5. les grains de liège

L'idée d'introduire des grains de liège dans des bétons de sable vient dans le but de se valoriser, premièrement, ces déchets et deuxièmement de profiter de certaines de leurs caractéristiques physiques (allègement, isolation thermique, isolation acoustique, etc).

- Rappelons que, grâce à leur structure poreuse, les grains de liège se caractérisent par une faible masse volumique et une bonne rugosité de surface.

Le liège utilisé dans cette étude est du liège expansé issu des déchets de l'industrie des panneaux de liège. Ces déchets sont emballés en sac. Une opération de tamisage a été menée au laboratoire afin de faire sortir un gamme de granulométrie à savoir 0/1.



Figure. II.6. Les grains de liège

II.2.5.1 Granulométrie

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

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats de liège expansé sont représentés dans le **Tableau II.10** et ses courbes granulométriques sont représentées sur la **figure II.7**.

Tableau. II.10. Analyse granulométrique par tamisage des grains de lièges

Tamis en (mm)	Refus partiels En (g)	Refus cumulés En (g)	Refus cumulés en (%)	Tamisats cumulés en (%)
1	0,00	0,00	0,00	100,00
0.630	77,20	77,20	25,73	74,27
0.500	31,10	108,30	36,71	63,29
0.315	63,18	171,48	57,16	42,84
0.250	45,52	217,00	72,34	27,66
0.160	49,23	266,23	88,75	11,25
0.125	13,00	279,23	94,66	5,34
0.100	7,20	286,43	95,48	4,52
0.080	8,55	294,98	98,33	1,67
fine	5,01	299,99	100,00	0,00

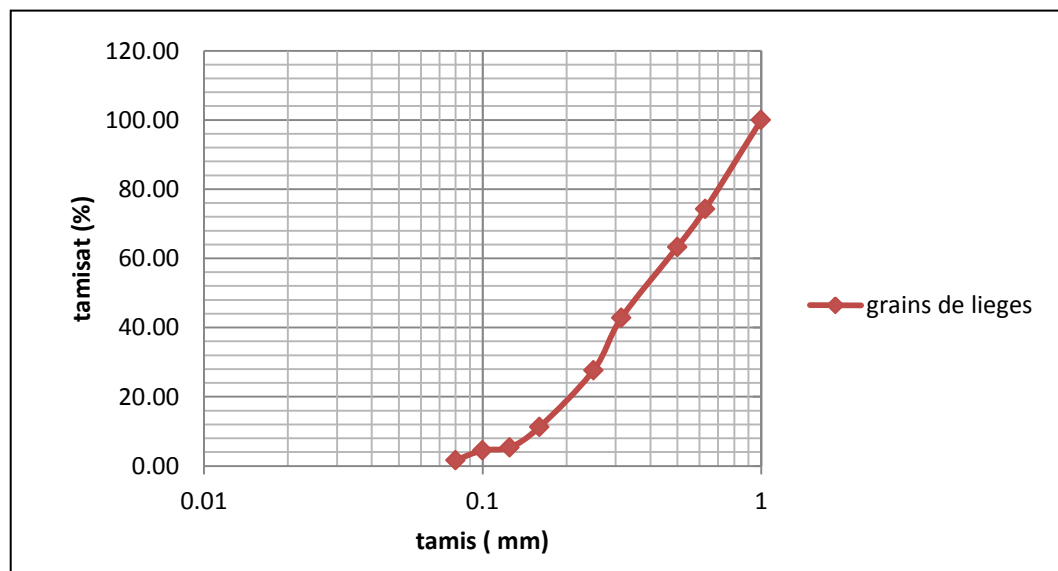


Figure. II.7 Courbes granulométriques des grains de lièges (0/1)

D'après la courbe granulométrique des granulats de liège ($D_{\max}=1 \text{ mm}$) on voit qu'il y a une bonne continuité des grains du liège. Ceci aura certainement un impact sur la rhéologie des bétons élaborés.

II.2.5.2. Masse volumique

La masse volumique d'un granulat léger est une caractéristique fondamentale influençant notablement les caractéristiques mécaniques des granulats légers et par conséquent les performances du béton. Différentes masses volumiques peuvent être définies

Pour les granulats selon le mode opératoire utilisé. On parlera, conformément à la norme **EN 1097-3**, de masses volumiques en vrac, réelle et absolue.

➤ **Masse volumique apparente**

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

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

On l'obtient par la relation suivante :

$$\rho_{app} = M_s/V \dots\dots\dots (II-7)$$

L'essai est répété trois fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

Où **Ms** est la masse des granulats mis en place sans tassement dans le récipient, et **V** le volume du récipient.

➤ **Masses volumiques réelles**

La masse volumique réelle des grains est définie comme le rapport de la masse d'un échantillon de granulat sur le volume de ses grains. Le volume des grains est délimité selon la norme EN 1097-6 par l'enveloppe extérieure du grain, pores compris. Les masses volumiques réelles comprennent la masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve, la masse volumique absolue et la masse volumique réelle saturée surface sèche. La définition de chaque notion est présentée en dessous. Les masses volumiques réelles sont déterminées par une seule opération en utilisant la méthode du pycnomètre selon la norme EN 1097-6. Par contre, nous n'éliminons pas les éléments fins inférieurs à 0,063 mm des granulats légers pour être plus représentatif de l'état réel des granulats lors du gâchage (**Hung Nguyen ;2013**).

Les granulats sont séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Après le séchage, ils sont immergés dans un pycnomètre rempli d'eau. Le pycnomètre est ensuite placé dans un bain d'eau à la température ambiante pendant 24 heures. A la suite de cette période, nous éliminons l'air occlus dans le pycnomètre puis le remplissons à nouveau à ras bord. La masse M2 du pycnomètre est mesurée après séchage de ses parois extérieures. En pesant le

pycnomètre rempli d'eau sans les granulats, nous obtenons la masse M3. Les granulats saturés sont ensuite égouttés pendant quelques minutes avant d'être séchés en surface. Les gravillons sont séchés en surface avec des chiffons mouillés pendant 15 secondes au maximum. L'état saturé surface sèche des granulats est atteint lorsqu'on ne voit plus les films d'eau autour des granulats. Ceux-ci gardant toutefois un aspect humide.

Il n'existe pas de norme pour les granulats légers 4 mm. Nous nous sommes basés sur la norme **EN 1097-6** pour les sables de densité normale en assurant toutefois une saturation de 24h. Les granulats fins sont séchés en surface en utilisant un faible courant d'air chaud venu d'un sèche-cheveux. Un moule tronconique est rempli d'une partie des granulats qui sont tassés légèrement à 25 reprises à l'aide d'un pilon. L'état saturé surface sèche des granulats fins est atteint dès que le cône s'effondre lorsqu'on soulève le moule.

Lorsque la vérification de l'état hydrométrique est satisfaisante, les granulats sont pesés pour avoir la masse M1. Enfin, la masse M4 est mesurée après le séchage des granulats dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

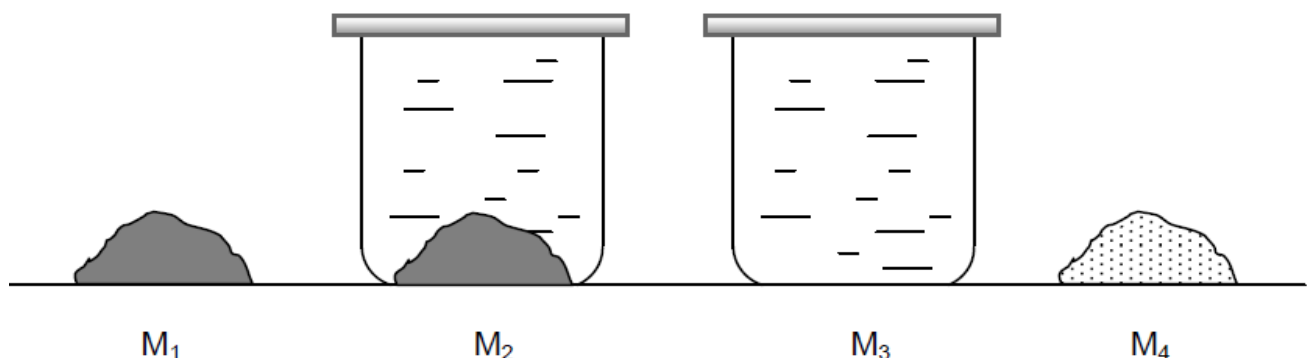


Figure II-8 : Schémas de principe de mesure des masses volumiques réelles

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

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

$$\text{prd} = \frac{M_4}{M_3 - (M_2 - M_1)} \dots\dots\dots (03)$$

- Masse volumique réelle saturée surface sèche **pssd** : elle correspond au rapport de la masse d'un échantillon de granulats y compris la masse de l'eau présente dans les

pores accessibles à l'eau sur le volume total des grains y compris le solide, les pores fermés et ceux accessibles à l'eau.

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_3 - (M_2 - M_1)} \dots\dots\dots (04)$$

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

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_3 - (M_2 - M_4)} \dots\dots\dots (05)$$

La porosité inter-granulaire des granulats est calculée à partir de la masse volumique en vrac et réelle. Elle s'écrit (Hung Nguyen ; 2013) :

$$P_{int} = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{rd}} \dots\dots\dots (06)$$

Les masses volumiques et la porosité inter-granulaire des **granulats de liège** sont présentées dans le tableau II-11.

Tableau II-11 : masse volumique de granulat léger et Porosité inter-granulaire

Granulat léger	Différents masses volumiques				Porosité inter-granulaire
	$\rho_{app}(kg/m^3)$	$\rho_{rd}(kg/m^3)$	$\rho_{ssd}(kg/m^3)$	$\rho_a(kg/m^3)$	P_{int}
liège	54.53	70.3	251	147	0.225

II.2.5.3. Mesure du coefficient d'absorption (NF P 18-555)

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau d'un granulat permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton. De plus, l'étude du comportement des granulats légers dans l'eau permet de compléter les données sur la porosité issue des mesures de masse volumique (yang ke 2008).

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après imbibition par l'eau à la masse sèche de l'échantillon. Le coefficient d'absorption W_a est ainsi défini par :

$$W_a = \frac{M_e}{M_s} * 100 \dots\dots\dots (07)$$

Ou M_e désigne la masse de l'eau absorbée et M_s la masse de l'échantillon après à l'étuve à 105° c.

Dans notre cas le coefficient d'absorption d'eau de granulat de liège : $W_a=257.9 \%$

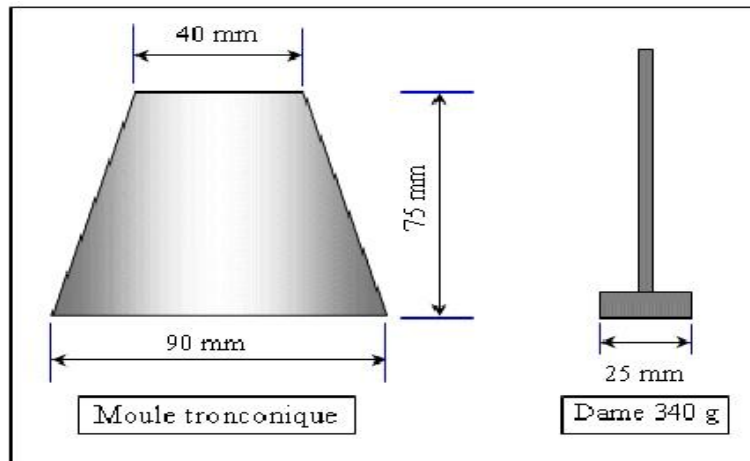


Figure. II .9: Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.

II.2.5.4. Cinétique D'Absorption des grains de liège

Le but de cette partie consiste à déterminer la capacité d'absorption des granulats utilisés dans ce travail, ainsi que la cinétique d'absorption. Pour cela, Ils ont été séchés au préalable dans l'étuve à $T= 105^{\circ}\text{C}$.

Le choix de cette température est lié au séchage conventionnel (température entre 50°C et 100°C).

Dans le procédé de saturation, l'eau est absorbée sous l'effet de saturation pendant différentes durées. Les échantillons sont posés dans un récipient qui se compose d'un papier filtré superposé sur un tamis de 0.04mm d'ouverture, ces derniers sont pose dans un récipient d'eau.

Le suivi de la masse est effectué par pesée à chaque instant jusqu'à la saturation. L'eau absorbée représente le poids d'eau qu'un échantillon peut absorber jusqu'à sa saturation. Donc l'absorption est définit comme une quantité d'eau absorbée à l'instant (t) par rapport à la masse sec de l'échantillon [08] .

$$\text{Taux d'absorption (\%)} = \frac{m(t) - m_s}{m_s} * 100 \quad \dots\dots\dots(09)$$

D'où - t- instant où s'effectue la pesée (minutes ou heures)

$m(t)$:La masse de l'échantillon après l'absorption (en gramme), à l'instant t.

m_s : La masse sèche en gramme

II.2.5.5. Cinétique désorption des grains de liège

L'objectif du procédé de désorption est de mesurer la vitesse de fuite de l'eau à partir des grains et la quantité retenue par les grains de liège. Les échantillons sont posés dans un récipient qui se compose d'un papier filtré superposé sur un tamis de 0.04mm d'ouverture, ces derniers sont posés dans un récipient d'eau. Le liège est immergé dans l'eau pendant 24 heures ; après quoi il est retiré. Nous mesurons le changement du poids de l'échantillon (selon le temps réglé) à l'aide d'une balance intégrée de précision (0.001gramme) durant tout le procédé de séchage.

La cinétique désorption est étudiée à travers les suivants :

- La teneur en eau massique $H(\%)$ en fonction du temps
- Le pourcentage de pertes massiques en fonction du temps

$$H(\%) = \frac{m^*(t) - m_s}{m_s} * 100 \dots\dots\dots(10)$$

m_s : La masse anhydre de l'échantillon (ou $H(\%)=0$).

$m^*(t)$: La masse de l'échantillon après le séchage, à l'instant t .

Ainsi que, le pourcentage massique de perte d'eau est calculé par la formule:

La teneur en eau massique (taux d'humidité) est égale à la masse d'eau comprise dans ce liège pendant le séchage par rapport à la masse anhydre (la masse sèche) [Ben Mansour.N ; 2015]:

$$\text{perte}(\%) = \frac{m_0 - m^*(t)}{m_0} * 100 \dots\dots\dots(11)$$

m_0 : La masse initiale de l'échantillon (avant le séchage).

II.2.6. 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** et **EN 1008** 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 carbonatation, 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.3. Elaboration des différentes formulations :

Après l'analyse et caractérisation de tous les constituants, nous présentons les principaux essais faits dans laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat sur les

propriétés des mortiers de liège à base de deux types de sable (sable de calcaire et sable alluvionnaire).

Les mortiers sont conservés en de deux milieux différents :

- Conservation dans l'eau ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; 100% HR)
- Conservation à l'air libre à l'intérieur du laboratoire ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; 45% HR)

➤ **Formulation des bétons élaborés :**

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

➤ **Formulation du béton témoin :**

L'étude de la composition d'un béton de sable consiste à définir le mélange optimal des différents constituants dont on dispose ainsi que le dosage en eau.

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

- Dosage en ciment

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

- Optimisation du dosage en eau :

Pour un dosage en ciment $C/S=1/3$, on a procédé à la confection d'une série d'éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ en faisant varier le rapport E/C d'une valeur minimale de 0.40 à une valeur maximal de 0.65. Après 07 jours on soumet ces différents échantillons à l'essai d'écrasement par compression. Le pourcentage d'eau optimum est celui qui fournit la résistance à la compression maximale.

➤ **Proportions et dimensions des granulats employées :**

Cette étude est consacrée à une étude de faisabilité des bétons de sable allégés par les granulats de liège. Dans cette étude une seule dimension de granulats de liège est utilisée, il s'agit de la granulométrie 0/1. Avec des proportions de substitution ascendantes de 20% à 60% par pas de 10. Le but de cette étude est de voir si l'utilisation des granulats de liège est bénéfique en termes de mise en œuvre, de maniabilité, de résistance, d'isolation..., etc.

➤ **Les compositions du béton**

Les compositions retenues des mortiers sont regroupées dans le **Tableau II-12** ci-dessous :

Tableau II-12 Composition des différents constituants des mortiers préparés

		E/C	S/C	fumée de silice (%)
Mortier 01	Mortier a base de sable alluvionnaire	0.60	1/3	00
Mortier 02	Mortier a base de sable de calcaire	0.60	1/3	00
Mortier 03	Mortier a base de sable alluvionnaire+ fumée de silice	0.60	1/3	10
Mortier 04	Mortier a base de sable de calcaire+ fumée de silice	0.60	1/3	10

- plus des différents pourcentages de granulat de liège et de super-plastifiant

séries	S0	S1	S2	S3	S4	S5
G/S (%)	00	20	30	40	50	60
superplastifiant(%)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

-Les compositions du béton sont mentionnées dans les tableaux (**II-13 et II-14**) suivant pour 1 m^3 :

Tableau II-13 : Composition des mélanges à élaborer sans fumée de silice.

séries	G/S (%)	Liège (kg)	sable (kg)	ciment (kg)	eau (Kg)	eau absorbant par le liège (kg)	eau totale (kg)	Super-plastifiant (kg)
série 0	0	0	1380,00	460,00	276	0	276	2,30
série 1	20	41,8	1104,10	368,03	220,82	107,8	328,66	3,68
série 2	30	62,7	966,10	322,03	193,22	161,8	354,98	4,83
série 3	40	83,61	828,08	276,02	165,616	215,7	381,32	5,52
série 4	50	104,50	690,07	230,02	138,014	269,6	407,64	5,75
série 5	60	125,41	552,06	184,02	110,412	323,6	433,96	5,52

Tableau II-14 : Composition des mélanges à élaborer avec fumée de silice.

séries	G/S (%)	Liège (kg)	sable (kg)	ciment (kg)	eau (kg)	eau absorbant par le liège (kg)	eau totale (kg)	Super-plastifiant (Kg))	Fumée de silice(kg) (F/C=10%)
série 0	0	0	1380,00	414,00	276	0	276	2,30	46,00
série 1	20	41,8	1104,10	331,23	220,82	107,8	328,66	3,68	36,80
série 2	30	62,7	966,10	289,83	193,22	161,8	354,98	4,83	32,20
série 3	40	83,61	828,08	248,42	165,616	215,7	381,32	5,52	27,60
série 4	50	104,50	690,07	207,02	138,014	269,6	407,64	5,75	23,00
série 5	60	125,41	552,06	165,62	110,412	323,6	433,96	5,52	18,40

Après 28 jours de cure normale (immersion dans l'eau) , les 03 éprouvettes de chaque série ont été soumises aux essais destructifs (écrasement) pour déterminer la résistance du béton. et les 03 éprouvettes restants sont utilisés pour les autres essais .

II.4. Préparation des matériaux

En générale deux procédés sont utilisés quant à la préparation des granulats certains auteurs utilise les granulats secs et réalise un malaxage à sec de tous les composants du matériau il faut juste ajouter la quantité d'eau qui sera absorbée par les granulats pendant le malaxage. D'autres réalisent un pré- mouillage des granulats. Dans notre travail, nous avons choisi la première méthode.

Entre temps le sable et le ciment sont malaxés à sec pendant 1mn, puis on ajout les 2/3 de la quantité d'eau et on laisse malaxer pendant deux autres minutes puis on rajoute le tiers restant de la quantité d'eau avec du super plastifiant dilué dedans et on laisse malaxer pendant une minute ensuite on rajoute par partie pendant 4 minutes la quantité de granulats nécessaire.

Le choix des dimensions du moule est fixé par la norme NF P.18-400. Il doit satisfaire le critère de l'échelle de volume représentatif, stipulant ainsi que la plus petite dimension du moule doit être largement supérieure à la dimension du plus gros granulats. De plus, les dimensions permettent de réaliser les essais de caractérisation recherchés. Pour la caractérisation physico-mécanique des bétons élaborés dans ce travail, un type de moule ont été choisis pour réaliser les essais il s'agit des dimensions : 4x4x16cm, (**Figure. II.10**).



Figure. II.10: Confection des éprouvettes de béton de liège.

Préparation des éprouvettes :

- On utilise des moules prismatiques de dimension $4 \times 4 \times 16$ cm.
- On doit nettoyer les moules à l'aide d'une brosse métallique puis on étale avec l'huile pour faciliter le démoulage.
- On verse le mortier dans les moules prismatiques.
- On remplit les éprouvettes puis on les vibre pour éliminer les bulles d'air.

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

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

II.5. Techniques expérimentales

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

II.5.1. Essais réalisés sur le béton frais

II.5.1.1. Essai d'écoulement (NF P18-452)

L'essai d'écoulement effectué selon la norme NF P18-452 est choisi pour l'étude de la maniabilité du mortier à l'état frais. Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un maniabilimètre à mortier type B de dimensions (180x90x90mm) disponible au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. Il s'agit du temps nécessaire à un volume de mortier pour atteindre un trait repère tracé sur le maniabilimètre sous l'effet des vibrations entraînées par un moteur.

