



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique



UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE  
LAGHOUAT

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Génie Civil

Option : **Matériaux de construction**

Présenté par

**Ferchene Fatiha et Bouchaala Aicha**

**THEME**

**Influence de la taille des granulats sur les  
propriétés physico-mécaniques et  
thermiques des bétons à base de granulats  
de liège**

Soutenu le 23/09/2017

Devant le jury

**Mr Ferhat Ahmida  
Bederina Madani  
Ziregue Ahmed**

**M.A.A à L'UATL  
Pr à L'UATL  
MAA à L'UATL**

**Président  
Examineur  
Encadreur**

*Promotion 2016*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# الإهداء

بعد طول الصبر والعناء وفقني الله إلى هذا العطاء ولم يبق لي سوى في

الإهداء

بعد الصلاة والسلام على الهادي سيدنا محمد أبدأ إهدائي الى ينبوع العطاء الذي زرع

في نفسي الطموح و المثابرة والدي العزيز.

إلى نبع الحب والحنان ومرسى الأمان أمي الغالية.

إلى من يحملون في عيونهم ذكريات طفولتي وشبابي ..... اخواني واخواتي

( محمد الكريم، مراد، حسين، نوال، أبرار).

إلى من ضاقت السطور من ذكرهم فوسعهم قلبي... صديقاتي

إلى زميلتي التي تقاسمت معها متاعب هذا العمل فتيحة فرشان

إلى كل من لم ييخل علينا بعمله و كان كريما في عطائه اهديه هذا العمل

إلى جميع خريجي مواد البناء دفعة 2016 م.

عائشة

# الإهداء

الحمد لله رب العالمين و الصلاة و السلام على خاتم الأنبياء و المرسلين  
أما بعد

اهدي ثمرة هذا العمل المتواضع إلى:

من أمر الله بطاعتهما ، والدي الكريمين حفظهما الله فاني لا أوفي حقهما ما

حييت

إلى كل إخوتي وأخواتي

إلى كل الأهل و الأقارب

إلى كل الصديقات و الأصدقاء

إلى كل الزميلات و الزملاء في الدراسة

إلى كل البراعم : عبد المالك ، محمد سيف الدين ، يوسف ، عبد المؤمن ، خلود

إلى من كانوا لي عوناً وسبباً في ولوج باب العلم والمعرفة أساتذتي في كل الأطوار

جزاهم الله خير الجزاء

إلى كل الزملاء الذين جمعني بهم الحياة الدراسية وربطت أواصر المحبة بيننا

إلى كل الأحباء والأصدقاء بدون استثناء

إلى زميلتي التي تقاسمت معها متاعب هذا العمل عائشة بوشعالة

إلى طالبة الهندسة المدنية خاصة دفعات 2016-2017

وفي الأخير أرجو من الله تعالى أن يجعل عملي هذا نفعاً يستفيد منه الجميع

فرشان فتيحة

## شكر و عرفان

الحمد لله الذي اعاننا على انجاز هذا العمل فما كان لشيء ان يجري

في ملكه الا بمشيئته جل شأنه

فالحمد لله في الاولى و الاخرة

وعملا بقول رسول الله صلى الله عليه و سلم " من لم يشكر الناس لم يشكر الله "

نتقدم بالشكر الجزيل الى الاستاذ الفاضل زبير احمد الذي وافق على

الاشراف هذا العمل ولم يبخل علينا طوال مشوار

اعداد هذا البحث بالنصح و الارشاد و التوجيه

كما نشكر السادة اعضاء لجنة المناقشة مسبقا على تفضلهم بقبول مناقشة

واثراء هذا البحث

والشكر موصول الى اسرة كلية الهندسة المدنية

من أساتذة ، طلبة ، عمال

و الشكر الجزيل لكل من قدم لنا يد العون و المساعدة من قريب او من بعيد

عائشة ، فتيحة

# Remerciements

Nous voudrions exprimer notre profonde reconnaissance et nos remerciements à notre encadreur de thèse Monsieur **Ahmed.Ziregue** Maître assistant à l'Université de Laghouat d'avoir proposé et diriger ce sujet, nous sommes très reconnaissants à son égard pour tout ce conseil et ces directives durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Nous remercions très vivement Monsieur **Ferhat Ahmida**, Maître d'assistant (A) à l'université de Laghouat, qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Nous adressons également nos remerciements à Monsieur **BEDRINA MADANI**, professeur à l'université de Laghouat pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'examiner ce mémoire et pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

Enfin, 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.