L'appareil utilisé est appelé maniabilimètre B" et est schématisé sur la figure ci-dessous. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

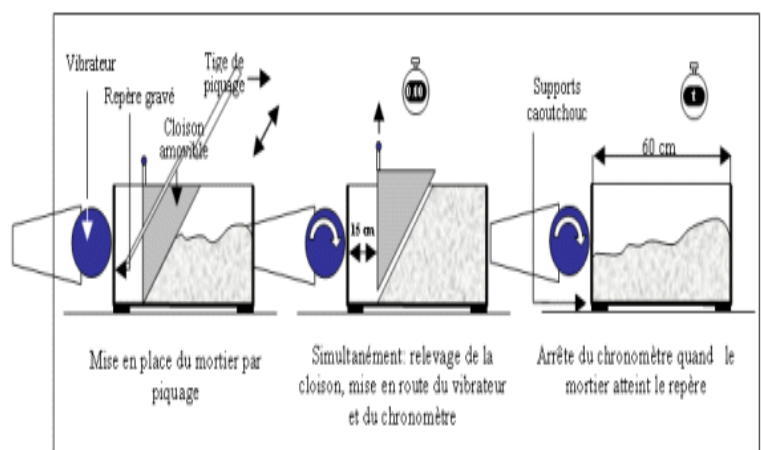


Figure. II.11. Maniabilimètre B (180x90x90mm).

La maniabilité est un critère très important dans la formulation d'un béton, elle est nécessaire pour assurer la bonne adhérence et une bonne mise en œuvre du béton.

II.5.2. Les caractéristiques physico-mécaniques

Dans cette partie on étudie les caractéristiques physico-mécaniques des éprouvettes après conservation dans la chambre humide pendant 28 jours pour chaque type d'éprouvette.

Les essais de flexion à 3 points sur éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16$ cm et des essais de compression sur les moitiés d'éprouvette.

II.5.2.1. Essais de flexion et compression sur éprouvettes 4x4x16 mm

Le comportement mécanique de tous les mortiers a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression uni axiale sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 mm.

A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple sur une machine d'essais de résistance à la flexion de marque "CONTROLS" permettant d'appliquer des charges jusqu'à 100 KN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la figure II-12.

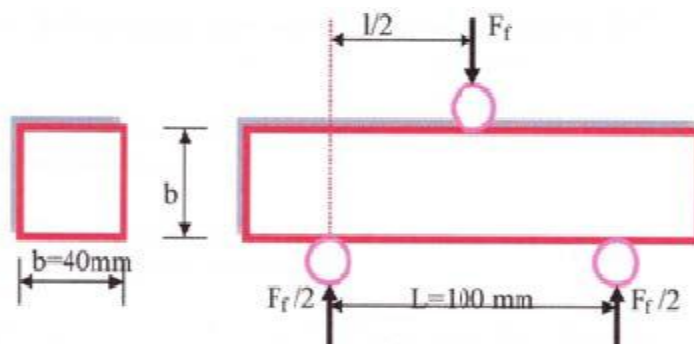


Figure II.12. Dispositif de flexion par trois points.



La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure ci-dessus. Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est (Dupain. R, Lanchon. R, Saint-Arroman J.C ;2000) :

$$R_f = \frac{1.5 F_f l}{b^3} \dots\dots\dots (12)$$

Les six morceaux d'éprouvettes obtenue après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni axiale sur le bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ (Dupain. R, Lanchon. R, Saint-Arroman J.C ;2000).

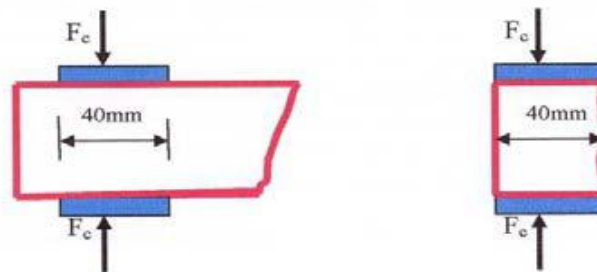


Figure II.13. Ruptures en compression.

La contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \dots\dots\dots (13)$$

II.5.3. Caractérisation hydrique

II.5.3.1. Essai de capillarité (Sorptivité)

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Avant les mesures de la Sorptivité, les échantillons seront prés conditionnés dans l'étuve à environ 105°C jusqu'à une masse constante. L'essai de Sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué à la figure II-14 de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par un film plastique sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

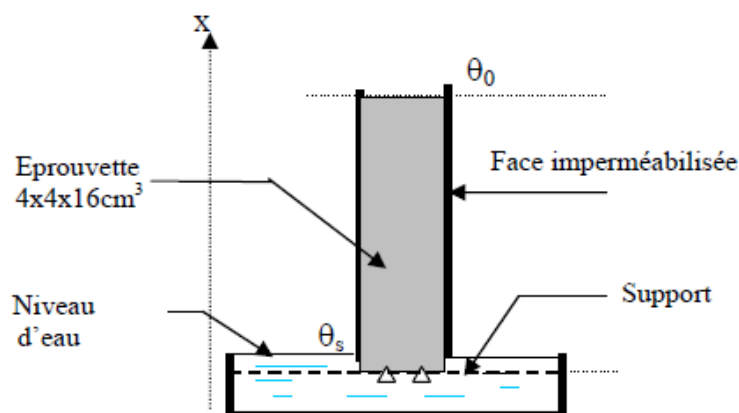


Figure II.14. schéma de l'essai de capillarité.

Ce paramètre hydrique est déterminé en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'éprouvette 4x4x16 cm³ en fonction de la racine carrée du temps. Cette évolution est caractérisée en général par deux tronçons linéaires. Le premier, qui est caractérisé par une pente assez importante, est utilisé pour la détermination de la sorptivité du matériau (Bederina.M ;2007).

$$i = S_w \sqrt{t} \dots\dots\dots(13)$$

Où S_w est la sorptivité du matériau et i le volume d'eau absorbée par unité de surface.



Figure. II.15.Montage expérimental utilisé dans l'essai d'absorption.

II.4.4. Etude de Retrait (NFP 15-433)

Il consiste à mesurer la variation dimensionnelle longitudinale relative par rapport à la longueur initiale de l'éprouvette après 24 heures de moulage ($L_0 = 16\text{cm}$). L'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. On prend la moyenne des trois mesures sur trois éprouvettes.

Si la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03 mm celle de l'éprouvette avant la variation la plus voisine. Il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact, descellement des plots ...etc.) et si celle-ci peut être éliminée l'éprouvette doit être rebutée.

L'appareil de l'essai (**figure II.16**) doit être étalonné avant chaque série de mesures avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette.

$$\frac{\Delta L}{L} = \left| \frac{L_f - L_i}{16} \right| \dots\dots\dots(14)$$

Le retrait étant exprimé par :

L_f : La longueur finale;

L_i : La longueur initiale;

L_0 : La longueur initiale après 24heures de moulage. ($L_0 = 16\text{ cm}$)

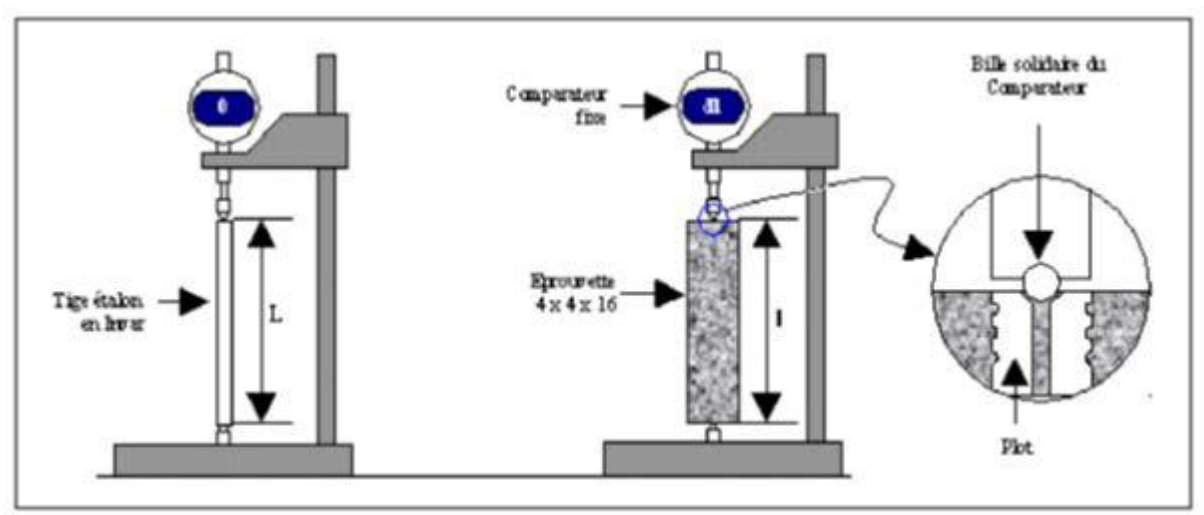


Figure II.16. Appareillage pour la mesure du retrait.



Figure. II.17 :Appareil de retrait utilisé.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont (Yahia .M ;2015/2016) :

- La nature du ciment (la proportion de certains constituants a une action défavorable sur la valeur totale du retrait) ;
- La finesse de mouture ;
- Le dosage en ciment, dans le béton ;
- Le dosage en eau ;
- La propreté et la nature des granulats ;
- La protection après coulage

II.5.5. Masse volumique apparente

Par définition la masse volumique apparente sèche ρ est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent à l'état sec V_t . L'état sec est obtenu par séchage de

l'échantillon dans l'étuve ventilé jusqu'à masse constante. Les pesées sont effectuées à 0.01g près et les dimensions des échantillons sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0.01 cm, la masse volumique apparente est la moyenne des mesures effectuées sur 3 éprouvettes de chaque composition selon la norme **EN 12390-7**.

II.5. 6. Caractéristiques thermiques

Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels: la conductivité thermique « λ » et la diffusivité « a ». Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et des conditions de conservation (rôle de l'eau).

Cette partie est consacrée à l'étude du phénomène de conduction en milieu sec et saturé de manière expérimentale. Dans notre travail expérimental on a pu réaliser l'essai thermique permettant de calculer la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique α .

La **diffusivité thermique** « a » d'un matériau exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en (**m²/s**).

Tandis que la **conductivité thermique** « λ » exprimée en **W.m⁻¹. K⁻¹**, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur (**RILEM ; 1970**).

Pour cette mesure il existe plusieurs méthodes d'essai, nous avons utilisé dans notre cas la méthode dite de la Source Plane TPS (**Goual M. S ;2001**).

II.5.6.1. Technique de la Source Plane TPS

II.5.6.1.1. Avantages de la méthode TPS

Les principaux avantages de la technique TPS (Transient Plane Source ou Hot Disk) sont(**Saiti Issam ;2014**):

- Elle ne demande pas un matériel sophistiqué ;
- Elle peut faire la mesure de plusieurs paramètres thermiques à la fois ;
- Elle peut être utilisée pour la mesure d'une large gamme de propriétés et dans différentes conditions (liquides, hautes et basses températures, plaques...) ;
- L'utilisation de capteurs avec une grande surface permet de couvrir une grande surface à l'échelle du volume élémentaire représentatif ;

- Les mesures peuvent être faites sur des échantillons de diverses formes et de différents tailles, à condition de posséder au moins une surface plane ;
- Elle est utilisable pour la mesure des propriétés thermo-physiques des matériaux anisotropes ;
- **Démarche expérimentale**

La conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique par unité de volume de chaque mortier durcis, ont été déterminées en utilisant la technique Hot Disk TPS 1500 de Thermal Constant Analyzer Test System (**Photo II.18**) disponible au niveau du laboratoire de génie civil, division : Développement et Valorisation des Matériaux Locaux « Durabilité et Transfert thermique » de l'université de Laghouat.



Figure. II.18. Mesure de propriétés thermique à l'aide du system «Hot Disk».

L'essai consiste à serrer la sonde de dimensions (40x60mm) celle dans la (**Photo II.19**) entre deux échantillons des mêmes dimensions (40x40x80mm) selon un dispositif sandwich tenus entre un support (voir **Photo II.20**) afin d'empêcher de bouger les échantillons, ensuite on délivre un flux de chaleur d'une puissance égal à (0.25W) pour l'état saturé des échantillons et (0.55W) pour l'état sec. On obtient par la suite le graphe des températures expérimentales T0 enregistrées à chaque seconde (**SAITI ISSAM ;2014**).



Figure. II.19. Dispositif de serrage.



Figure. II.20. La sonde **Hot Disk**.

La durée totale du régime transitoire varie de 40 à 80 secondes selon chaque état (saturé ou sec). Le thermographe enregistrant l'élévation de la température dans la sonde TPS a montré que l'évaluation des paramètres thermiques peut être effectuée en utilisant une plage de points de mesures située entre 60 à 160 de chaque série de mesure(SAITI ISSAM ;2014).

II.6. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation des essais de caractérisation du matériau étudié, du matériel associé ainsi qu'à l'élaboration des composites qui font l'objet de cette étude.

Deux types de sable, ainsi que du ciment CPJ-CEM II/A, ont été sélectionnés pour fabriquer des mortiers utilisés dans cette étude. Les procédures expérimentales, qui illustrent le comportement physique et mécanique des mortiers, ont été réalisées avec l'ajout de granulats légers (grains de liège) avec cinq pourcentages différents (20% -30% -40% -50% -60%) avec ou sans les additions minérales (fumée de silice 10%).

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de nos travaux expérimentaux, relatifs à quatre types de mélange de mortier, élaboré en six séries d'éprouvettes avec différents pourcentages des grains de liège, pour faire les essais suivants :

1. Mesure de la densité (ρ).
2. Mesure de la résistance à la compression (R_c) et flexion (R_f).
3. Mesure de la sorptivité.
4. Mesure de la variation dimensionnelle .
5. Mesure des caractéristiques thermique .

III. 2. Présentation des résultats

III.2.1. Détermination du rapport E/C

➤ Etude l'ouvrabilité du béton de sable en fonction du rapport E/C

Pour étudier l'ouvrabilité de notre béton et pour apprécier son écoulement en fonction de la teneur en eau, et déterminer le rapport E/C permettant de procurer la meilleure ouvrabilité. Cinq (5) compositions de différents rapports E/C ont été testées.

Pour chaque composition, on a essayé de mesurer le temps d'écoulement du mortier à l'aide d'un maniabilimètre type B, et déterminer par la suite, le pourcentage E/C procurant une meilleure ouvrabilité.

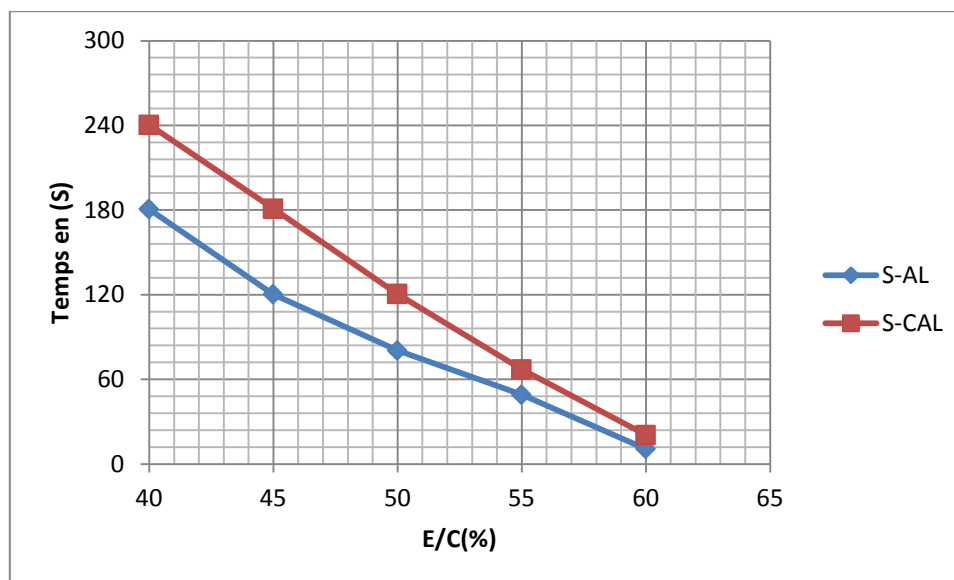
La figure III.1 représente l'évolution du temps d'écoulement du mortier (sable de calcaire, ciment) et (sable alluvionnaire, ciment) en fonction du rapport E/C. Ces résultats montrent que le temps de maniabilité diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau. En partant d'un rapport E/C=0,40 à E/C = 0.55 pour le mortier de sable alluvionnaire à E/C=0,60 pour le mortier de sable calcaire. Pour le mortier de sable alluvionnaire (temps d'écoulement est égale à 12.59 secondes) et pour le mortier de sable de calcaire (le temps d'écoulement égale à 20.53 secondes).

A noté que la plasticité de la pâte est jugée bonne pour un temps d'écoulement au maniabilimètre compris entre 7 à 10 secondes (**Sablocrete ; 1994**).

- Pour ce la, dans notre cas, nous devons utiliser un superplastifiant « Medaplast SP40 » pour améliorer la maniabilité.

Tableau III.1 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.

	E/C (%)	40	45	50	55	60
Temps (s)	(SA)	180.56	120.23	80.37	49.10	10.59
	(SC)	240.43	180.96	120.44	67.02	20.53

**Figure III.1 :** Evolution du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.

D'après la courbe ci-dessus on voit que le mortier à base de sable alluvionnaire présente une meilleure ouvrabilité par rapport au mortier à base de sable calcaire, cela est dû au fait que le sable calcaire renferme une quantité de fines qui absorbe davantage d'eau.

➤ Etude de la variation de la résistance en fonction du rapport E/C

Les résultats de l'évolution de la résistance à la compression des deux types de mortiers de sable en fonction du rapport E/C sont illustrés dans **Tableau III.1** et les **figure III.2** et **III.3**.

Tableau III.02 : Valeurs de la résistance en compression en fonction du rapport E/C

Dosage en eau (E/C)		0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
Résistance à la compression (MPa)	S-AL	12.59	18.37	21.24	21.67	24.18	20.84
	S-CAL	11.43	13.36	14.58	18.46	21.66	19.09
Résistance à la traction par flexion (MPa)	S-AL	3.07	3.86	5.89	6.33	7.64	7.20
	S-CAL	2.76	3.30	3.46	5.40	7.25	6.29

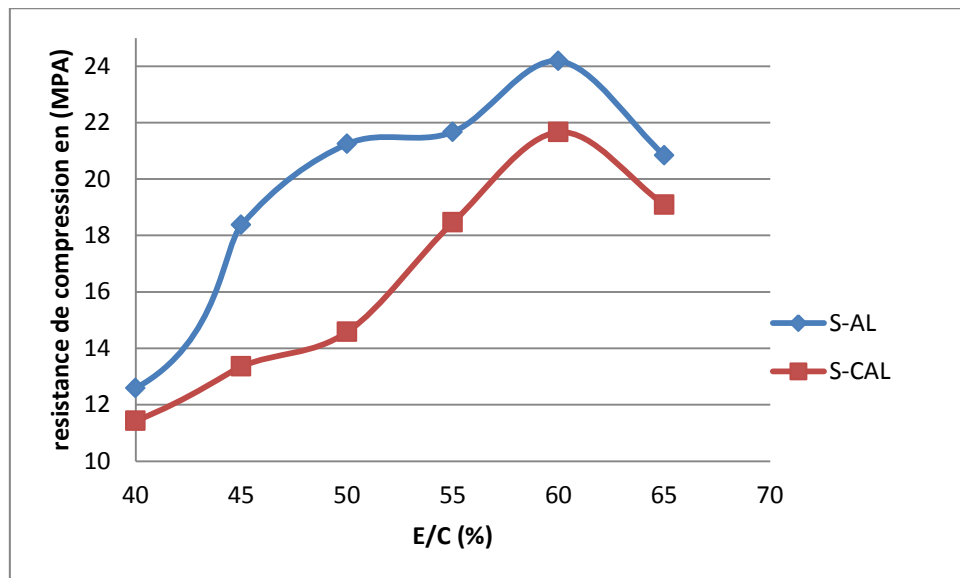


Figure III.2 : Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C après (7 jours)

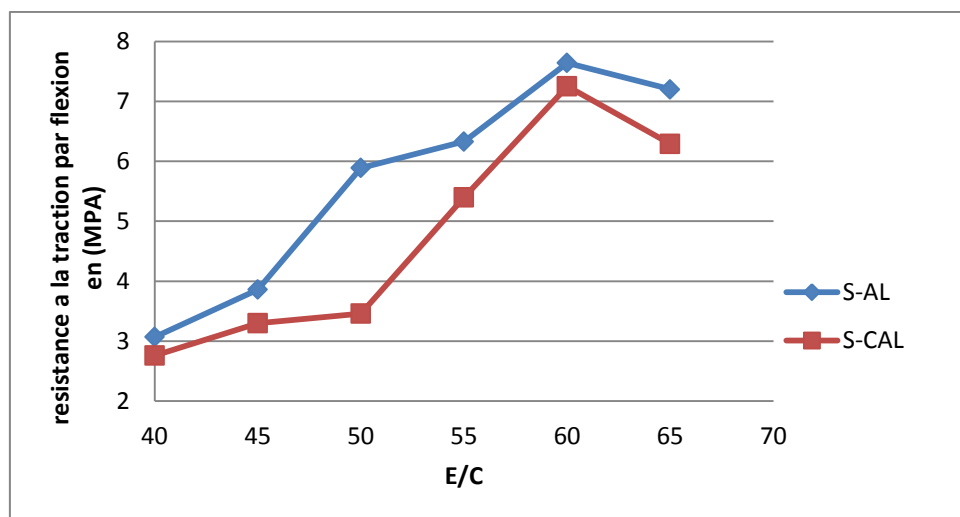


Figure III.3 : Variation de la résistance à la résistance a traction par flexion en fonction du rapport E/C après (7 jours)

Les figures (**Figure III.2.-Figure III.3**) présentent l'évolution de la résistance pour les deux types de mortier et il permet de voir que la résistance du mortier de sable alluvionnaire plus élevé par rapport à la résistance du mortier de sable de calcaire.