**FERCHANE ET BOUCHAALA**

## ملخص

أمام الطلب المتزايد على مصادر المواد وكذا متطلبات الحفاظ على البيئة في رؤية التنمية المستدامة ، فقد أصبح من الضروري دراسة جميع احتمالات استعمال و تميمين النفايات و بقايا المنتجات الصناعية و خاصة في مجال الهندسة المدنية.

الرمال الكلسية هو ناتج عن بقايا تكسير الأحجار الكلسية في مقالع تصنيع الحصى و هو عادة غير مطلوب بكثرة بسبب الارتفاع

. 80  $\mu\text{m}$  المحسوس في الحبيبات الدقيقة الاقل من هذا العمل هو جزء من تميمين بقايا المنتجات المحلية مثل الرمل الكلسي الناتج عن تكسير الأحجار الكلسية الموجودة في منطقة الأغواط (الجزائر) و كذا النفايات الناتجة عن تصنيع الفلين ، واستخدامها في صناعة المواد الاسمنتية للبناء أولا و قبل كل شيء العزل الحراري.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو الحصول على خرسانة كلسية خفيفة تحتوي أساسا على حبيبات الفلين ذات خصائص فيزيائية و ميكانيكية و حرارية و كذا دراسة تأثير أبعاد هذه الحبيبات على هذه الخصائص النتائج المتحصل عليها توضح أن دمج حبيبات الفلين داخل الخرسانة تنقص من الكتلة الحجمية و التوصيل الحراري و هذا ما يحسن من العزل الحراري ، ولكن يحدث نقضا كبيرا في المقاومة الميكانيكية للخرسانة

الخرسانة ذات حبيبات الفلين 8/3 هي أكثر خفة و أكثر عزلا و ذات مقاومة ميكانيكية ضعيفة بالنسبة للخرسانة ذات حبيبات الفلين 15/8.

كلمات المفتاح : التنمية المستدامة , تميمين النفايات , الرمل الكلسي , الفلين المنفوخ , العزل.

**ABSTRACT:** Faced with the growing needs of resource materials and the requirements of environmental protection in a vision of sustainable development, it became necessary to study all the possibilities of reuse and recycling of industrial wastes and by-product especially in the field of civil engineering. There is an increasing interest in limestone fines from limestone quarries in concrete construction to overcome inherent deficiencies in river sand in particular regions of North Africa. Limestone sand is a by-product of the quarry process and typically does not have a significant demand due to its high content of small particles whose diameters are less than 80  $\mu\text{m}$ . This work is part of the promotion of local products such as waste from the quarry crushing (limestone sand) in the region of Laghouat (Algeria) and waste from the manufacture of agglomerated expanded cork, using them in the making of cement materials for construction primarily for thermal insulation. To study the influence of the size of the aggregates on the physico-mechanical and thermal properties of concrete, two classes of granular aggregates are used 1/3, 3/8 and 8/15. The results obtained showed that

the reduction weight of concrete containing crushed sand with expanded cork significantly reduces its thermal conductivity which improves their thermal insulation, but causes a drop in the strength of concrete produced. Lightweight concrete with expanded cork granules 3/8 are the lightest and most isolated, and they have low mechanical strength compared to concrete with lightweight aggregates 8/15.

**KEYWORDS:** Sustainable development, valorization of wastes, byproducts, limestone sand, expanded cork, insulation.

## **RESUME:**

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux, ainsi que les exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil. Le sable calcaire est un sous-produit du processus de carrière et typiquement n'a pas une demande importante en raison de sa teneur élevée en particules fines dont le diamètre est inférieur à 80  $\mu\text{m}$ . Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des produits locaux tels que les déchets de carrière de concassage (sable calcaire) de la région de Laghouat (Algérie) et les déchets issues de la fabrication des agglomérées de liège expansé, en les utilisant dans la confection des matériaux cimentaires de construction destinés en premier lieu à l'isolation thermique. L'objectif principal de ce sujet est l'élaboration d'un béton calcaire léger à base de granulats de liège expansés et sa caractérisation physico-mécanique et thermique ainsi que l'étude de l'influence de la taille des granulats sur ces caractéristiques. Les résultats obtenus ont montré que l'incorporation des granulats de liège dans le béton fait diminuer considérablement sa masse volumique et sa conductivité thermique ce qui améliore son isolation thermique, mais entraîne une chute de la résistance mécanique du béton élaboré. Les bétons allégés avec les granulats de liège expansé 3/8 sont les plus légers et les plus isolants et possèdent des résistances mécaniques faibles par rapport aux bétons allégés avec les granulats 8/15.

**MOTS-CLEFS:** Développement durable, valorisation des déchets, sous-produits, sable calcaire, liège expansé, isolation.

**LISTE**  
**ILLURTATIVE**

## LISTE DES TABLEAUX

**Chapitre I : Etude bibliographique**

<b>Tableau I-1 :</b> Caractéristiques des granulats légers.....	
<b>Tableau I-2:</b> Module d'élasticité de quelques types de bétons légers .....	
<b>Tableau I-3:</b> Comparaison de la composition chimique du liège et de fibres de bois conventionnelles .....	
<b>Tableau I.4.</b> Propriétés mécaniques générales de liège.....	

**Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales**

<b>Tableau II.1 :</b> caractéristiques chimiques du ciment.....	
<b>Tableau II.2 :</b> Composition minéralogique du ciment.....	

**Chapitre III Résultats expérimentaux et discussion**

<b>Tableau III-1 :</b> L'analyse chimique de l'eau de gâchage.....	
<b>Tableau III.2 :</b> Caractéristiques physiques des sable.....	
<b>Tableau III-3:</b> Résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire.....	
<b>Tableau III.4</b> Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire.....	
<b>Tableau III.5</b> Caractéristiques physiques du ciment.....	
<b>Tableau III.6</b> Composition chimique du ciment CPJ45 de Sour El Gozlane.....	
<b>Tableau III.7:</b> Analyse minéralogique du ciment.....	
<b>Tableau III.8</b> Résultats de l'analyse granulométrique du liège 1/3	
<b>Tableau III-9</b> Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 3/8	
<b>Tableau III-10</b> Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 8/15	
<b>Tableau III.11</b> Masse volumique apparent des granulats de liège expansé 1/3, 3/8 et 8/15	
<b>Tableau III.12</b> Masse volumique absolue des granulats de liège 1/3, 3/8 et 8/15	
<b>Tableau III.13</b> Essai d'absorption et désorption des granulats de liège 1/3, 3/8 et 8/15	
<b>Tableau III.14</b> Absorption d'eau des granulats de liège 1/3, 3/8 et 8/15	
<b>Tableau III.15</b> Désorption d'eau des granulats de liège 1/3, 3/8 et 8/15	
<b>Tableau III.16</b> Valeurs de la résistance en compression des mortiers de sable calcaire en fonction du rapport E/C	

**Tableau III.17** Masses volumiques de compositions à l'état frais pour les trois granulométries

**Tableau III.18** Variation de la Masses volumiques apparente de BCLL 1/3 en fonction du dosage en granulat

**Tableau III.19** Variation de la Masses volumiques apparente de BCLL 3/8 en fonction du dosage en granulat

**Tableau III.20** Variation de la Masses volumiques apparente de BCLL 8/15 en fonction du dosage en granulat

**Tableau III.21** Comparaison des masses volumiques apparente de BCLL expansé à 28 jours selon le pourcentage de granulométrie