D'après les résultats obtenus, on voit que l'optimum des résistances correspond à un rapport $E/C=0.6$. Ce rapport est maintenu pour déterminer la quantité de l'eau de gâchage des bétons élaborés à laquelle on doit ajouter la quantité nécessaire pour compenser le taux d'absorption des granulats.

III.2.2. Détermination du pourcentage de fumée de silice

Pour déterminer la pourcentage de fumée de silice et leurs effets sur les propriétés mécaniques du béton, Nous avons ajouté des différents pourcentages de fumée de silice au mélange de mortier (SA). Cinq (5) compositions de différents rapports FS/C ont été testées, Le rapport (FS/C) varie de 2 à 10% avec un pas de 2 %.

Les figures III.4 et III.5 représentent l'influence de proportion de fumée de silice sur la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion.

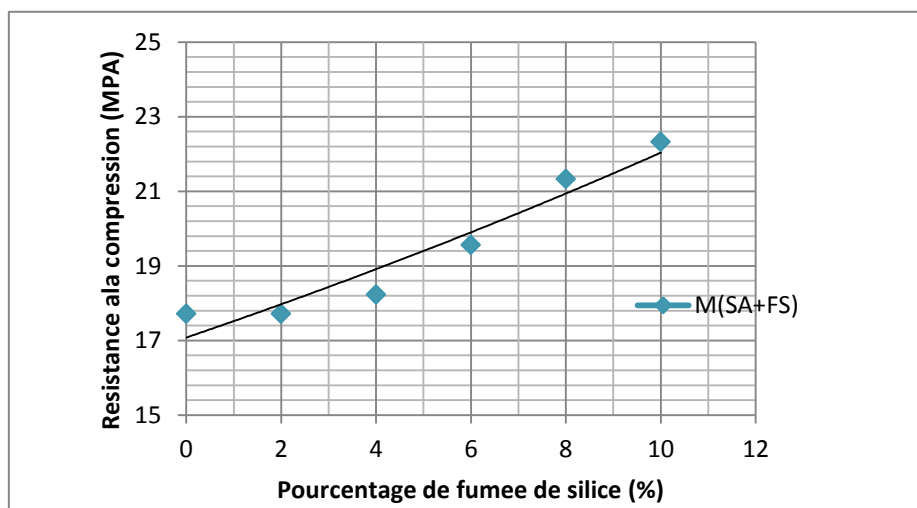


Figure III.4 : influence du fumée de silice sur la résistance a la compression après (7 jours)

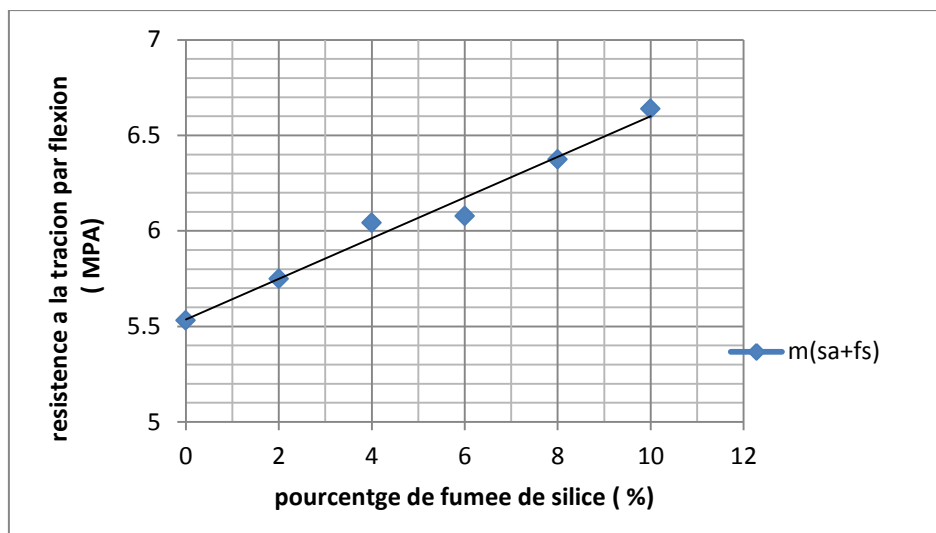


Figure III.5 : influence du fumée de silice sur la résistance de traction par flexion après (7 jours)

Conformément aux résultats rapportes par la bibliographique, Les figures (III.4 et III.5) ont montré que la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion augmentent progressivement avec l'augmentation du taux de fumée de silice, et commencent à diminuer à parti de 30% selon quelques auteur (Hung Nguyen ; 2013). C'est pourquoi nous

avons choisi d'ajouter **10%** de fumée de silice aux mortiers en raison de son prix élevé et du maintien de l'aspect économique qui est l'un des objectifs de cette étude.

III.2.3 Détermination de la quantité d'eau absorbée

III.2.3.1 Cinétique d'adsorption et la désorption de grains de liège

La cinétique d'absorption est mesurée pour déterminer le point de «saturation».

Tableau III.03 : Coefficient d'absorption d'eau des grains de liège et la teneur en eau massique $H(\%)$

Le temps (heurs)	taux d'absorption d'eau (% massique)	la teneur en eau massique $H(\%)$
5 min	165,14	709,13
10 min	202,62	678,38
15 min	240,09	655,35
30 min	288,13	637,43
1h	337,35	617,72
2h	388,45	586,49
4h	484,47	555,39
24h	542,47	205,58
48h	643,83	75,72

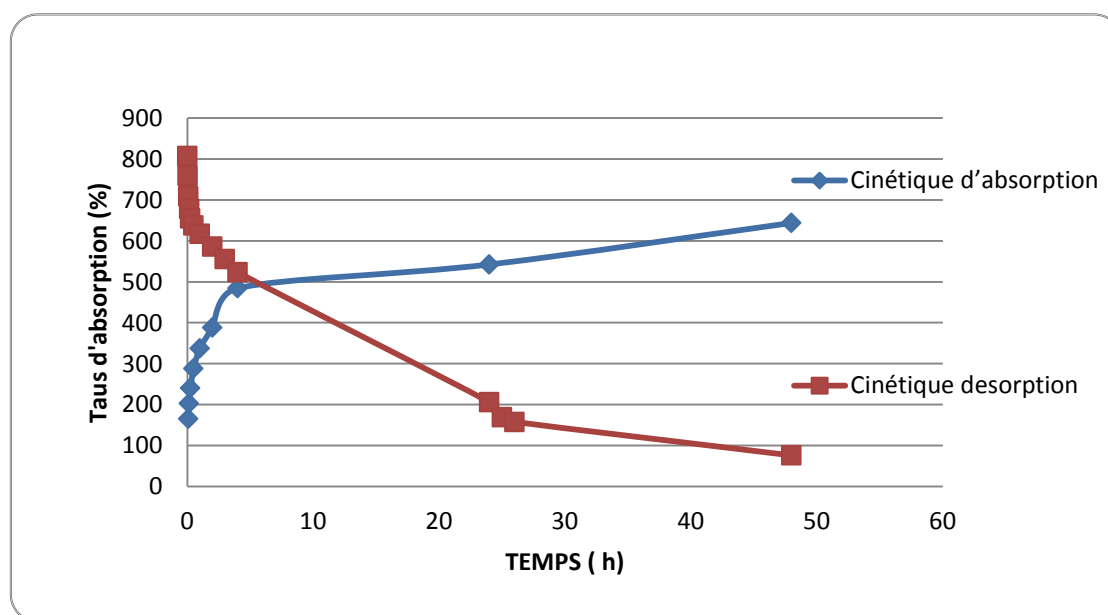


Figure III.6: Cinétique d'adsorption et la désorption de grains de liège

Les coefficients d'absorption d'eau des granulats sont présentés dans le Tableau III.1 et dans la Figure III.6. Plus de 50% de l'eau est absorbée au cours des 4 premiers heurs. L'absorption d'eau ralentit après 24 heures. Il sera donc préférable d'immerger les granulats pendant 48 heures puis les distillations. Cela conduit à un meilleur contrôle du rapport E/C.

Le coefficient d'absorption d'eau à 48 heures sera donc utilisé pour calculer les formulations de béton.

III.2.4 Essai d'écoulement (NF P18-452)

La figure III.6 montre que la maniabilité est bonne jusqu'à 40%, faible à 50% et sèche à 60%. En général, nous observons que les manœuvres diminuent si la quantité de granulats de liège augmente.

A noter également que la maniabilité du mélange de sable alluvionnaire (SA) est meilleure que celle du mélange de sable calcaire (SC) cela est au fait que le sable de calcaire renferme des quantités de fines qui absorbent de l'eau et réduisent ainsi la maniabilité et que l'ajout de fumée de silice (FS) réduit la maniabilité d'un taux plus ou moins important du fait que la fumée de silice est plus fine que le ciment.

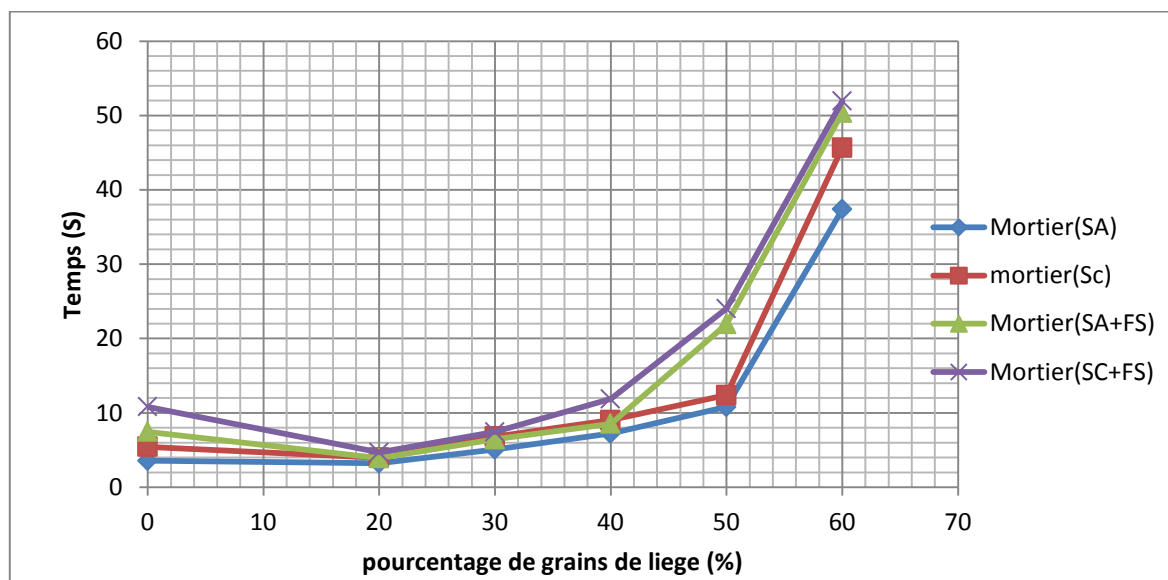


Figure III.7 : Evolution du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de liège.

III.2.5 La masses volumiques à l'état sec

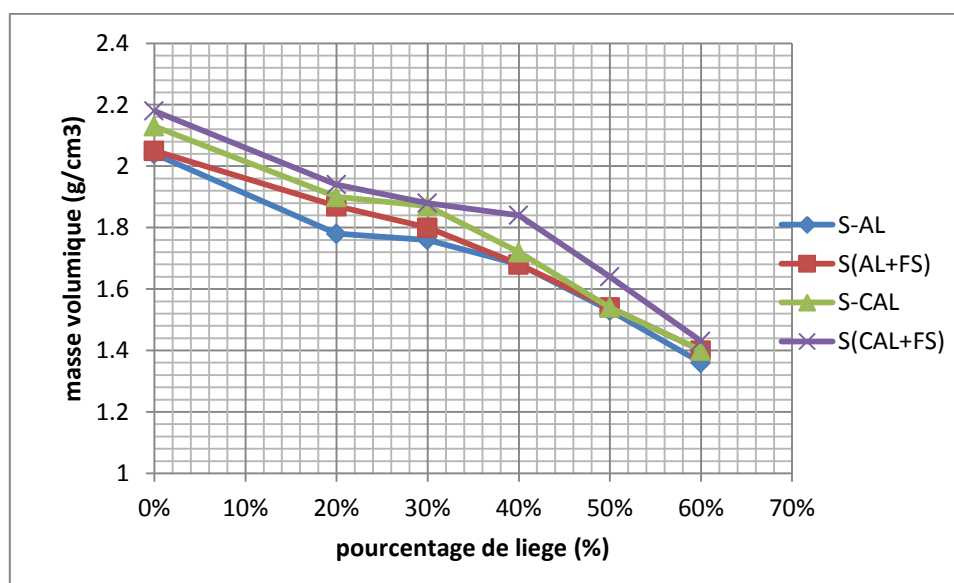
La masse volumique des bétons légers est l'une des caractéristiques les plus importantes. Sur la base des valeurs de cette caractéristique nous pouvons classer notre béton et indiquer son domaine d'application. Elle est définie comme le rapport de la masse de l'échantillon à son volume apparent à l'état sec.

Les masses sèches des bétons durcis ont été déterminées par pesée à l'âge de 28 jours après séchage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Le tableau III.4 donne les valeurs moyennes de la masse volumique apparente sèche en fonction des différents pourcentages de résidus de liège.

Tableau III.04 : variation de la masse volumique en fonction des pourcentages de résidus de liège.

Pourcentage de grains de liège (%)	Masse volumique apparente (g/cm ³)			
	Mortier (S-AL)	Mortier (S-CAL)	Mortier (S-AL+ FS)	Mortier (S-CAL+FS)
00%	2.04	2.13	2.05	2.18
20%	1.78	1.90	1.87	1.94
30%	1.76	1.87	1.80	1.88
40%	1.68	1.72	1.68	1.84
50%	1.53	1.54	1.54	1.64
60%	1.36	1.40	1.40	1.43

La figure III.8 permet de constater que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le pourcentage de grains de lièges augmente.

**Figure III.08 :** variation de la masse volumique en fonction de pourcentage des grains de liège.

D'après la figure III.8 nous pouvons voir que la densité pour les quatre mélanges diminue au fur et à mesure qu'on ajoute d'avantage de grains de liège cela est tout à fait logique puisqu'on remplace une entité plus dense par une même entité moins dense qui est le liège. D'autre par on peut voir sur la figure que le béton à base de sable calcaire est plus dense que celui à base de sable alluvionnaire qui est due à la présence des fines calcaire qui comblent les vides et rendent le matériaux plus dense.

III.2.6 Propriétés mécaniques

Les résultats sont basés essentiellement sur les seuls essais disponibles dans le laboratoire qui sont ceux de compression, et de traction par flexion.

Comme pour la plupart des autres matériaux, la résistance du béton est fondamentalement dépendante des vides qu'il comporte. Elle est très influencée par le volume des vides : air occlus, pores capillaires, pores de gel et air entraîné. Dans notre cas, l'ajout de liège confère au béton de sable une porosité considérable. Cette porosité est d'autant plus élevée que la teneur en liège est plus grande. C'est pour cette raison que nous nous sommes basés, dans l'étude de la résistance mécanique de nos composites, sur l'effet de la proportion des résidus de liège. L'effet de la proportion des fillers, vu leur importance pour les bétons de sable, a été également étudié [Bederina.M; 2007].

Nous présentons dans le **tableau (III.5 ; III.6) et les Figure (III.8 ; III.9 ; III.10 et III.11)** les résultats des résistances à la compression et la résistance à la flexion des différents bétons élaborés à l'âge de 28 jours.

Tableau III.05 : les résultats des résistances à la compression des différents bétons

Pourcentage de grains de liège (%)	Résistances à la compression (MPa)			
	Mortier (SA) Rc28 (MPa)	Mortier (SC) Rc28 (MPa)	Mortier (SA+FS) Rc28 (MPa)	Mortier (SC+FS) Rc28 (MPa)
00%	24.05	20.65	26.53	24.23
20%	13.04	12.24	16.68	15.90
30%	12.65	10.30	16.12	14.04
40%	5.19	5.01	7.81	7.52
50%	3.97	3.35	6.38	5.40
60%	2.35	1.63	3.60	2.91

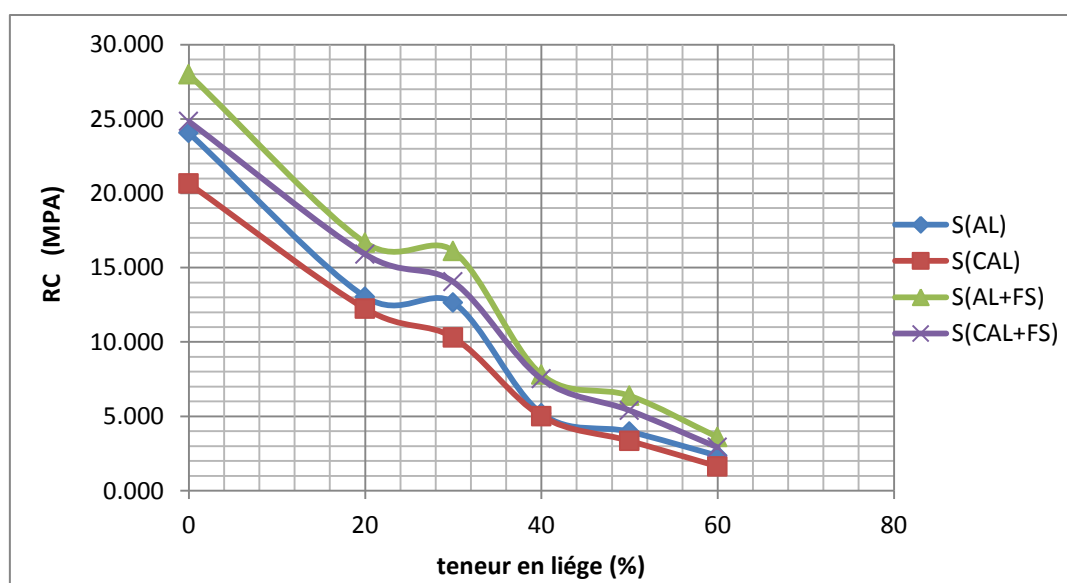
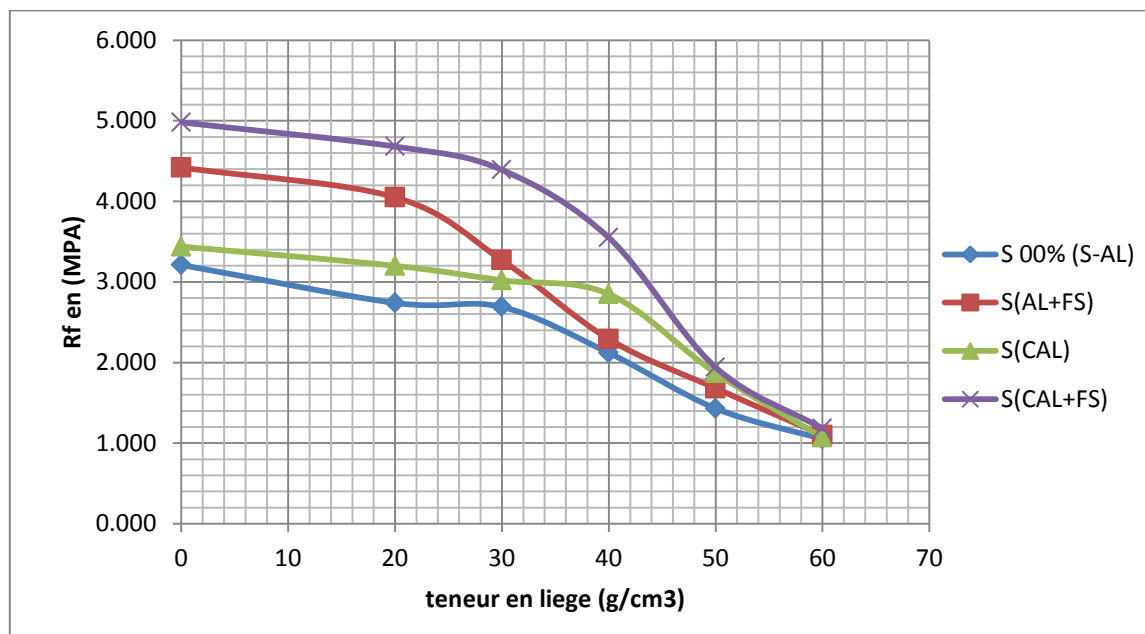


Figure III.9 : Evolution de la résistance a la compression en fonction de la teneur des grains de liège

Tableau III.06 : les résultats des résistances à la traction par flexion des différents bétons

Pourcentage de grains de liège (%)	résistances a traction par flexion (MPa)			
	Mortier (SA) Rf28 (MPa)	Mortier (SC) Rf28 (MPa)	Mortier (SA+FS) Rf28 (MPa)	Mortier (SC+FS) Rf28 (MPa)
00%	3.21	3.44	4.42	4.98
20%	2.74	3.20	4.05	4.68
30%	2.69	3.02	3.27	4.39
40%	2.12	2.85	2.29	3.55
50%	1.43	1.87	1.68	1.94
60%	1.05	1.07	1.10	1.18

**Figure III.10** : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur des grains de liège

➤ Influence de la proportion des résidus de liège sur les résistances mécaniques

L'évolution de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion en fonction de la teneur des résidus de liège est montrée par les figures (III.8 ; III.9 ; III.10 et III.11). Cette dernière montre bien que la résistance, que ce soit en compression ou en flexion, diminue avec l'augmentation de la teneur en grains de liège. Cela est dû au fait qu'on remplace une entité de matrice plus résistante par une même entité moins résistante. Ce phénomène a été observé par un grand nombre d'auteurs travaillant sur les bétons légers (Yang ; 2008 ; Bederina.M ; 2007 ; Hung Nguyen ; 2013).