**Tableau III.22** Evolution du retrait en fonction de l'âge 1/3

**Tableau III.23** Evolution du retrait en fonction de l'âge 3/8

**Tableau III.24** Evolution du retrait en fonction de l'âge 8/15

**Tableau III.25** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 1/3 en fonction du dosage en granulats

**Tableau III.26** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction du dosage en granulats

**Tableau III.27** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction du dosage en granulats

**Tableau III.28** Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 1/3 en fonction du dosage en granulats

**Tableau III.29** Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction du dosage en granulats

**Tableau III.30** Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction du dosage en granulats

**Tableau III.31** Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 1/3.

**Tableau III.32** Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 3/8.

**Tableau III.33** Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 8/15.

## LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : Etude bibliographique

<b>Figure I.1:</b> Etalement et le temps d'écoulements du mortier en fonction de taux des fines calcaires.....	26
<b>Figure I.2:</b> Variation du rapport E/C avec le pourcentage de fines calcaires .....	27
<b>Figure I-3:</b> Représentation schématique des différents types de béton légers.....	29
<b>Figure I-4.</b> Différents granulats légers naturels .....	32
<b>Figure I-5.</b> Différents granulats légers artificiels .....	34
<b>Figure I-6.</b> Four à très haute température à 1250°C, GEM, France.....	35
<b>Figure I-7:</b> Courbe d'absorption d'eau.....	37
<b>Figure I -8:</b> Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers .....	38
<b>Figure I-9:</b> Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique.....	39
<b>Figure I-10 :</b> Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats.....	41
<b>Figure I-11:</b> Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de faible résistance.....	42
<b>Figure I-12:</b> Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de grande résistance .....	43
<b>Figure I-13:</b> Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains.....	43
<b>Figure I -14 :</b> Répartition mondiale des subéraies.....	45
<b>Figure I.15.</b> Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège .....	46
<b>Figure I.16.</b> Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle .....	47
<b>Figure I.17.</b> courbe Typique contrainte-déformation de compression pour le liège .....	50
<b>Figure I.18.</b> Comportement mécanique en traction pour le liège, dans toutes les directions (LRT).....	52
<b>Figure I-19 :</b> Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction de la densité apparente.....	56
<b>Figure I-20 :</b> Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège.....	57
<b>Figure I-21:</b> Masse sèche cumulé du matériau dégradé.....	57
<b>Figure I-22:</b> Résistance moyenne à la compression du béton.....	58

<b>Figure I-23</b> : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau : cas du béton de liège.....	59
<b>Figure I-24</b> : Variation de la résistance à la compression en fonction de la conductivité thermique apparente : cas du béton allégé avec du liège.....	59
<b>Figure I-25</b> : Micrographie d'échantillons de la composition liège - ciment fracturée (MEB)...	60
<b>Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales</b>	
<b>Figure II-1</b> : Schémas de l'éprouvette graduée.....	61
<b>Figure II-2</b> : Série de tamis.....	63
<b>Figure II-3</b> : Dispositif expérimental de l'appareil Le Chatelier.....	64
<b>Figure II-4</b> : Dispositif expérimental du perméabilimètre Blaine .....	65
<b>Figure II-5</b> : a) Mesure de la masse volumique en vrac. b) Etat saturé surface sèche du gravillon 700A... c) Etat saturé surface sèche du sable léger 650A.....	67
<b>Figure II-6</b> : Principe de la caractérisation des masses volumiques réelles.....	68
<b>Figure II-7</b> : Appareil de tamisage.....	70
<b>Figure II-8</b> : Classes de consistance mesurées au cône d'Abrams.....	72
<b>Figure II.9</b> Photo de l'appareil de retrait.....	76
<b>Figure II.10</b> : Appareil de mesure de la compression.....	77
<b>Figure II-11</b> : Schémas de l'essai de flexion.....	78
<b>Figure II.12</b> : Schéma de la sonde TPS.....	80
<b>Chapitre III Résultats expérimentaux et discussion</b>	
<b>Figure III.1</b> Echantillons de sable calcaire 0/3 et de ciment CPJ45.....	81
<b>Figure III.2</b> : Echantillon de granulats de liège expansé 1/3, 3/8 et 8/15.....	82
<b>Figure III.3</b> : Courbes granulométriques du sable calcaire.....	86
<b>Figure III.4</b> : Courbes granulométriques du sable alluvionnaire.....	86
<b>Figure III.5</b> Diffractogramme du ciment CPJ 45.....	88
<b>Figure III.6</b> Courbes granulométriques du sable alluvionnaire. Sable calcaire et des granulats de liège.....	91
<b>Figure III.7</b> Cinétique d'absorption des granulats légers pendant 48 heures.....	93
<b>Figure III.8</b> Cinétique désorption des granulats légers pendant 48 heures.....	94
<b>Figure III.9</b> Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C.....	96
<b>Figure III.10</b> Variation de la masse volumique du BCLL 1/3 En fonction de l'âge du béton...100	
<b>Figure III.11</b> Variation de la masse volumique du BCLL 3/8 En fonction de l'Age du béton..101	

<b>Figure III.12</b> Variation de la masse volumique du BCLL 8/15 En fonction de l'âge du béton.	102
<b>Figure III.13</b> Histogramme de comparaison des masses volumiques en fonction de dosage en liège.....	103
<b>Figure III.14</b> Evolution du retrait du BCLLE 1/3 en fonction de pourcentages de liège.....	105
<b>Figure III.15</b> Evolution du retrait du BCLL 1/3 en fonction de l'âge du béton.....	105
<b>Figure III.16</b> Evolution du retrait du BCLLE 3/8 en fonction de pourcentages de liège.....	106
<b>Figure III.17</b> Evolution du retrait du BCLLE 3/8 en fonction de l'âge du béton.....	106
<b>Figure III.18</b> Evolution du retrait du BCLL 8/15 en fonction de pourcentages de liège.....	107
<b>Figure III.19</b> Evolution du retrait du BCLL 8/15 en fonction de l'âge du béton.....	108
<b>Figure III.20</b> Histogramme de comparaison du retrait du BCLLE 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction de pourcentages de liège.....	108
<b>Figure III.21</b> Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 1/3 en de la masse volumique.....	109
<b>Figure III.22</b> Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction de la masse volumique.....	110
<b>Figure III.23</b> Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction de la masse volumique.....	111
<b>Figure III.24</b> Histogramme de comparaison de la compression du BCLLE 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction de pourcentages de liège.....	111
<b>Figure III.25</b> Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 1/3 en fonction de la masse volumique.....	112
<b>Figure III.26</b> Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction de la masse volumique.....	113
<b>Figure III.27</b> Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction de la masse volumique.....	114
<b>Figure III.28</b> Histogrammes de comparaisons de la traction du BCLL 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction de parentages de liège.....	114
<b>Figure III.29</b> Variation de la conductivité thermique du BCLL 1/3 en fonction de la densité.	115
<b>Figure III.30</b> Variation de la conductivité thermique du BCLL 3/8 en fonction de la densité.	116
<b>Figure III.31</b> Variation de la conductivité thermique du BCLL 8/15 en fonction de la densité.	117
<b>Figure III.32</b> Histogrammes de comparaisons de la conductivité thermique du BCLL 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction du pourcentage de liège.....	117
<b>Figure III.33</b> Histogrammes de comparaisons de la diffusivité du BCLL 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction du pourcentage de liège.....	118
<b>Figure III.34</b> Photos de coupes d'échantillons de BCLLE 1/3, 3/8 et 8/15.....	119

# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

---

## SOMMAIRE

DEDICACE	
REMIRECEMENT.....	1
RESUME.....	5
LISTE ILLUSTRATIVE.....	6
SOMMAIRE.....	12
NOMENCLUTURE.....	17
INTRODUCTION GENERALE.....	19

### **Chapitre I : Etude bibliographique**

<b>I.1</b> Introduction.....	24
<b>I.2</b> les bétons de sables calcaires.....	24
<b>I.3</b> Généralités sur les bétons légers .....	27
<b>I.3.1.</b> Définition du béton léger.....	27
<b>I.3.2</b> Classification des bétons légers.....	28
<b>I.3.3</b> Différences entre béton classique et béton léger.....	30
<b>I.3.4</b> Domaine d'utilisation des bétons légers.....	31
<b>I.3.5</b> Les bétons de granulats légers.....	31
<b>I.3.5.1</b> Les granulats légers.....	31
<b>I.3.5.2</b> Types de granulats légers.....	32
<b>I.3.5.3</b> Classification des granulats légers.....	36
<b>I.3.5.4</b> Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers.....	37
<b>I.3.6</b> Les bétons de granulats légers.....	38
<b>I.4</b> Béton de granulats de liège.....	44
<b>I.4.1</b> Etat d'art sur le liège.....	44
<b>I.4.1.1</b> Introduction.....	44
<b>I.4.1.2</b> Historique.....	44
<b>I.4.1.3</b> Chêne liège (Quercus suber L) en Algérie.....	45

# SOMMAIRE

---

I.4.1.4 Anatomie et Constitution du liège.....	46
I.4.1.5 Qualités du liège.....	47
I.4.2. Comparaison entre le liège et le bois.....	47
I.4.3. Propriétés physique du liège.....	48
I.4.4 Composition chimique .....	48
I.4.5. Propriétés mécaniques du liège.....	49
I.4.6 Utilisation du liège.....	52
I.4.6.1. Bouchons en liège naturel.....	52
I.4.6.2 Isolation du liège.....	53
I.4.6.3 Autres applications.....	53
I.4.7 Production du liège .....	54
I.4.8. Les travaux antérieurs sur les composites à base de liège.....	55

## Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

II.1 Introduction .....	61
II.2 Matériaux.....	61
II.2.1 Sable.....	61
II.2.3 Le ciment.....	64
II.2.4 Le liège.....	66
II.2.5 L'eau.....	70
II.2.6 l'adjuvent.....	71
II.3 Etude du béton à l'état frais.....	71
II.3.1 Masse volumique à l'état frais.....	71
II.3.2 Essai de consistance.....	71
II.3.3 Formulation du béton de liège.....	72
II.3.4 Dosage en ciment .....	72
II.3.5 Optimisation du dosage en eau .....	72
II.3.6 Malaxage.....	73
II.3.7 Confection des éprouvettes.....	73

# SOMMAIRE

---

<b>II.3.8</b> Maniabilité.....	74
<b>II.4</b> Etude du béton à l'état durci.....	74
<b>II.4.1</b> Masse volumique .....	74
<b>II.4.2</b> Retrait.....	75
<b>II.4.3</b> Essais mécaniques.....	77
<b>II.4.4</b> Essais thermiques.....	78
<b>II.4.4.1</b> Définitions .....	78
<b>II.4.4.2</b> Méthodes de mesure des paramètres thermiques.....	79
<b>II.4.4.3</b> Dispositif expérimental .....	79
<b>Chapitre III Résultats expérimentaux et interprétation</b>	
<b>III.1</b> Matériaux.....	81
<b>III.1.1</b> Matériaux utilisés.....	83
<b>III.1.2</b> caractéristiques des matériaux premières .....	83
<b>III.1.2.1</b> Le sable.....	83
<b>III.1.2.2</b> Le ciment.....	87
<b>III.1.2.3</b> Les granulats de liège.....	89
<b>III.2</b> Etude des bétons à l'état frais.....	94
<b>III.2.1</b> Formulation et élaboration des bétons.....	94
<b>III.2.1.1</b> Formulation des bétons témoin.....	94
<b>III.2.1.2</b> Formulation des bétons élaborés.....	97
<b>III.3</b> Caractérisation des bétons frais.....	99
<b>III.4</b> Caractérisation du béton durci.....	99
<b>III.4.1</b> Caractéristiques physique.....	99
<b>III.4.2</b> Caractéristiques mécaniques.....	109

# SOMMAIRE

---

<b>III.4.2.1</b> Résistance à la compression.....	109
<b>III.4.2.2</b> Résistance à la flexion.....	112
<b>III.4.3</b> Les caractéristiques thermiques.....	115
<b>III.4.3.1</b> Conductivité thermique.....	115
<b>III.5</b> Aspect interne des bétons élaborés .....	118
Conclusion et recommandations.....	120

## Nomenclatures

**A%** : Coefficient d'absorption (%)

**C<sub>u</sub>** : Coefficient d'uniformité

**C<sub>c</sub>** : Coefficient de courbure

**BCLLE** : Béton calcaire léger de liège Expansé

**E/C** : Rapport Eau/ciment (%)

**C/S** : Rapport Ciment/sable (%)

**C<sub>abs</sub>** : Coefficient d'absorption d'eau des granulats (%)

**P** : Porosité du granulat (%)

**ρ<sub>app</sub>** : Masse volumique apparent (Kg/cm<sup>3</sup>)

**ρ<sub>abs</sub>** : Masse volumique absolue (Kg/cm<sup>3</sup>)

**C<sub>p</sub>** : Porosité (%)

**V<sub>v</sub>** : Volume des vides

**V** : Volume totale

**T** : temps (mn, h)

**M** : Masse de moule rempli

**M\*** : Masse de moule vide

**V** : Volume de moule

**R<sub>c</sub>** : Resistance à la compression

**R** : Resistance à la traction

**λ**: Conductivité thermique (Wm<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

### Introduction générale

Le béton traditionnel est par excellence le matériau le plus employé dans le domaine de Génie civil. Il demeure avec la charpente métallique les matériaux les plus employés dans la construction des ossatures des ouvrages de Génie Civil en raison des performances mécaniques qu'ils offrent. Par ailleurs, utilisé dans la construction des éléments de remplissage, le béton traditionnel n'est plus le matériau idéal pour l'assurances de confort (isolation thermique et phonique. En effet, sa résistance élevée dépasse de loin les sollicitations que supportent ces éléments. De plus, leur masse volumique importante comprise entre 2200 et 2600 kg/m<sup>3</sup> implique des forces d'inertie importantes lors des secousses sismiques et des charges verticales élevées. Ce qui conduit à des dimensions importantes pour les éléments de structure et pour le système de fondation. A ces inconvénients s'ajoute le coût de transport et le problème d'isolation thermique et phonique qui sont fonction de la masse volumique du matériau. En conséquence, construire des murs avec un matériau dense influe considérablement sur le coté économique. Notamment, la consommation énergétique des locaux et sur confort thermique des habitations.