Les résistances obtenues en compression diminuent de 26.59 à 2.35 MPa dans le cas du béton de (S-AL) avec un taux de réduction de 91% et de 20.65 à 1.63 MPa dans le cas du béton de (S-CAL) avec un taux de réduction de 92%. En flexion, les résistances varient de 3.21 à

1.05 MPa pour le béton de **(S-AL)** avec un taux de réduction de **69%** et de **1.07 à 3.44 MPa** pour le béton de **(S-CAL)** avec un taux de réduction de **69%**. Les gammes de densité dans lesquelles varient ces résistances sont **1.47 à 2.05** pour le béton de **(S-AL)** et **1.40 à 2.13** pour le béton de **(S-CAL)**.

Ce qu'il faut noter aussi est, qu'au début, le béton de sable alluvionnaire présente des résistances légèrement meilleures, mais plus on augmente le dosage en liège plus les résistances des deux bétons de sable se rapprochent.

Les deux bétons de sables se comportent comme si c'est le même matériau. Ceci est évident, puisqu'on introduit des résidus de liège, de même nature et de même granulométrie, qui vont prendre la place de grains de sable différents (calcaire et alluvionnaire).

➤ **Influence de la substitution de fumée de silice sur la résistance à la compression**

Afin de mettre en évidence l'influence de substitution du ciment par les ajouts minéraux (**fumée de silice**) sur les résistances en compression et à la traction par flexion nous avons considéré sur les **figures III.8 et III.10** 7 les résistances à la compression des bétons **B(S-AL)** (0% d'ajouts), **B(S-AL+FS)**(10% d'ajout), **B(S-CAL)** (0% d'ajouts), **B(S-CAL+FS)**(10% d'ajout).

On constate que les écarts de résistances sont importants ; les résistances les plus élevées sont cependant obtenues à partir de la composition **B(S-AL+FS)**.

On voit que la résistance à la compression du béton témoins passe de **24.05 MPa** à **27.99 MPa** pour le béton de sable alluvionnaire avec un taux d'amélioration de **16 %** et de **20.65 MPa** à **24.83 MPa** pour le béton à base de sable calcaire avec un taux d'amélioration de **20%**.

III.2.7 Etude du retrait

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 du principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. Rappelons, qu'en réalité, 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 (**Bederina.M; 2007**).

Les mesures de retrait sont effectuées à l'aide d'un support comparateur de précision 0.01 mm, sur des éprouvettes 4x4x16 cm³, munies de plots aux extrémités. Les mesures étaient faites après 1 jour du démoulage. Ensuite, les éprouvettes seront conservées dans un milieu sec, jusqu'à la date de mesure. Pour chaque Période trois éprouvettes sont testées et chaque mesure de retrait correspond à la moyenne des valeurs relevées sur ces dernières.

les mesures de retrait sont effectuées sur 3 éprouvettes aux échéances suivantes :

-Au démoulage, mesure d'origine des variations.

- A 1 ;3 ;7 ;10 ; 14,21 ;28 ;35 ; et 40 jours après la confection des éprouvettes.

Dans notre cas, et pour différentes teneurs en résidus de liège, les valeurs de retraits obtenues sont illustrées par les courbes des **figures III.9-12** des quatre compositions.

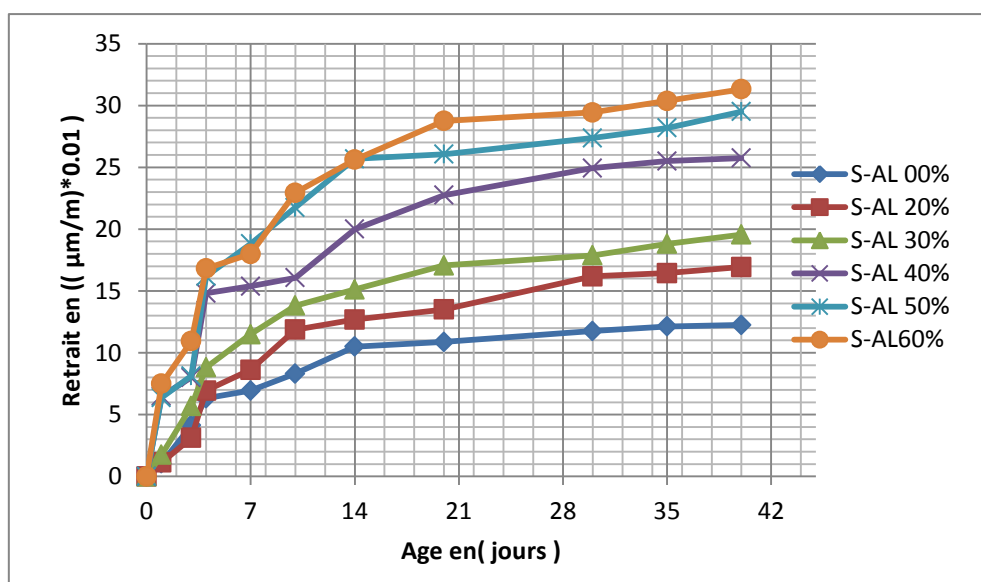


Figure III.11 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-AL).

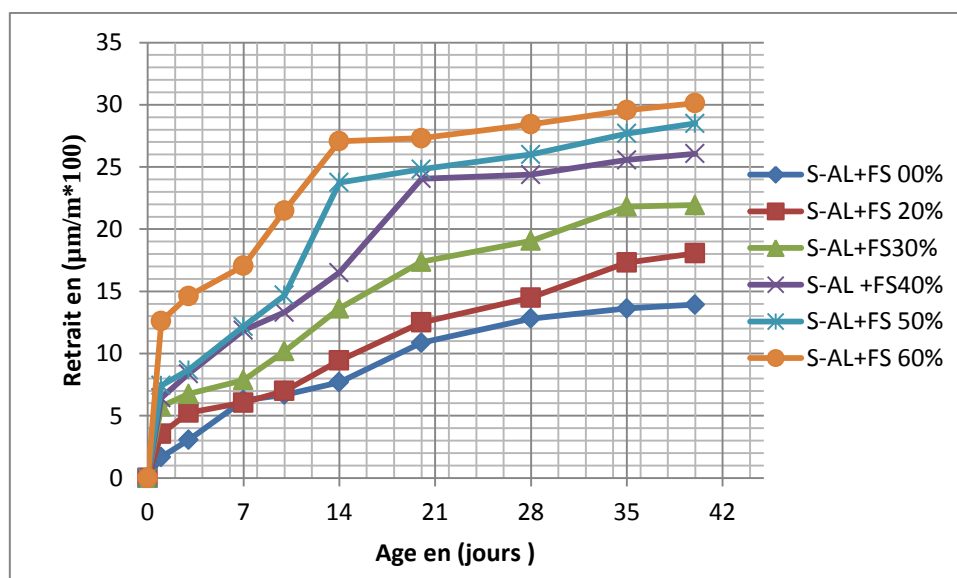


Figure III.12 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-AL+FS).

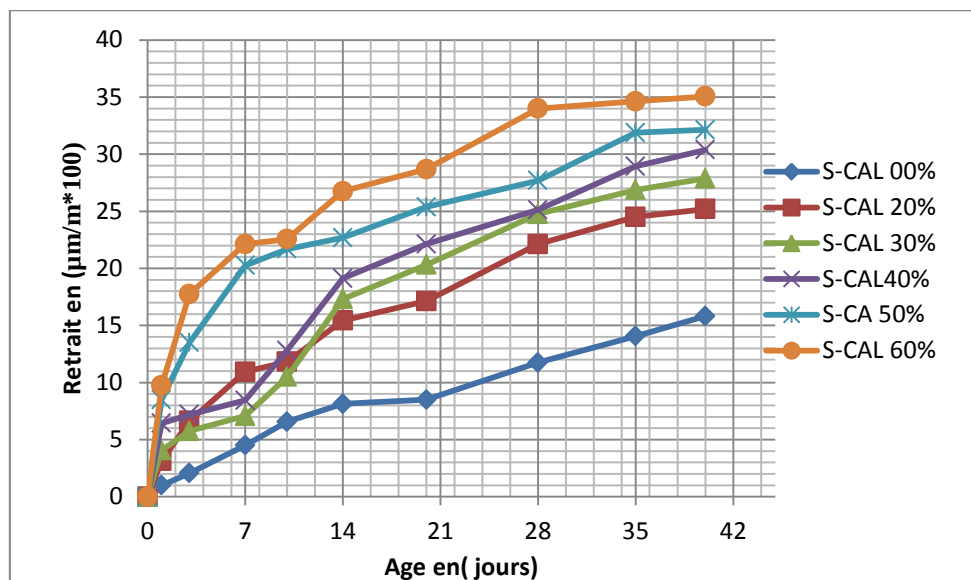


Figure III.13 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-CAL).

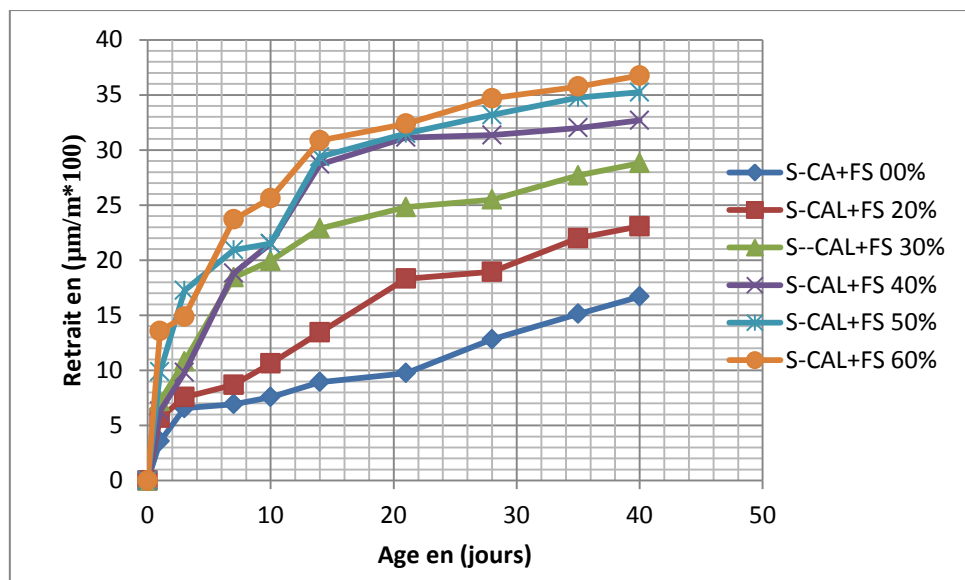


Figure III.14 : Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (B.S-CAL+FS).

Au début, le retrait évolue rapidement, mais, au delà du quatorzième jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la stabilisation à partir du vingt et unième jour. Il paraît que le retrait est proportionnel à la proportion de résidus de liège. Pour les deux bétons de sable, il augmente avec l'augmentation de la quantité de liège.

Notons que le béton de sable, lui-même, est caractérisé par un retrait plus élevé que celui d'un béton ordinaire (Benaissa.A ; 1992),

Le retrait augmente également avec l'ajout de fumée de silice cela est tout à fait logique puisque plus on ajoute des éléments fins à la matrice plus le retrait augmente ce phénomène a été observé par un grand nombre d'auteurs travaillant sur l'effet des ajouts

minéraux sur les mortiers (**Popic. Aleksandra ;2010 ; S. Chabi , B. Mezghiche, H. Guettala ; 2004**).

Autre effet de l'ajout du liège sur le retrait est significatif, en effet le retrait à 40 jours passe d'une valeur de **(0.075µm/m)** pour le mortier de sable alluvionnaire à une valeur de **(0.31 µm/m)** pour le mortier avec 60% de liège avec un taux d'augmentation de **75%** Même chose pour le cas du mortier à base de sable calcaire ou on remarque l'effet supplémentaire des fines calcaires sur le retrait. Une augmentation de **22%** dans le cas des mortiers calcaire par rapport à celui du mortier alluvionnaire. L'effet du liège est le même, le retrait passe de **(0.012µm/m)** pour le retrait de référence à **(0.31µm/m)** pour le mortier avec 60% de liège avec un taux d'augmentation de **61%**.

III.2.8 L'absorptivité

Le processus de transport de l'eau dans le béton a été étudié par plusieurs chercheurs. Dans la plupart des cas et pour des éprouvettes sèches et sans aucune addition, il était possible d'expliquer le processus d'une façon satisfaisante au premier âge. Il a été fréquemment montré que, pour un béton ou un mortier exposé au mouillage avec de l'eau, le taux d'absorption d'eau (i), dans les premiers moments de l'absorption, est proportionnel à la racine carrée du temps ($t^{1/2}$) (**Christopher H ;1989**). La sorptivité est alors facilement déterminée à partir de la pente de la première partie droite de la courbe $S_w = f(t^{-1/2})$, où S_w est la sorptivité du matériau (**Bederina.M; 2007**).

La sportivité est définie par l'équation suivante : $i = S_w \sqrt{t}$

Les résultats de l'essai d'absorptivité des différents bétons élaborés sont représentés dans **les figures III.16 ; III.17 ; III.18 et III.19**.

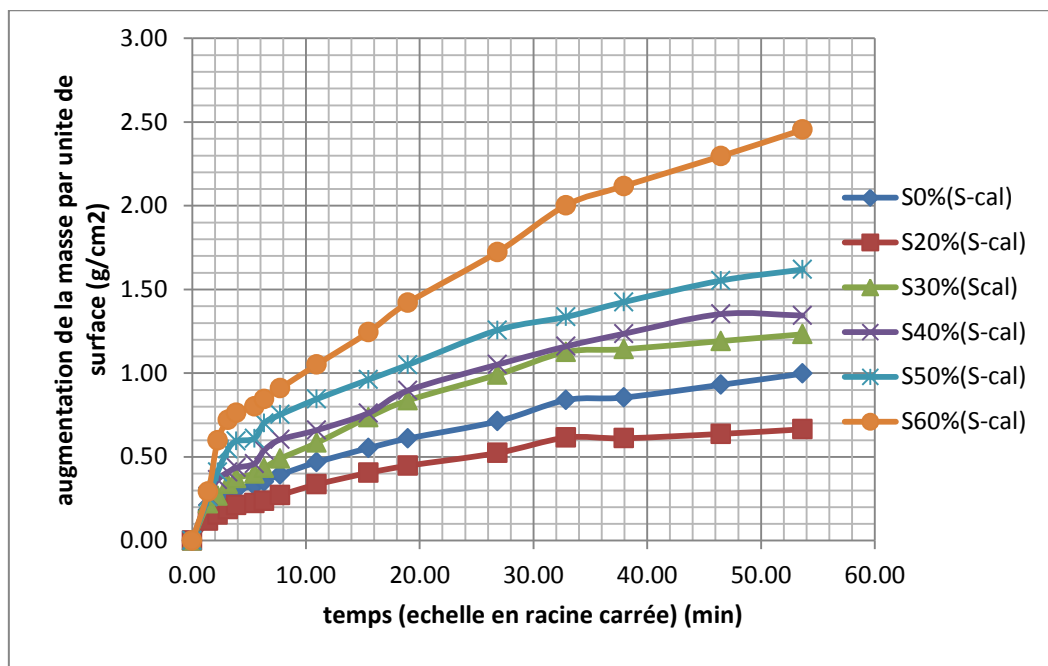


Figure III.15 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps (**sable de calcaire**).

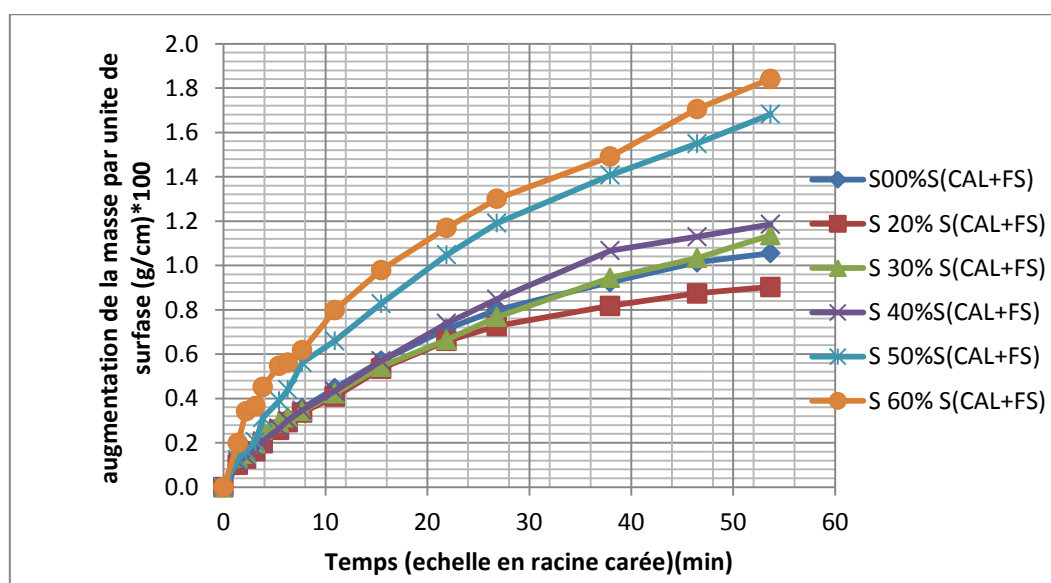


Figure III.16 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps (**sable de calcaire+ fumée de silice**).

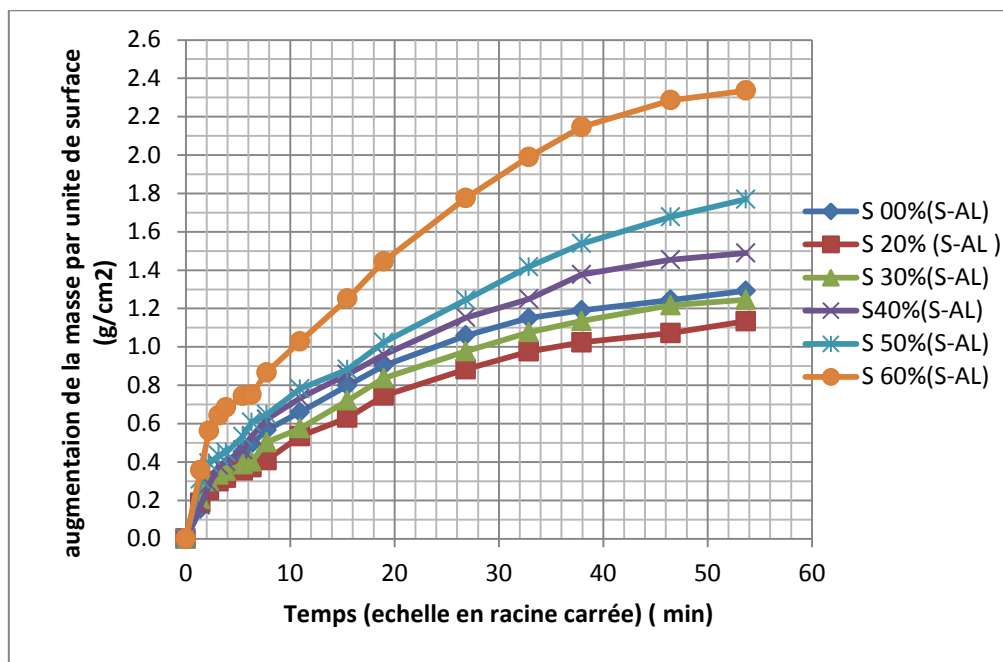


Figure III.17 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps (**sable de alluvionnaire**).

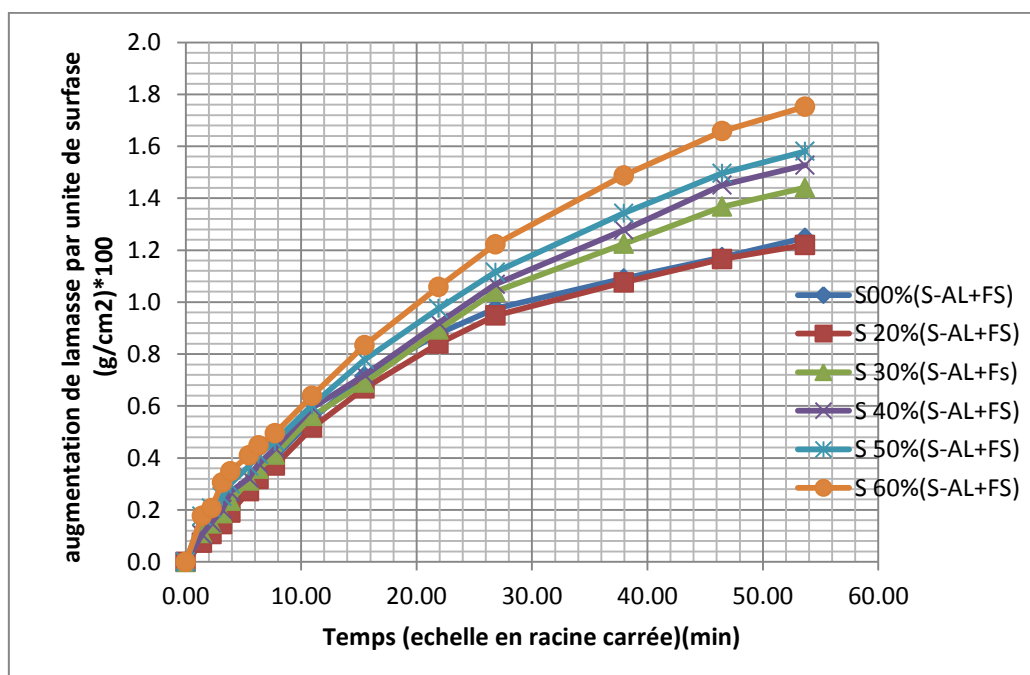


Figure III.18 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps (**sable de alluvionnaire+fumée de silice**).

Il est à noter, en général, que plus le matériau est poreux (proportion des grains de liège plus élevée), plus l'absorption est plus importante. La sorptivité augmente aussi avec l'augmentation de la proportion des grains de liège dans le béton de sable.

L'augmentation dans le cas du béton de S-CAL, où les grains sont plus fins, est plus élevée que dans le cas du béton de S-AL, Ceci est dû à la finesse des grains du sable de

calcaire qui rend les pores très fins et par conséquent favorise la montée de l'eau par capillarité. Ainsi, plus le sable est grossier, plus la sorptivité du béton est réduite.

Notez également que l'ajout de fumée de silice n'a pas affecté significativement de l'absorptivité, mais il est relativement moins dans les deux types de bétons de sable.

III.2.9 Etude des caractéristiques thermiques

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existant dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels: la conductivité thermique λ et la diffusivité α .

Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et de son état hydrique.

La conductivité thermique λ des matériaux est la propriété la plus couramment étudiée car elle dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants.

Elle renseigne sur le pouvoir d'isolation thermique d'un matériau donné. En effet, la conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle varie avec la masse volumique du matériau (M.S.Goual, et al ; 2006).

La technique de mesure que nous avons utilisée pour déterminer la conductivité thermique est la méthode dite TPS dont la démarche expérimentale est détaillée et décrite au chapitre II.

III.2.9.1 Conductivité thermique à l'état sec

Les valeurs moyennes des conductivités thermiques λ à l'état sec, des bétons légers pour différents teneurs en liège obtenues avec la méthode du Source Plane TPS, sont reportés dans le **tableau III.07**.

Tableau III.07: Les valeurs de la conductivité thermique λ à sec.

S-Al		S-AL+FS		S-CAL		S-CAL+FS	
% liège	$\lambda_{\text{sec W/ (m.k)}}$	% liège	$\lambda_{\text{sec W/ (m.k)}}$	% liège	$\lambda_{\text{sec W/ (m.k)}}$	% liège	$\lambda_{\text{sec W/ (m.k)}}$
00%	1.051	00%	1.195	00%	1.220	00%	1.233
20%	0.907	20%	0.942	20%	0.955	20%	0.962
30%	0.814	30%	0.865	30%	0.765	30%	0.829
40%	0.520	40%	0.601	40%	0.656	40%	0.764
50%	0.427	50%	0.497	50%	0.620	50%	0.589
60%	0.363	60%	0.447	60%	0.400	60%	0.514

On constate une nette diminution de la conductivité thermique pour les quatre compositions élaborées en fonction de la teneur en liège. Comme pour tous les bétons légers, les propriétés thermiques des bétons des grains de liège sont liées à leurs masses volumiques, effectivement, On constate que la conductivité thermique diminue avec l'accroissement de la proportion de la porosité introduite dans la matrice d'après **la figure III.19** ci-dessous.

Autrement dit, plus la masse volumique est faible plus les capacités d'isolations thermiques sont meilleures. Cette diminution revient à l'introduction des grains du liège dans la matrice.

La conductivité thermique la plus faible est de 0,363(W/(m.k)) pour le dosage maximum en liège a été obtenue avec le **B(S-AL : 60% liège)**, donc l'allègement du béton a permis de diminuer plus de **34 %** sa conductivité thermique par rapport au béton témoin.

- Pour le **B(S-CAL)** , elle est de 0,400 (W/(m.k)) pour le dosage en liège 60% et représente **32 %** de celle du béton témoin.
- Pour le **B(S-AL+FS)** , elle est de 0,447 (W/(m.k)) pour le dosage en liège 60% et représente **37%** de celle du béton témoin.
- Pour le **B(S-CAL+FS)** , elle est de 0,514 (W/(m.k)) pour le dosage en liège 60% et représente **42%** de celle du béton témoin.

La conductivité thermique obtenue est donc conforme avec les recommandations de la RILEM qui préconise un coefficient conductivité thermique inférieur à 0,75 (W/m.k) pour un béton léger de construction et d'isolation (classe II) possédant une résistance à la compression supérieur à 3,5 MPA(**Saiti Issam ;2014**).

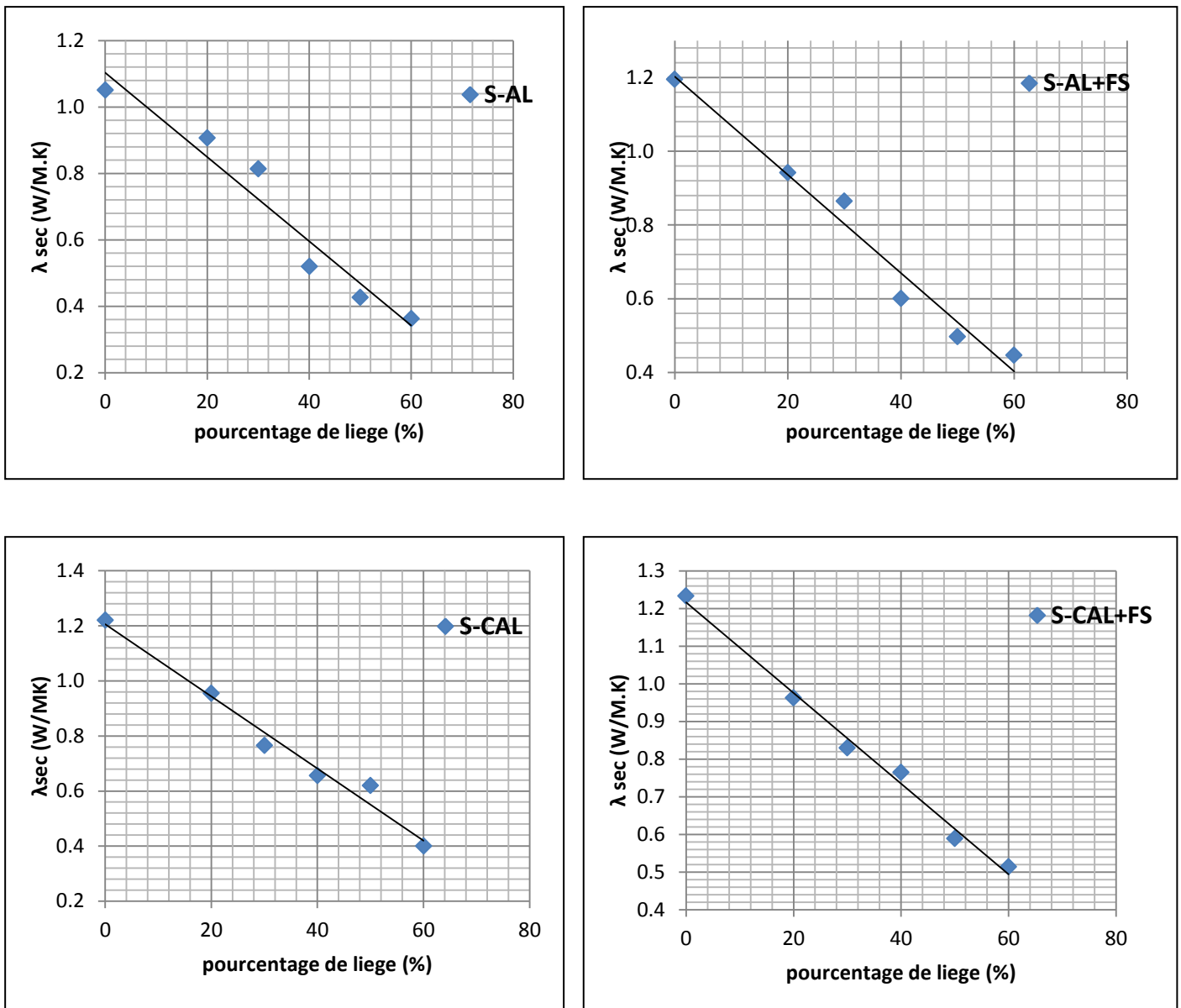


Figure III.19 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de liège a l'état sec.

La conductivité thermique augmente lorsque la masse volumique augmente, car on diminue la proportion de vides, dans le matériau ; en effet l'ajout grains de liège à la matrice conduit à une forte variation de la densité. Plus la teneur en granulats légers est importante, plus la masse volumique est faible, comme le montre **la figure III.20** des bétons légers élaboré. On en déduit donc que la contribution de l'augmentation de la porosité joue un rôle important dans l'allégement et dans la diminution de conductivité thermique λ du matériau.

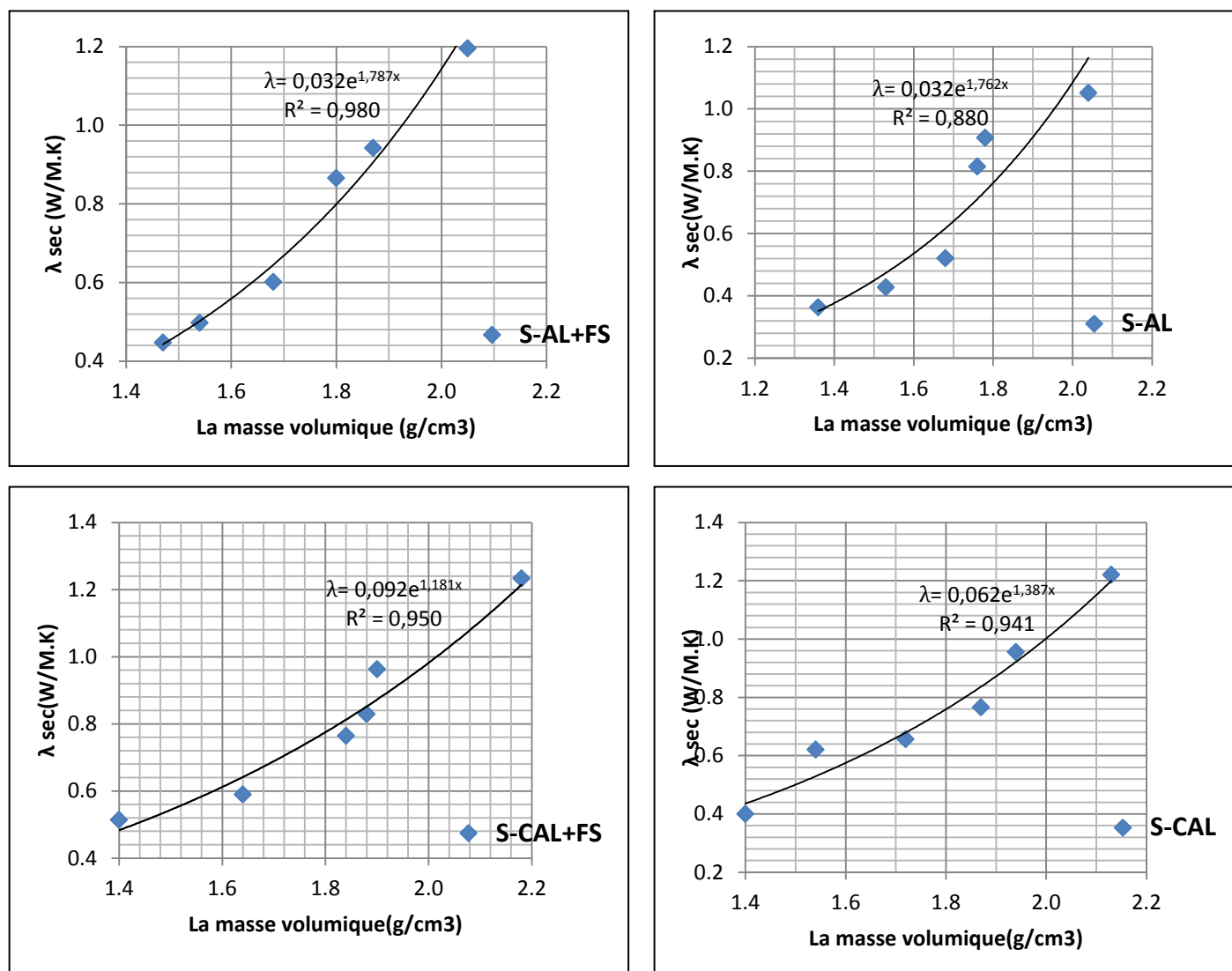


Figure III.20 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des bétons de liège.

On peut considérer qu'à partir de 40 % de liège pour tous les bétons légers, le matériau obtenu a de bonnes caractéristiques thermiques ($\lambda < 0.75$ w/m.k). Les résultats obtenus montrent que le béton de sable alluvionnaire (B-S.AL), possède un pouvoir isolant meilleur à celui de le béton de sable calcaire (B-S.CAL).

III.2.9.2 Conductivité thermique à l'état saturé

L'évolution de la conductivité thermique à saturation (λ saturé) en fonction du dosage en liège reste la même. Il est clair que; plus le dosage en grains de liège est élevée, plus la baisse de la conductivité thermique est importante.

Les valeurs des conductivités thermiques λ à l'état saturé, des bétons légers pour différents teneurs en liège obtenues avec la méthode du Source Plane TPS, sont reportés dans le **tableau III.08**.

Tableau III.08: les valeurs de la conductivité thermique λ saturé.

S-AL		S-AL+FS		S-CAL		S-CAL+FS	
% liège	λ sat W/ (m.k)	% liège	λ sat W/ (m.k)	% liège	λ sat W/(m.k)	% liège	λ sat W/ (m.k)
00%	2.965	00%	2.599	00%	1.254	00%	1.527
20%	1.372	20%	2.338	20%	1.320	20%	1.299
30%	1.194	30%	1.819	30%	1.306	30%	1.175
40%	0.876	40%	1.329	40%	0.934	40%	1.212
50%	0.547	50%	1.213	50%	0.689	50%	1.118
60%	0.407	60%	1.071	60%	0.637	60%	0.758

En examinant les résultats de la conductivité thermique à saturation, qui sont reportés sur la figure III.21 et tableau III.08, Les résultats obtenus montrent que le béton de sable calcaire (**B-S.CAL**), possède un pouvoir isolant meilleur à celui de le béton de sable alluvionnaire (**B-S. AL**), contrairement à l'état sec.

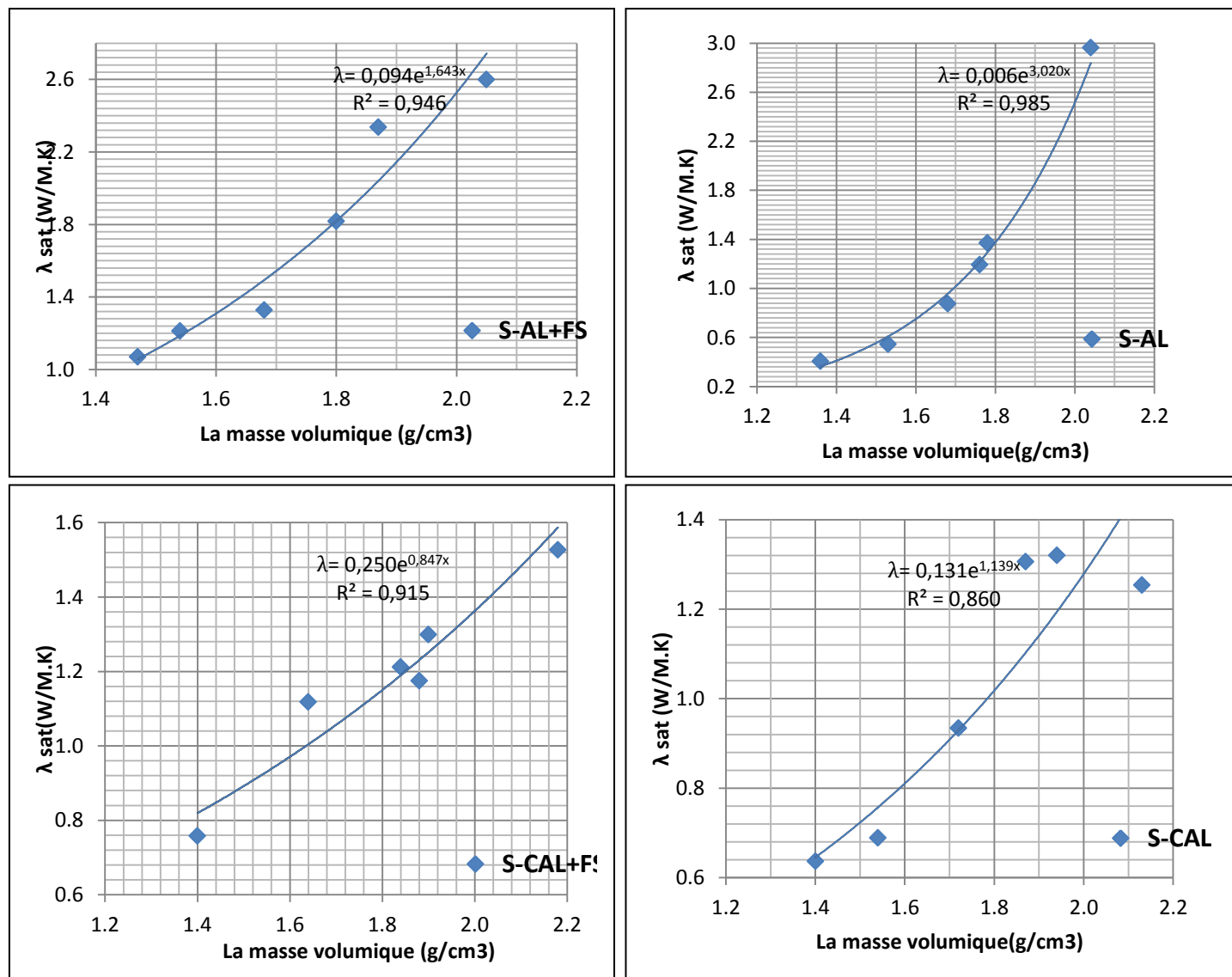


Figure III.21 : Evolution de la conductivité thermique à saturation en fonction de la masse volumique.

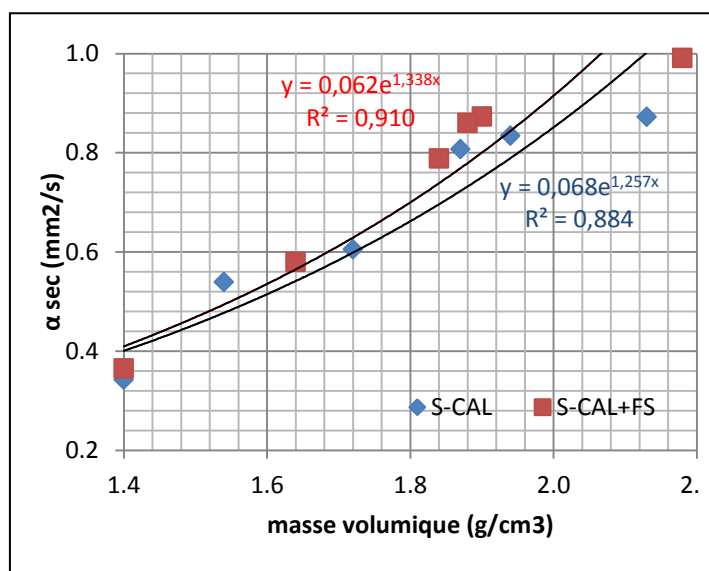
III.2.9.3 Diffusivité thermique

Les mesures de la diffusivité thermique ont été effectuées en utilisant la technique de la sonde plane (TPS). La sonde est placée en sandwich entre deux éprouvettes.

Les résultats de mesures de la diffusivité thermique aux états extrêmes de saturation en eau, et à sec, sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau III.09: les valeurs de la diffusivité thermique α des béton cellulaires élaborés.

% liège	S-Al		S-AL+FS		S-CAL		S-CAL+FS	
	α sec mm ² /s	α sat mm ² /s	α sec mm ² /s	α sat mm ² /s	α sec mm ² /s	α sat mm ² /s	α sec mm ² /s	α sat mm ² /s
00%	1.192	1.064	1.663	1.761	0.798	0.872	0.936	0.991
20%	0.959	0.934	1.339	1.104	0.719	0.834	0.668	0.873
30%	0.768	0.792	0.974	1.067	0.668	0.807	0.667	0.860
40%	0.662	0.622	0.957	0.905	0.524	0.605	0.665	0.788
50%	0.644	0.422	0.602	0.764	0.441	0.539	0.522	0.580
60%	0.566	0.397	0.563	0.609	0.394	0.342	0.462	0.365

**Figure III.22 :** Evolution de la diffusivité thermique à l'état sec en fonction de la masse volumique (béton de sable calcaire(s-cal,s-cal+fs))

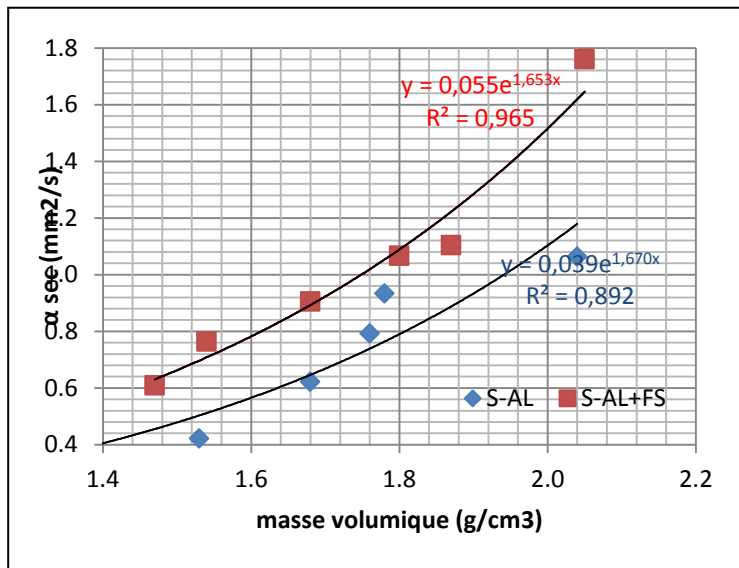


Figure III.23 : Evolution de la diffusivité thermique à l'état **sec** en fonction de la masse volumique (béton de sable alluvionnaire (s-al, s-al+fs))

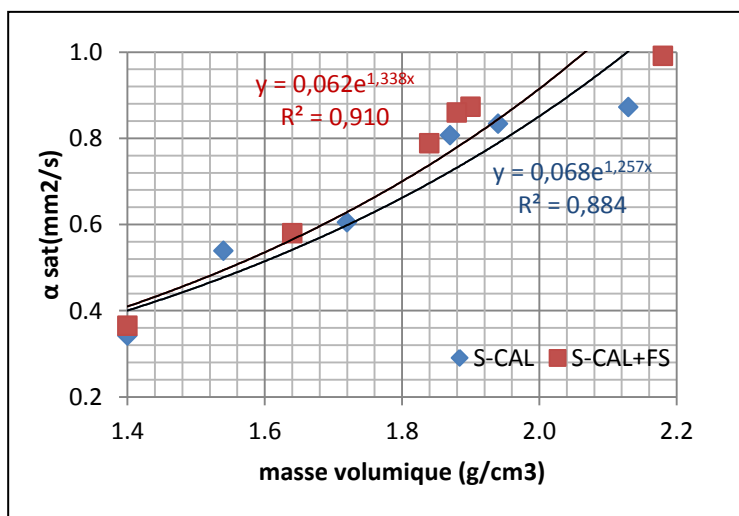


Figure III.24 : Evolution de la diffusivité thermique à l'état **saturé** en fonction de la masse volumique (béton de sable calcaire)

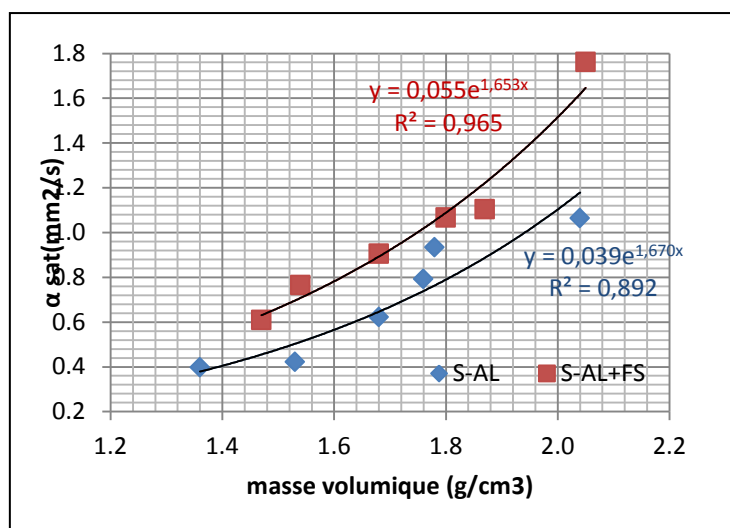


Figure III.25 : Evolution de la diffusivité thermique à l'état **sature** en fonction de la masse volumique (béton de sable alluvionnaire)

Si nous essayons de comparer les résultats de diffusivité thermique à saturation à ceux obtenus à l'état sec, nous apercevrons tout de suite que l'évolution de ces deux paramètres, en fonction de l'augmentation du dosage en grains de liège et de la masse volumique, est similaire dans toutes les compositions.

Il est à noter que le béton de (SA) présente des diffusivités thermiques légèrement plus élevées. Ce comportement peut être attribué à la texture des granulats ainsi qu'à l'entraînement d'air, qui favorisent l'augmentation de la tortuosité qui, elle-même, limite la diffusion de la chaleur dans la matrice.

III.2.10 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.

Les résultats obtenus montrent que plus la quantité de granules de liège est élevée, plus la masse volumique est faible. Mais cela conduit à une réduction significative de la résistance mécanique du béton. Afin d'améliorer cette résistance, nous avons ajouté 10% de la fumée de silice car les résultats ont montré qu'il est relativement amélioré dans le comportement mécanique du béton.

La principale remarque à noter, concernant l'étude thermique, est que les caractéristiques thermiques des bétons de sable, sont fortement influencées par la proportion des résidus de liège incorporées.

Les résultats ont montré une amélioration sensible de l'ensemble des propriétés thermiques lorsque la teneur de grains de liège augmente. Cette amélioration, constatée pour les deux bétons de sables, est due à la porosité importante des matériaux étudiés (porosité propre des résidus de liège et la porosité induite par ces derniers dans la matrice) qui joue un rôle considérable dans la réduction des ponts thermiques au sein du matériau.

Les résultats ont également montré que pour une meilleure isolation thermique et une meilleure résistance, les sables alluvionnaires devraient être utilisés dans le béton de liège au lieu de sable de calcaire.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail, qui entre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et de la réutilisation des déchets d'origine végétal (liège), avait pour but l'élaboration d'un béton capable de supporter les charges tout en assurant une bonne isolation thermique. Ceci peut, d'une part, répondre aux besoins économiques dans de nombreuses régions et, d'autre part, participer à la protection de l'environnement. Pour atteindre ce but, une étude du comportement mécanique et du comportement thermique était, donc, nécessaire pour évaluer les caractéristiques spécifiques de ces matériaux et de les classer parmi les différents types de bétons légers.

Les matériaux étudiés sont des bétons de sable, calcaire et alluvionnaire, à base de résidus de liège. L'étude bibliographique a montré la possibilité d'utilisation des bétons de liège dans plusieurs domaines malgré la diminution de leur résistance mécanique. En effet, les propriétés fort intéressantes des bétons de liège, telles que la légèreté, la bonne capacité d'isolation phonique et thermique sont mise en œuvre par un grand nombre d'auteurs.

L'objectif de ce travail consiste à étudier le comportement mécanique et physique des bétons légers confectionnés à partir de sable et allégés avec les fractions de granulats de liège expansé 0/1. La porosité élevée de tels bétons par rapport au béton de granulats ordinaire peut entraîner une perméabilité plus élevée et donc une plus faible durabilité. Pour ce la, le travail a été orienté en premier lieu vers la formulation et la caractérisation d'un béton de sable obtenu par l'incorporation de différentes proportions de liège dans la matrice. Dans une seconde étape, on a abordé l'étude de l'influence de l'ajout de fines minérales (fumée de silice) sur les propriétés physico-mécaniques du béton de liège. Cette partie a permis d'optimiser la composition de la matrice du béton des résidus de liège.

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

- Pour les bétons de résidus de liège la masse volumique apparente du matériau diminué lorsque le pourcentage en liège augmente. L'ajout de grains de liège au mélange apporte bien un allègement du matériau et permis d'atteindre des densités comprises entre 2050 et 1360kg/m³ avec un taux de réduction de **34%** dans le cas du béton de (S-AL) et de 2040 à 1400kg/m³ avec un taux de réduction de **31%** dans le cas du béton de (S-CAL) pour des dosages en liège compris entre 20 et 60% ainsi le sable calcaire allège mieux relativement au sable alluvionnaire .

- Les résultats de retrait montrent bien que :
 - 1- le retrait augmente avec la teneur en liège dans le mélange sable-ciment.
 - 2- la substitution de sable alluvionnaire par le sable calcaire dans la matrice a tendance à augmenter le retrait . même chose, La substitution du 10% de ciment par la fumée de silice favorise le retrait par rapport au béton de référence (sans fumée de silice).
- Les résistances mécaniques sont inversement proportionnelles à l'augmentation du pourcentage de liège. les résistances à la compression passe de 26.59 MPa à 2.35 MPa avec un taux de réduction de 91% pour les bétons de sable alluvionnaires et de 20.65 MPa à 1.63MPa avec un taux de réduction de 92% pour le béton de sable calcaire. Le béton de résidus de liège expansé à base de sable alluvionnaire est plus résistant que ceux à base de sable de calcaire.
- la substitution du ciment par les ajouts minéraux (fumée de silice) amélioré les résistances en compression et à la traction par flexion. La fumée de silice a permis d'améliorer la résistance d'un taux de 21%
- L'essai de capillarité a montré que Les bétons de grains de liège élaborés sont des matériaux absorbifs. La sorptivité augmente avec l'augmentation de la proportion des grains de liège dans le béton de sable. L'augmentation dans le cas du béton de S-CAL, où les grains sont plus fins, est plus élevée que dans le cas du béton de S-AL, Ceci est dû à la finesse des grains du sable de calcaire qui rend les pores très fins et par conséquent favorise la montée de l'eau par capillarité. Ainsi, plus le sable est grossier, plus la sorptivité du béton est réduite.
- Les résultats de mesure des propriétés thermiques montrent que la conductivité thermique a considérablement diminué par ajouts de liège, les propriétés thermiques des bétons légers sont liées à leurs masses volumiques, autrement dit plus la masse volumique est faible plus la conductivité thermique est faible.
 les conductivités thermiques passent de 1.87 w/m.k à 0.407 w/m.k avec un taux de réduction de **78%** pour le béton de sable alluvionnaire et de 1.22 w/m.k à 0.4 w/m.k avec un taux de réduction 67%. On peut considérer qu'à partir de 40 % de liège pour tous les bétons légers, le matériau obtenu a de bonnes caractéristiques thermiques ($\lambda < 0.75$ w/m.k). Les résultats obtenus montrent que le béton de sable alluvionnaire (B-S.AL), possède un pouvoir isolant meilleur à celui de le béton de sable calcaire (B-S.CAL). A saturation maximale, les conductivités thermiques ont augmenté pour les quatre compositions. Ceci est dû au remplacement d'une phase moins conductrice (air) par une phase plus conductrice (eau).

- En combinant les deux aspects mécanique et thermique, nous pouvons conclure, qu'à des dosages en liège bien déterminées, il est possible d'obtenir des bons bétons qui peuvent servir comme matériaux isolants-porteurs et ce pour les différents bétons légers élaborés.

Recommandations et perspectives de recherches

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivants :

- Elargir l'étude de la durabilité des bétons de liège.
- La modélisation des comportements mécaniques et thermiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

1. **ACI 213R-87;1994**;Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of concrete Practice, parts I: Material and general properties of concrete, Detroit, Michigan, (1994).
2. **AAC, 1978**; Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology; Lancaster England, The construction Press Ltd (1978).
3. **A.Laukaitis et al;2009**; Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products. Construction and building materials 23 (2009) 3034-3042.
4. **Astrand J, Lynda B, Johansson E, Laïd S, Teggour H, Toumi N ;1994** ; Matériaux thermiquement isolants: Béton mousse, Panneaux en laine de bois. CNERIB (Algérie) et LCHS de Lund (Suède) (1994).
5. **AAC, 1978**; Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology;Lancaster England, The construction Press Ltd.
6. **Arnould ;1986** ;granulats de béton légers, Paris (1986).
7. **AFNOR**, 1996. Sols ; reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.NF P 94-056
8. **AFNOR**, 1999 ; Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable. NF EN 933-8.
9. **Bederina .M ;2007** ;Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger (2007).]
10. **Bederina .M , Marmoret .L , Mezreb .K , Khenfer .M-M, Bali .A Et Queneudec .M ;2007**; Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of sand concretes : experimental study and modeling ; construction and building materials ; 21:662-668 .
- 11.**Benazzouk .A, Douzane .O, Langlet .T, Mezreb .K, Roucoult .J-M Et Queneudec .M ; 2007**; Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes ; cement and concrete composites research ; vol29 : N°10 , P732-740 ; 2007 .
- 12.**Benazzouk .A, Douzane .O, Mezreb .K, Laidoudi .Bet Queneudec .M ; 2008** ;Thermal conductivity of cement composites containing rubber wastes particules : experimental study and modeling ; construction and building materials ; vol22, P573-579 ; 2008.
- 13.**Bentchikou. M ,2008** ; contribution à l'étude et a l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique (Cas de béton de fibres de papiers recyclés) ; Thèse de doctorat de l'ENP d'Alger.
- 14.**Benaïssa, A ;2012** ; Déformation différées d'un béton de sable. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Nov 1992.
- 15.**Chikhi Ali ;2016** :Etude du Comportement Thermo-Hydrique des Parois des Bâtiments. Influence des Effets .
- 16.**C.Lian, Y. Zhuge, S.Beecham; 2011**; The relationship between porosity and strength for porous concrete. Construction and building materials 25 (2011) 4294-4298.
- 17.**C.Boutin ;1996** ; Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé :modélisation par méthode auto cohérente. Matériaux et constructions 29 (1996) pp609-615.
- 18.**Christian Guegan, Philippe Legras,Jean Francois Mazzoleni,ChristianColin, Thomas Breiner et Nicolas Foussier ;2005** ;Mémento du béton cellulaire.
- 19.**Chauvin, J.J. ;1987** ; Les sables : guide technique d'utilisation routière. ISTED, 76 p. France, 1987].
- 20.**Dupain. R, lanchon. R, Saint-Arroman J.C. ;2000** ; Granulats, sols, ciments et bétons Caractéristiques des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Edition Casteilla, 236 p. France, 2000.
- 21.**Edwige Privas ;2014** ; Matériaux ligno-cellulosiques : "Élaboration et caractérisation"

22. **Elbakkouri, A ;2004** : Caractérisation hygroscopique, thermophysique et mécanique des matériaux allégés : cas du béton allégés avec du liège ou avec des grignons d'olive ; Tetouan. thèse de doctorat
23. **E.K Kunhanandan Namibar, K. Ramamurthy;2006**: Influence of filler type on the properties of foam concrete. Cement and concrete composites 28 (2006) 475-480.
24. **Gil L., Moiteiro C., « Cork »,2003**; In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology, 6th ed.; Wiley- VCH: Verlag, Germany.
25. **Goual M. S ;2001**: Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation d'un co-produit argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : caractérisation et comportement thermique, thèse Doctorat d'Etat soutenue le 28 février à l'ENP d'Alger. 148p.
- Goual M.S., et al; 2006** ; Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder(Cement and Concrete Research 36 (2006) 1768–1776).
26. **Gueddouda.M.K Et Al ,9-11 Février 2007** ; Caractérisation et stabilisation des sols expansifs; colloque international, Sols et Matériaux à Problèmes ; Tunisie, pp.27-34.
27. **Gotteicha.M., 2005** ; Contribution à la Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités, mémoire de Magister, U.A.T de Laghouat.
28. **Hung Nguyen , 2013** ; bétons de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique. thèse de doctorat
29. **J.P.Laurent, C.Guerre-Chaley ;1995** ; Influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé. Matériaux et constructions 28 (1995) pp464-472.
30. **Kass J.L et Compbell D ;1972** ; Functional classification of lightweight concrete, Matériaux et Constructions, (1972) Vol.5 N°27, pp171-172.
31. **Lakreb Nadia2014/2015** : Élaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage. Thèse de Doctorat.
32. **Mme Boucherba Nawel ;2014** : Valorisation des résidus agro-industriels . Maître de conférences Université Abderrahmane Mira de Béjaïa .
33. **Morgan Chabannes ,2016** :Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de ;chènevotte pour l'éco-construction. Thèse de Doctorat. Délivré par l'Université de Montpellier
34. **M. Ibrahim Nasr Morsi ;2011** ; "Properties of rice straw cementitious composite," Thèse de doctorat de l'Université technique de Darmstadt, Allemagne.
35. **M me Mohellebi Samira ;2014** :Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites ; Thèse doctorat
36. **Melanie ;Shink ;2003** ;compatibilité élastique comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers. Thèse doctorat de l'Université Laval.
37. **Madani Bederina ;2007** : caractérisation mécanique et physique des bétons de sables a base de déchets de bois. Thèse doctorat.
38. **Nozahic ;2012** ; "Vers une nouvelle démarche de conception des bétons végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface Liant/Végétal. Application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux," Thèse de Doctorat de l'Université Blaise Pascal.
39. **Nguyen .L-H, Beaucour .A-L, Ortola .S, Noumowé .A; Mai 2011** ; Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale ;Université de CergyPontoise ;XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil.
40. **Narayanan.N And Ramamurthy.K;2000**;Structure and proprieties of aerated concrete; a review: cement and concrete research .
41. **N.Narayanan, K.Ramamurthy;2000**;Microstructural investigations on aerated concrete. Cement and concrete research 30 (2000) 457-464.

42. **Nassima Sotehi ; 2010** ;Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation . Thèse de Doctorat de l'Université, Mentouri – Constantine.
43. **Nadia Ben Mansour ;2015** : développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés a l'isolation thermique dans l'habitat ; Thèse de Doctorat de l'Université Hadj Lakhdar de Batna .
44. **Popic, Aleksandra ; 2010** ; Influence des ajouts minéraux, des granulats fins, de la température et du rapport eau/liant sur le développement et le contrôle du retrait endogène des matrices cimentaires ; Thèse de Doctorat de l'Université de Sherbrooke.
45. **RILEM ;1970** ; Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69
46. **Reine Ahouefa Katte ; 2014/2015** : performances mécaniques des bétons a base de coques de noix de palmistes du sud Benin. Mémoire d'ingénieur de l'Université D'abomey-Calavi
47. **Rilem (mai-juin 1980)bimestriel** ; Porosité accessible à l'eau, Vol.13-N° 75, P176.
48. **Rilem ;1970** ; Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69.
49. **Serifou Mamery ;2013** : Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux.
50. **Saiti Issam ; 2014** :Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA ; mémoire de magistère de L'université De Kasdi Merbah - Ouargla .
51. **S.Tada, S.Nakano;1983** ; Microstructural approach to properties of moist cellular concrete. Wittmann FH Amsterdam: Elsevier (1983) pp71-89
52. **S. Chabi , B. Mezghiche, H. Guettala 2004** ; Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers. Juin 2004, pp. 03-08 Université de Biskra.
53. **Techniques de l'ingénieur, editor. Techniques du bâtiment ;2014** ; Connaître les matériaux de la construction, volume base documentaire : 43804210. Editions T.I.
54. **T. H. Pham, J. Férec, V. Picandet, P. Tronet, J. Costa, and P. Pilvin ;2012** ; "Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux-chanvre," xxxe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.)
55. **Tafraoui Ahmed ;2009** ; Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Thèse de doctorat à l'insa de TOULOUSE, 2009.J,
56. **Veronique Cerezo ;2005** : Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique ; Thèse de Doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
57. **Xiao-yan Huang et al;2012**; Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. Construction and building materials 27 (2012) 1-5.
58. **Ziregue.A ;2005** : Comportement physico-mécanique et thermique d'un béton à base de sable calcaire allégé par des granulats de liège : Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique du composite Thèse de Doctorat de l'Université de Laghouat .
59. **Yahia Mohamed ;2015/2016** : Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment . Mémoire de Master de Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
60. **Yang Ke ;2008** ;caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation ; Thèse de Doctorat de l'Université de cergy-pontoise.
61. <http://myenvironnement.pagesperso-orange.fr/FICHE%20DESCRIPTIVE%20LIEGE.pdf>
62. <http://www.easy-liege.fr/contenu/41-isolation-thermique>

ANNEXES

Résultats par échantillon de la masse volumique

- sable calcaire

1- Tableau III.01 : la masse volumique apparente de sable calcaire

m1	m2	m2-m1	v	la masse volumique apparente	le moyen (g/cm3)
2395,45	3866,4	1470,95	1000	1,47	1.49
2395,45	3885,37	1489,92	1000	1,49	
2395,45	3898,98	1503,53	1000	1,50	

2- Tableau III.02 : la masse volumique absolue de sable calcaire

m	v0	v1	v1-v0	la masse volumique absolue	le moyen (g/cm3)
400	300	450	150	2,67	2.59
		455	155	2,58	
		458	158	2,53	

- sable alluvionnaire

1- Tableau III.03 : la masse volumique apparente de sable alluvionnaire

m1	m2	m2-m1	v	la masse volumique apparente	le moyen (g/cm3)
2383,5	3890,2	1506,7	1000	1,51	1.51
2383,3	3891,3	1508	1000	1,51	
2383,3	3899,6	1516,3	1000	1,52	

2- Tableau III.04 : la masse volumique absolue de sable alluvionnaire

m	v0	v1	v1-v0	la masse volumique absolue	le moyen (g/cm3)
400	300	460	160	2,50	2.54
		458	158	2,53	
		455	155	2,58	

- le liège

1- Tableau III.05 : la masse volumique apparente de liège

m1	m2	m2-m1	v	la masse volumique apparente	le moyen (g/cm3)
2383,5	2437,1	53,6	1000	0,05	0.054
2383,3	2439,8	56,5	1000	0,06	
2383,3	2436,8	53,5	1000	0,05	

2- Tableau III.06 : la masse volumique absolue de liège

num	m1	m2	m3	la masse volumique absolue	le moyen (g/cm3)
1	1486,55	50	1189,23	0,144	0.147
3	1485,85	50	1193,96	0,146	
4	1480,12	50	1199,04	0,151	

- Tableau III.07 : La masse volumique du béton de liège des quatre compositions en fonction de teneur de liège

Pourcentage de liège %	Mortier sable alluvionnaire +fumée de silice				Mortier sable calcaire +fumée de silice				Mortier sable alluvionnaire				Mortier sable calcaire			
	LA MASSE	moyen	volume	masse volumique (g/cm3)	LA MASSE	moyen	volume	masse volumique (g/cm3)	LA MASSE	moyen	volume	masse volumique (g/cm3)	LA MASSE	moyen	volume	masse volumique (g/cm3)
SERIE 0 (00%)	524,10	523,53	256,00	2,05	558,60	558,50	256,00	2,18	522,50	522,27	256,00	2,04	519,10	544,53	256,00	2,13
	523,50				556,60				522,60				552,20			
	523,00				560,30				521,70				562,30			
SERIE 1 (20%)	479,20	478,57	256,00	1,87	474,80	486,20	256,00	1,90	458,60	456,17	256,00	1,78	494,70	495,70	256,00	1,94
	474,20				492,50				457,90				496,70			
	482,30				491,30				452,00				0,00			
SERIE 2 (30%)	459,00	461,00	256,00	1,80	479,10	481,93	256,00	1,88	451,00	451,80	256,00	1,76	464,90	479,00	256,00	1,87
	458,40				482,30				450,70				493,10			
	465,60				484,40				453,70				0,00			
SERIE 3 (40%)	437,40	430,27	256,00	1,68	469,50	471,80	256,00	1,84	432,70	429,90	256,00	1,68	441,90	439,80	256,00	1,72
	433,30				474,20				427,10				437,70			
	420,10				471,70				0,00				0,00			
SERIE 4 (50%)	394,50	394,17	256,00	1,54	422,00	420,10	256,00	1,64	392,30	391,35	256,00	1,53	396,20	394,45	256,00	1,54
	396,40				415,30				390,40				392,70			
	391,60				423,00				0,00				0,00			
SERIE 5 (60%)	377,10	375,33	256,00	1,47	355,10	366,08	256,00	1,43	346,90	347,80	256,00	1,36	361,10	357,80	256,00	1,40
	382,20				357,80				348,70				355,00			
	366,70				385,34								357,30			

Les résultats des essais de la sorptivite

1- Tableau III.08 Evolution du sorptivite en fonction de temps du **béton de liège (alluvionnaire)**

temps (min)	temps (h)	$\sqrt{temp}$	S0				S1				S2				S3				S4				S5			
			M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i
0,00	0,00	0,00	507,97	0,00	0,00	0,00	462,60	0,00	0,00	0,00	441,60	0,00	0,00	0,00	418,50	0,00	0,00	0,00	354,90	0,00	0,00	0,00	325,15	0,00	0,00	0,00
2,00	0,03	1,41	510,45	2,48	0,15	0,11	465,58	2,98	0,19	0,13	444,90	3,30	0,21	0,15	421,30	2,80	0,18	0,12	359,87	4,97	0,31	0,22	330,87	5,72	0,36	0,25
5,00	0,08	2,24	512,05	4,08	0,25	0,11	466,66	4,06	0,25	0,11	446,38	4,78	0,30	0,13	423,04	4,54	0,28	0,13	361,19	6,29	0,39	0,18	334,15	9,00	0,56	0,25
10,00	0,17	3,16	513,20	5,23	0,33	0,10	467,39	4,79	0,30	0,09	446,93	5,33	0,33	0,11	424,62	6,12	0,38	0,12	361,85	6,95	0,43	0,14	335,43	10,28	0,64	0,20
15,00	0,25	3,87	513,84	5,87	0,37	0,09	467,67	5,07	0,32	0,08	447,26	5,66	0,35	0,09	424,91	6,41	0,40	0,10	362,11	7,21	0,45	0,12	336,09	10,94	0,68	0,18
30,00	0,50	5,48	515,21	7,24	0,45	0,08	468,28	5,68	0,35	0,06	447,79	6,19	0,39	0,07	425,91	7,41	0,46	0,08	363,43	8,53	0,53	0,10	337,05	11,90	0,74	0,14
40,00	0,67	6,32	515,88	7,91	0,49	0,08	468,56	5,96	0,37	0,06	448,04	6,44	0,40	0,06	427,07	8,57	0,54	0,08	364,63	9,73	0,61	0,10	337,17	12,02	0,75	0,12
60,00	1,00	7,75	517,03	9,06	0,57	0,07	469,15	6,55	0,41	0,05	449,64	8,04	0,50	0,06	428,45	9,95	0,62	0,08	365,26	10,36	0,65	0,08	339,01	13,86	0,87	0,11
120,00	2,00	10,95	518,53	10,56	0,66	0,06	471,15	8,55	0,53	0,05	450,81	9,21	0,58	0,05	430,23	11,73	0,73	0,07	367,40	12,50	0,78	0,07	341,60	16,45	1,03	0,09
240,00	4,00	15,49	520,74	12,77	0,80	0,05	472,69	10,09	0,63	0,04	453,13	11,53	0,72	0,05	432,20	13,70	0,86	0,06	369,02	14,12	0,88	0,06	345,17	20,02	1,25	0,08
360,00	6,00	18,97	522,41	14,44	0,90	0,05	474,53	11,93	0,75	0,04	454,98	13,38	0,84	0,04	433,84	15,34	0,96	0,05	371,28	16,38	1,02	0,05	348,28	23,13	1,45	0,08
720,00	12,00	26,83	524,92	16,95	1,06	0,04	476,73	14,13	0,88	0,03	457,23	15,63	0,98	0,04	436,94	18,44	1,15	0,04	374,83	19,93	1,25	0,05	353,57	28,42	1,78	0,07
1080,00	18,00	32,86	526,37	18,40	1,15	0,03	478,22	15,62	0,98	0,03	458,82	17,22	1,08	0,03	438,49	19,99	1,25	0,04	377,57	22,67	1,42	0,04	356,98	31,83	1,99	0,06
1440,00	24,00	37,95	527,01	19,04	1,19	0,03	478,97	16,37	1,02	0,03	459,76	18,16	1,14	0,03	440,54	22,04	1,38	0,04	379,51	24,61	1,54	0,04	359,50	34,35	2,15	0,06
2160,00	36,00	46,48	527,88	19,91	1,24	0,03	479,75	17,15	1,07	0,02	461,07	19,47	1,22	0,03	441,77	23,27	1,45	0,03	381,74	26,84	1,68	0,04	361,72	36,57	2,29	0,05
2880,00	48,00	53,67	528,64	20,67	1,29	0,02	480,74	18,14	1,13	0,02	461,52	19,92	1,25	0,02	442,33	23,83	1,49	0,03	383,21	28,31	1,77	0,03	362,53	37,38	2,34	0,04

Annexes

2- Tableau III.09 Evolution du sorptivite en fonction de temps du **béton de liège (alluvionnaire +fumée de silice)**

temps (min)	temps (h)	$\sqrt{temp}$	S0				S1				S2				S3				S4				S5			
			M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i
0,00	0,00	0,00	507,44	0,00	0,00	0,00	440,04	0,00	0,00	0,00	422,39	0,00	0,00	0,00	408,65	0,00	0,00	0,00	336,62	0,00	0,00	0,00	297,83	0,00	0,00	0,00
2,00	0,03	1,41	508,78	1,34	0,08	0,06	441,21	1,17	0,07	0,05	424,15	1,76	0,11	0,08	410,34	1,69	0,11	0,07	339,43	2,81	0,18	0,12	300,67	2,84	0,18	0,13
5,00	0,08	2,24	509,35	1,91	0,12	0,05	441,75	1,71	0,11	0,05	424,75	2,36	0,15	0,07	411,05	2,40	0,15	0,07	339,93	3,31	0,21	0,09	301,14	3,31	0,21	0,09
10,00	0,17	3,16	510,02	2,58	0,16	0,05	442,36	2,32	0,15	0,05	425,38	2,99	0,19	0,06	411,87	3,22	0,20	0,06	340,63	4,01	0,25	0,08	302,72	4,89	0,31	0,10
15,00	0,25	3,87	510,74	3,30	0,21	0,05	443,07	3,03	0,19	0,05	426,14	3,75	0,23	0,06	412,95	4,30	0,27	0,07	341,41	4,79	0,30	0,08	303,41	5,58	0,35	0,09
30,00	0,50	5,48	512,18	4,74	0,30	0,05	444,40	4,36	0,27	0,05	427,39	5,00	0,31	0,06	413,81	5,16	0,32	0,06	342,51	5,89	0,37	0,07	304,39	6,56	0,41	0,07
40,00	0,67	6,32	512,96	5,52	0,35	0,05	445,14	5,10	0,32	0,05	428,13	5,74	0,36	0,06	414,69	6,04	0,38	0,06	343,23	6,61	0,41	0,07	305,00	7,17	0,45	0,07
60,00	1,00	7,75	513,88	6,44	0,40	0,05	445,97	5,93	0,37	0,05	428,99	6,60	0,41	0,05	415,66	7,01	0,44	0,06	344,03	7,41	0,46	0,06	305,76	7,93	0,50	0,06
120,00	2,00	10,95	516,25	8,81	0,55	0,05	448,31	8,27	0,52	0,05	431,37	8,98	0,56	0,05	418,14	9,49	0,59	0,05	346,28	9,66	0,60	0,06	308,06	10,23	0,64	0,06
240,00	4,00	15,49	518,88	11,44	0,72	0,05	450,73	10,69	0,67	0,04	433,42	11,03	0,69	0,04	420,15	11,50	0,72	0,05	349,07	12,45	0,78	0,05	311,17	13,34	0,83	0,05
480,00	8,00	21,91	521,51	14,07	0,88	0,04	453,49	13,45	0,84	0,04	436,70	14,31	0,89	0,04	423,37	14,72	0,92	0,04	352,23	15,61	0,98	0,04	314,77	16,94	1,06	0,05
720,00	12,00	26,83	523,04	15,60	0,97	0,04	455,21	15,17	0,95	0,04	439,03	16,64	1,04	0,04	425,75	17,10	1,07	0,04	354,47	17,85	1,12	0,04	317,39	19,56	1,22	0,05
1440,00	24,00	37,95	524,89	17,45	1,09	0,03	457,25	17,21	1,08	0,03	441,98	19,59	1,22	0,03	429,09	20,44	1,28	0,03	358,09	21,47	1,34	0,04	321,63	23,80	1,49	0,04
2160,00	36,00	46,48	526,20	18,76	1,17	0,03	458,69	18,65	1,17	0,03	444,27	21,88	1,37	0,03	431,86	23,21	1,45	0,03	360,56	23,94	1,50	0,03	324,36	26,53	1,66	0,04
2880,00	48,00	53,67	527,40	19,96	1,25	0,02	459,56	19,52	1,22	0,02	445,44	23,05	1,44	0,03	433,08	24,43	1,53	0,03	361,91	25,29	1,58	0,03	325,87	28,04	1,75	0,03

3- Tableau III.10 Evolution du sorptivite en fonction de temps du **béton de liège (calcaire)**

temps (min)	temp s (h)	$\sqrt{temp}$	S0				S1				S2				S3				S4				S5			
			M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i
0,00	0,00	0,00	552,80	0,00	0,00	0,00	460,39	0,00	0,00	0,00	441,20	0,00	0,00	0,00	408,66	0,00	0,00	0,00	373,24	0,00	0,00	0,00	324,81	0,00	0,00	0,00
2,00	0,03	1,41	555,71	2,91	0,18	0,13	462,27	1,88	0,12	0,08	444,76	3,56	0,22	0,16	412,88	4,22	0,26	0,19	377,40	4,16	0,26	0,18	329,48	4,67	0,29	0,21
5,00	0,08	2,24	556,69	3,89	0,24	0,11	462,88	2,49	0,16	0,07	445,49	4,29	0,27	0,12	414,48	5,82	0,36	0,16	379,79	6,55	0,41	0,18	334,38	9,57	0,60	0,27
10,00	0,17	3,16	557,19	4,39	0,27	0,09	463,40	3,01	0,19	0,06	446,62	5,42	0,34	0,11	415,22	6,56	0,41	0,13	381,99	8,75	0,55	0,17	336,34	11,53	0,72	0,23
15,00	0,25	3,87	557,64	4,84	0,30	0,08	463,79	3,40	0,21	0,05	447,17	5,97	0,37	0,10	415,62	6,96	0,43	0,11	382,75	9,51	0,59	0,15	337,02	12,21	0,76	0,20
30,00	0,50	5,48	558,07	5,27	0,33	0,06	463,96	3,57	0,22	0,04	447,60	6,40	0,40	0,07	416,01	7,35	0,46	0,08	383,00	9,76	0,61	0,11	337,62	12,81	0,80	0,15
40,00	0,67	6,32	558,43	5,63	0,35	0,06	464,19	3,80	0,24	0,04	448,15	6,95	0,43	0,07	417,28	8,62	0,54	0,09	384,48	11,24	0,70	0,11	338,32	13,51	0,84	0,13
60,00	1,00	7,75	559,10	6,30	0,39	0,05	464,74	4,35	0,27	0,04	449,04	7,84	0,49	0,06	418,32	9,66	0,60	0,08	385,28	12,04	0,75	0,10	339,37	14,56	0,91	0,12
120,00	2,00	10,95	560,29	7,49	0,47	0,04	465,76	5,37	0,34	0,03	450,55	9,35	0,58	0,05	419,22	10,56	0,66	0,06	386,77	13,53	0,85	0,08	341,63	16,82	1,05	0,10
240,00	4,00	15,49	561,64	8,84	0,55	0,04	466,87	6,48	0,41	0,03	452,99	11,79	0,74	0,05	420,85	12,19	0,76	0,05	388,62	15,38	0,96	0,06	344,73	19,92	1,25	0,08
360,00	6,00	18,97	562,56	9,76	0,61	0,03	467,55	7,16	0,45	0,02	454,60	13,40	0,84	0,04	423,01	14,35	0,90	0,05	390,04	16,80	1,05	0,06	347,55	22,74	1,42	0,07
720,00	12,00	26,83	564,20	11,40	0,71	0,03	468,77	8,38	0,52	0,02	457,06	15,86	0,99	0,04	425,48	16,82	1,05	0,04	393,35	20,11	1,26	0,05	352,38	27,57	1,72	0,06
1080,00	18,00	32,86	566,23	13,43	0,84	0,03	470,23	9,84	0,62	0,02	459,22	18,02	1,13	0,03	427,22	18,56	1,16	0,04	394,62	21,38	1,34	0,04	356,85	32,04	2,00	0,06
1440,00	24,00	37,95	566,48	13,68	0,86	0,02	470,17	9,78	0,61	0,02	459,49	18,29	1,14	0,03	428,43	19,77	1,24	0,03	396,04	22,80	1,43	0,04	358,69	33,88	2,12	0,06
2160,00	36,00	46,48	567,69	14,89	0,93	0,02	470,59	10,20	0,64	0,01	460,27	19,07	1,19	0,03	430,31	21,65	1,35	0,03	398,09	24,85	1,55	0,03	361,55	36,74	2,30	0,05
2880,00	48,00	53,67	568,76	15,96	1,00	0,018	471,03	10,64	0,66	0,012	460,92	19,72	1,23	0,023	430,17	21,51	1,34	0,025	399,15	25,91	1,62	0,030 2	364,08	39,27	2,45	0,045

4- Tableau III.11 Evolution du sorptivite en fonction de temps du **béton de liège (calcaire +fumée de silice)**

temps (min)	temps (h)	$\sqrt{temp}$	S0				S1				S2				S3				S4				S5			
			M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i	M	M-m0	Sw (m·√s)	i
0,00	0,00	0,00	526,93	0,00	0,00	0,00	455,74	0,00	0,00	0,00	423,74	0,00	0,00	0,00	404,95	0,00	0,00	0,00	356,97	0,00	0,00	0,00	322,17	0,00	0,00	0,00
2,00	0,03	1,41	528,50	1,57	0,10	0,07	457,36	1,62	0,10	0,07	425,86	2,12	0,13	0,09	406,76	1,81	0,11	0,08	358,96	1,99	0,12	0,09	325,36	3,19	0,20	0,14
5,00	0,08	2,24	528,98	2,05	0,13	0,06	457,81	2,07	0,13	0,06	426,14	2,40	0,15	0,07	407,18	2,23	0,14	0,06	359,56	2,59	0,16	0,07	327,65	5,48	0,34	0,15
10,00	0,17	3,16	529,56	2,63	0,16	0,05	458,33	2,59	0,16	0,05	426,90	3,16	0,20	0,06	407,67	2,72	0,17	0,05	360,25	3,28	0,20	0,06	328,02	5,85	0,37	0,12
15,00	0,25	3,87	530,29	3,36	0,21	0,05	458,91	3,17	0,20	0,05	427,91	4,17	0,26	0,07	408,29	3,34	0,21	0,05	361,98	5,01	0,31	0,08	329,41	7,24	0,45	0,12
30,00	0,50	5,48	531,21	4,28	0,27	0,05	459,88	4,14	0,26	0,05	428,41	4,67	0,29	0,05	409,20	4,25	0,27	0,05	363,22	6,25	0,39	0,07	330,93	8,76	0,55	0,10
40,00	0,67	6,32	531,91	4,98	0,31	0,05	460,44	4,70	0,29	0,05	428,78	5,04	0,31	0,05	409,80	4,85	0,30	0,05	364,01	7,04	0,44	0,07	331,15	8,98	0,56	0,09
60,00	1,00	7,75	532,62	5,69	0,36	0,05	461,13	5,39	0,34	0,04	429,24	5,50	0,34	0,04	410,50	5,55	0,35	0,04	365,97	9,00	0,56	0,07	332,05	9,88	0,62	0,08
120,00	2,00	10,95	534,08	7,15	0,45	0,04	462,27	6,53	0,41	0,04	430,51	6,77	0,42	0,04	411,89	6,94	0,43	0,04	367,54	10,57	0,66	0,06	334,96	12,79	0,80	0,07
240,00	4,00	15,49	536,05	9,12	0,57	0,04	464,30	8,56	0,54	0,03	432,43	8,69	0,54	0,04	414,07	9,12	0,57	0,04	370,22	13,25	0,83	0,05	337,84	15,67	0,98	0,06
480,00	8,00	21,91	538,35	11,42	0,71	0,03	466,29	10,55	0,66	0,03	434,38	10,64	0,66	0,03	416,78	11,83	0,74	0,03	373,74	16,77	1,05	0,05	340,89	18,72	1,17	0,05
720,00	12,00	26,83	539,72	12,79	0,80	0,03	467,37	11,63	0,73	0,03	436,03	12,29	0,77	0,03	418,52	13,57	0,85	0,03	376,03	19,06	1,19	0,04	342,98	20,81	1,30	0,05
1440,00	24,00	37,95	541,73	14,80	0,93	0,02	468,83	13,09	0,82	0,02	438,85	15,11	0,94	0,02	422,02	17,07	1,07	0,03	379,49	22,52	1,41	0,04	346,03	23,86	1,49	0,04
2160,00	36,00	46,48	543,16	16,23	1,01	0,02	469,73	13,99	0,87	0,02	440,28	16,54	1,03	0,02	423,02	18,07	1,13	0,02	381,77	24,80	1,55	0,03	349,46	27,29	1,71	0,04
2880,00	48,00	53,67	543,82	16,89	1,06	0,02	470,19	14,45	0,90	0,02	441,92	18,18	1,14	0,02	423,91	18,96	1,19	0,02	383,88	26,91	1,68	0,03	351,63	29,46	1,84	0,03

Les résultats des essais de retraits

1- Tableau III.12 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (sable alluvionnaire + liege)

date	jours	S0(00%)		S1(20%)		S2(30%)		S3(40%)		S4(50%)		S5(60%)	
		$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ (}\mu\text{m/cm)}$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ (}\mu\text{m/cm)}$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ (}\mu\text{m/cm)}$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ (}\mu\text{m/cm)}$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ (}\mu\text{m/cm)}$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ (}\mu\text{m/cm)}$
27/04/2018	1	0,017	1,06	0,018	1,13	0,028	1,75	0,104	6,50	0,102	6,38	0,120	7,50
29/04/2018	3	0,066	4,13	0,050	3,13	0,091	5,69	0,128	8,00	0,130	8,13	0,175	10,94
30/04/2018	4	0,101	6,31	0,111	6,94	0,141	8,81	0,237	14,81	0,259	16,19	0,269	16,81
01/05/2018	7	0,111	6,94	0,138	8,63	0,184	11,50	0,246	15,38	0,301	18,81	0,288	18,00
07/05/2018	10	0,133	8,31	0,190	11,88	0,221	13,81	0,257	16,06	0,348	21,75	0,367	22,94
08/05/2018	14	0,168	10,50	0,203	12,69	0,242	15,13	0,320	20,00	0,411	25,69	0,410	25,63
22/05/2018	20	0,174	10,88	0,216	13,50	0,273	17,06	0,364	22,75	0,417	26,06	0,460	28,75
27/06/2018	30	0,188	11,75	0,259	16,19	0,286	17,88	0,399	24,94	0,438	27,38	0,471	29,44
31/05/2018	35	0,194	12,13	0,263	16,44	0,301	18,81	0,408	25,50	0,451	28,19	0,486	30,38
03/06/2018	40	0,196	12,25	0,271	16,94	0,313	19,56	0,412	25,75	0,472	29,50	0,501	31,31

2- Tableau III.13 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (sable alluvionnaire + liège+fumée de silice)

date	jours	S0(00%)		S1(20%)		S2(30%)		S3(40%)		S4(50%)		S5(60%)	
		$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)
17/05/2018	1	0,027	1,69	0,057	3,56	0,092	5,75	0,103	6,44	0,119	7,44	0,202	12,63
22/05/2018	3	0,049	3,06	0,084	5,25	0,108	6,75	0,134	8,38	0,139	8,69	0,234	14,63
27/05/2018	7	0,100	6,25	0,097	6,06	0,126	7,88	0,190	11,88	0,195	12,19	0,273	17,06
31/05/2018	10	0,107	6,69	0,112	7,00	0,163	10,19	0,213	13,31	0,235	14,69	0,344	21,50
03/06/2018	14	0,123	7,69	0,151	9,44	0,218	13,63	0,264	16,50	0,380	23,75	0,433	27,06
07/06/2018	20	0,174	10,88	0,200	12,50	0,278	17,38	0,385	24,06	0,397	24,81	0,437	27,31
12/06/2018	28	0,205	12,81	0,232	14,50	0,305	19,06	0,390	24,38	0,416	26,00	0,455	28,44
17/06/2018	35	0,218	13,63	0,277	17,31	0,349	21,81	0,409	25,56	0,443	27,69	0,473	29,56
20/06/2018	40	0,223	13,94	0,289	18,06	0,351	21,94	0,417	26,06	0,456	28,50	0,482	30,13

3- Tableau III.14 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (sable calcaire + liège)

date	jours	S0(00%)		S1(20%)		S2(30%)		S3(40%)		S4(50%)		S5(60%)	
		$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ } (\mu\text{m}/\text{cm})$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ } (\mu\text{m}/\text{cm})$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ } (\mu\text{m}/\text{cm})$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ } (\mu\text{m}/\text{cm})$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ } (\mu\text{m}/\text{cm})$	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l \text{ } (\mu\text{m}/\text{cm})$
29/04/2018	1	0,016	1,00	0,050	3,13	0,065	4,06	0,103	6,44	0,136	8,50	0,156	9,75
30/04/2018	3	0,033	2,06	0,106	6,63	0,092	5,75	0,115	7,19	0,216	13,50	0,284	17,75
03/05/2018	7	0,072	4,50	0,175	10,94	0,113	7,06	0,135	8,44	0,324	20,25	0,354	22,13
07/05/2018	10	0,105	6,56	0,189	11,81	0,168	10,50	0,205	12,81	0,347	21,69	0,361	22,56
08/05/2018	14	0,130	8,13	0,247	15,44	0,277	17,31	0,306	19,13	0,363	22,69	0,428	26,75
22/05/2018	20	0,136	8,50	0,274	17,13	0,325	20,31	0,354	22,13	0,406	25,38	0,459	28,69
27/06/2018	28	0,188	11,75	0,354	22,13	0,396	24,75	0,402	25,13	0,443	27,69	0,544	34,00
31/05/2018	35	0,225	14,06	0,392	24,50	0,430	26,88	0,463	28,94	0,510	31,88	0,554	34,63
03/06/2018	40	0,253	15,81	0,403	25,19	0,446	27,88	0,486	30,38	0,514	32,13	0,561	35,06

4- Tableau III.15 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (sable calcaire + liège+fumée de silice)

date	jours	S0(00%)		S1(20%)		S2(30%)		S3(40%)		S4(50%)		S5(60%)	
		$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	$\Delta l(\text{mm})$	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{cm}$)
17/05/2018	1	0,057	3,56	0,091	5,69	0,115	7,19	0,101	6,3125	0,158	9,875	0,217	13,56
22/05/2018	3	0,105	6,56	0,121	7,56	0,173	10,81	0,157	9,8125	0,276	17,25	0,238	14,88
27/05/2018	7	0,111	6,94	0,139	8,69	0,295	18,44	0,301	18,813	0,335	20,94	0,379	23,69
31/05/2018	10	0,121	7,56	0,170	10,63	0,319	19,94	0,344	21,5	0,344	21,5	0,410	25,63
03/06/2018	14	0,143	8,94	0,215	13,44	0,366	22,88	0,459	28,688	0,470	29,38	0,494	30,88
07/06/2018	21	0,156	9,75	0,293	18,31	0,397	24,81	0,498	31,125	0,504	31,5	0,518	32,38
12/06/2018	28	0,205	12,81	0,303	18,94	0,408	25,50	0,502	31,35	0,531	33,19	0,555	34,69
17/06/2018	35	0,242	15,13	0,352	22,00	0,443	27,69	0,512	32,00	0,556	34,75	0,572	35,75
20/06/2018	40	0,267	16,69	0,369	23,06	0,461	28,81	0,523	32,688	0,564	35,25	0,588	36,75

Tableau III.15 : les résultats des résistances à la traction par flexion des différents bétons

Pourcentage de liège %	Mortier sable alluvionnaire				Mortier sable calcaire				Mortier sable alluvionnaire +fumée de silice				Mortier sable calcaire +fumée de silice			
	F(KN)		moyenF (KN)	Rf(MP A)	F(KN)		moyen F(KN)	Rf(MP A)	F(KN)		moyen F(KN)	Rf(MP A)	F(KN)		moyen F(KN)	Rf(MP A)
SERIE 0 (00%)	ff1=	1,38	1,37	3,21	ff1=	1,99	1,99	4,66	ff1=	1,46	1,47	3,44	ff1=	2,47	2,13	4,98
	ff2=	1,36			ff2=	1,89			ff2=	1,47			ff2=	2,16		
	ff3=	1,37			ff3=	2,01			ff3=	1,48			ff3=	2,30		
SERIE 1 (20%)	ff1=	1,27	1,27	2,97	ff1=	1,56	1,73	4,05	ff1=	1,36	1,37	3,21	ff1=	1,99	2,00	4,68
	ff2=	1,41			ff2=	1,73			ff2=	1,37			ff2=	2,57		
	ff3=	1,13			ff3=	1,90			ff3=	1,38			ff3=	1,44		
SERIE 2 (30%)	ff1=	1,19	1,19	2,78	ff1=	1,70	1,40	3,28	ff1=	1,29	1,29	3,02	ff1=	2,25	1,88	4,40
	ff2=	1,20			ff2=	1,40			ff2=	1,31			ff2=	1,88		
	ff3=	1,18			ff3=	1,10			ff3=	1,28			ff3=	1,51		
SERIE 3 (40%)	ff1=	0,91	0,91	2,12	ff1=	0,90	0,98	2,29	ff1=	1,22	1,22	2,85	ff1=	1,52	1,30	3,04
	ff2=	0,85			ff2=	0,98			ff2=	1,13			ff2=	1,08		
	ff3=	0,97			ff3=	1,16			ff3=	1,31			ff3=	1,30		
SERIE 4 (50%)	ff1=	0,55	0,61	1,43	ff1=	0,61	0,72	1,68	ff1=	0,81	0,80	1,87	ff1=	0,83	0,83	1,94
	ff2=	0,67			ff2=	0,72			ff2=	0,79			ff2=	0,85		
	ff3=	0,61			ff3=	0,83			ff3=	0,80			ff3=	0,84		
SERIE 5 (60%)	ff1=	0,41	0,45	1,05	ff1=	0,46	0,47	1,10	ff1=	0,43	0,46	1,07	ff1=	0,46	0,50	1,18
	ff2=	0,49			ff2=	0,47			ff2=	0,46			ff2=	0,67		
	ff3=	0,45			ff3=	0,48			ff3=	0,49			ff3=	0,37		

Annexes

Tableau III.16 : les résultats des résistances à la compression des différents bétons

Pourcentage de liège %	Mortier sable alluvionnaire					Mortier sable calcaire					Mortier sable alluvionnaire +fumée de silice					Mortier sable calcaire +fumée de silice								
	F(KN)				moyen F(KN)	Rc(MPA)	F(KN)				moyen F(KN)	Rc(MPA)	F(KN)				moyen F(KN)	Rc(MPA)	F(KN)				moyen F(KN)	Rc(MPA)
SERIE 0 (00%)	fc1=	33,19	Fc4=	45,38	38,48	24,05	fc1=	36,06	Fc4=	34.20	33,04	20,65	fc1=	39,35	Fc4=	41,35	42.45	26,53	fc2=	36.13	Fc4=	36,75	38.76	24,23
	fc2=	37.20	Fc5=	32.85			fc2=	32.53	Fc5=	33.09			fc2=	41.08	Fc5=	42.88			fc3=	41.39	Fc5=	40.77		
	fc3=	45,05	Fc6=	37,21			fc3=	30,53	Fc6=	31.83			fc3=	46.92	Fc6=	43.12			fc3=	58,19	Fc6=	70,01		
SERIE 1 (20%)	fc1=	18,44	Fc4=	19,33	20,86	13,04	fc1=	18.51	Fc4=	19.76	19,59	12,24	fc1=	25.19	Fc4=	26,22	26,69	16,68	fc1=	32,75	Fc4=	30,11	25,44	15,90
	fc2=	19,36	Fc5=	17,42			fc2=	21,89	Fc5=	20.07			fc2=	26.90	Fc5=	25,40			fc2=	20,77	Fc5=	25.44		
	fc3=	24.78	Fc6=	25.83			fc3=	15.12	Fc6=	18.94			fc3=	27.98	Fc6=	28.45			fc3=	0,00	Fc6=	0,00		
SERIE 2 (30%)	fc1=	19.71	Fc4=	26,37	20,24	12,65	fc1=	16,53	Fc4=	15.99	16,49	10,30	fc1=	24,77	Fc4=	24,93	25,79	16,12	fc1=	16,95	Fc4=	22,07	22,47	14,04
	fc2=	22,16	Fc5=	14.63			fc2=	16,53	Fc5=	16.24			fc2=	25,86	Fc5=	25,98			fc2=	28.39	Fc5=	13,98		
	fc3=	18,85	Fc6=	19,72			fc3=	17.82	Fc6=	17.24			fc3=	26.74	Fc6=	26.46			fc3=	0,00	Fc6=	0,00		
SERIE 3 (40%)	fc1=	8.23	Fc4=	8,05	8,30	5,19	fc1=	8,22	Fc4=	8.13	8,02	5,01	fc1=	11.09	Fc4=	10,29	12,50	7,81	fc1=	12.36	Fc4=	23,52	12,03	7,52
	fc2=	7,23	Fc5=	7,45			fc2=	7.97	Fc5=	7.66			fc2=	12.71	Fc5=	12,28			fc2=	13.44	Fc5=	10.29		
	fc3=	9.44	Fc6=	9.40			fc3=	7.87	Fc6=	8.27			fc3=	13.70	Fc6=	14.93			fc3=	0,00	Fc6=	0,00		
SERIE 4 (50%)	fc1=	6,00	Fc4=	5,06	6,36	3,97	fc1=	5,57	Fc4=	5.77	5,35	3,35	fc1=	11,30	Fc4=	8,57	10,21	6,38	fc1=	10,13	Fc4=	10,51	8,64	5,40
	fc2=	6,71	Fc5=	8.34			fc2=	5,06	Fc5=	4.98			fc2=	9,58	Fc5=	9,75			fc2=	7,86	Fc5=	7,94		
	fc3=	6.37	Fc6=	5,68			fc3=	5.42	Fc6=	5.30			fc3=	9.75	Fc6=	12.31			fc3=	0,00	Fc6=	0,00		
SERIE 5 (60%)	fc1=	3,08	Fc4=	3,53	3,76	2,35	fc1=	2,53	Fc4=	2.47	2,61	1,63	fc1=	6,04	Fc4=	6.60	5,76	3,60	fc1=	4,69	Fc4=	4,47	4,66	2,91
	fc2=	3,73	Fc5=	3,70			fc2=	2,87	Fc5=	2.78			fc2=	5,48	Fc5=	4,92			fc2=	5,44	Fc5=	4,82		
	fc3=	4.42	Fc6=	4.05			fc3=	2.43	Fc6=	2.31			fc3=	0,00	Fc6=	0,00			fc3=	0,00	Fc6=	0,00		

ملخص

هذا العمل هو جزء من مجال بحث واسع يتمثل في تجميع واستغلال المواد المحلية وكذا النفايات الصناعية في تطوير مواد بناء خاصة من أجل تخفيض الاستهلاك المفرط للطاقة في مجال البناء وكذلك من أجل حل المشاكل البيئية المتعلقة باسترجاع النفايات الصناعية والمنزلية. هذا البحث يهدف إلى دراسة إمكانية استعمال خرسانة خفيفة من الرمل عن طريق إضافة حبيبات الفلين ودراسة تأثير إضافة هذه الحبيبات على الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية و الحرارية للمركبات التي تم الحصول عليها.

في هذا العمل قمنا بدراسة خصائص نوعين من الرمل (رمال كلسية و الرمال الغرينية) ، والتي توجد بكميات كبيرة في منطقة الأغواط ، والنفايات المعاد استخدامها عبارة عن حبيبات الفلين . حيث تم إدخال هذه الإضافات بنسب مختلفة: 20 % ، 30 % ، 40 % ، 50 % ، 60 % بالنسبة للحجم الإجمالي للمؤونة. النتائج المتحصلة عليها بينت انه كلما زادت كميات حبيبات الفلين كلما انخفضت الكتلة الحجمية و التوصيل الحراري و ازداد العزل الحراري لكنه يؤدي إلى خفض كبير في المقاومة الميكانيكية للخرسانة و لهذا من اجل تحسين هذه المقاومة قمنا بإضافة نسبة 10 % من فحم السليس حيث بينت النتائج انه يحسن نسبيا في السلوك الميكانيكي للخرسانة .

كما بينت النتائج انه من اجل عزل حراري جيد و مقاومة أحسن يفضل استعمال الرمال الغرينية في خرسانة الفلين عوض الرمال الكلسية .

الكلمات المفتاحية: استعادة النفايات ، الخرسانة خفيفة الوزن ، خرسانة الفلين ، حبيبات الفلين ، الفلين الموسع ، الرمال الكلسية ، الرمل الغريني ، العزل الحراري.

Résumé

Cette étude fait partie d'une thématique de recherche principale axée sur la valorisation et l'exploitation des ressources locales ainsi que certains résidus industriels solides pour la mise au point de matériaux de construction spéciale. Afin de réduire la consommation d'énergie excessive dans la construction. Ainsi que de résoudre les problèmes environnementaux liés à la récupération des déchets industriels et domestiques.

Cette recherche vise à étudier la possibilité d'utiliser du béton léger de sable en ajoutant des granules de liège et en étudiant l'effet de l'ajout de ces granulats sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composés obtenus.

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement de deux types de sable (sable calcaire et sable alluvionnaire), qui se trouvent en grande quantité dans la région de Laghouat, et les déchets de réutilisation sont des granulats de liège. Ces additifs ont été introduits en différents pourcentages: 20%, 30%, 40%, 50%, et 60% par rapport au volume total de la matrice.

Les résultats obtenus montrent que plus la quantité de granules de liège est élevée, plus la masse volumique et la conductivité thermique sont faibles, plus l'isolation thermique est élevée. Mais cela conduit à une réduction significative de la résistance mécanique du béton. Afin d'améliorer cette résistance, nous avons ajouté 10% de la fumée de silice car les résultats ont montré qu'il améliore relativement dans le comportement mécanique du béton.

Les résultats ont également montré que pour une meilleure isolation thermique et une meilleure résistance, les sables alluvionnaires devraient être utilisés dans le béton de liège au lieu de sable de calcaire.

Mots clés : valorisation des déchets, béton léger, béton de granulat légers, bétons de liège , grains de liège, liège expansé, sable calcaire, sable alluvionnaire , isolation thermique .

Abstract

This study is part of a main research theme focused on the valorization and exploitation of local resources as well as some solid industrial residues for the development of special building materials. In order to reduce excessive energy consumption in the construction as well as solving environmental problems related to the recovery of industrial and domestic waste.

This research aims study the possibility of using lightweight sand concrete by adding cork granules and studying the effect of the addition of these aggregates on the physico-mechanical and thermal properties of the compounds obtained.

In this work, we studied the behavior of two types of sand (calcareous sands and alluvial sands), which are found in large quantities in the Laghouat region, and the reuse waste is cork aggregates. These additives were introduced in different percentages: 20%, 30%, 40%, 50%, and 60% for the total volume of the components.

The results obtained show that the higher the quantity of cork granules, the lower the density and the thermal conductivity, the higher the thermal insulation. this leads to a significant reduction in the mechanical strength of the concrete. In order to improve this resistance, we added 10% of the silica fume as the results showed that it is relatively improved in the mechanical behavior of the concrete.

The results also showed that for better thermal insulation and better resistance, alluvial sands should be used in cork concrete instead of limestone sand.

Key words: waste recovery, lightweight concrete, light aggregate concrete, cork concrete, cork grain, expanded cork, calcareous sand, alluvial sand, thermal insulation.