Dans la mesure où la résistance mécanique demeure suffisante, l'utilisation d'un matériau de masse volumique plus faible peut permettre de construire sur des sols de fiable capacité portante ainsi que de réduire les dimensions des éléments porteurs. Les bétons de masse volumique plus faible procurent également une meilleure isolation thermique et phonique qu'un béton ordinaire. De plus, la sensibilisation à la qualité de l'environnement fait que les isolants actuellement sur le marché (laine de verre, polystyrène, etc...) Sont considérés comme des polluants tant au niveau de la fabrication qu'en ce qui concerne le stockage des déchets de chantiers. Dans les pays en développement, la mise au point de matériaux isolants à faible coût technologique à base de matériaux locaux est également une nécessité qui a été signalée lors du deuxième séminaire sur les matériaux locaux à Marrakech en 1995. Dans ce sens, l'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels pour le développement de nouveaux matériaux de construction légers s'avère une alternative très intéressante sur le plan économique et environnemental. C'est dans cette optique que se sont orientés nos travaux.

L'objectif de ce travail est la valorisation de déchets calcaires par leurs transformations en matériaux de construction isolants et porteurs. En effet, l'un des composants principaux des bétons est le sable naturel. Les dépôts de sable naturel, surtout ceux qui sont situés près des grands centres urbains, risquent de s'épuiser ou d'entraîner des frais protection de

## Introduction générale

---

l'environnement. Plusieurs types de résidus et de sous-produits peuvent être utilisés, comme granulats. Parmi ces résidus on trouve ceux provenant de l'industrie des granulats, en particulier des stations de concassage. Ceux-ci génèrent dans certaines régions des quantités importantes de résidus actuellement non exploités et qui constituent à la fois une gêne environnementale et une perte de matière première. L'importance de gisement que constituent ces déchets de nature souvent calcaire a conduit vers une valorisation susceptible de répondre aux besoins socioéconomiques. Écologiques et de satisfaire les objectifs d'économie d'énergie notamment dans les pays en développement. La proposition a été faite de transformer ces déchets calcaires en matériaux de construction thermiquement isolants et porteurs à hautes qualités environnementales. Les techniques de fabrication utilisées doivent être simples, peu consommatrices d'énergie et non polluantes. L'idée d'une réduction de la masse volumique, entraînant une augmentation des performances thermiques de ces matériaux peut donc se révéler intéressante. Ces impératifs ont orientés l'équipe de développement des matériaux de construction du laboratoire de Génie Civil de l'Université de Laghouat vers la conception de béton calcaires légers BCL.

La masse volumique du béton peut être diminuée en remplaçant une certaine partie des matériaux solides du béton par vides remplis d'air. Ces vides peuvent être localisés soit au sien des granulats pour le cas des béton de granulats léger soit dans la matrice cimentaire pour le cas des bétons cellulaires. La voie envisagée dans ce travail est la substitution d'une partie de la matrice calcaires-ciment par des granulats légers. L'idée d'incorporer des déchets industriels tels que les déchets de fabrication des bouchons et panneaux de liège naturel et après d'expansion, s'avère très intéressante non seulement pour l'allègement du béton calcaire, mais également pour la protection de l'environnement.

Aujourd'hui, avec la crise financière que travers le monde, il est devenu impératif de construire au moindre coût en valorisant les matériaux locaux.

Le travail envisage n'a pas pour but de donner des repenses définitives à la multitude des problèmes qui peuvent être rencontrés dans la formulation des bétons de liège en général, mais de cerner les principaux problèmes; peuvent surgir lors de l'utilisation des granulats de liège et essayer de proposer des solutions à ces problèmes au cas où ils se présentent.

La validité et le domaine d'application des bétons obtenus seront ainsi déduits en comparant les performances de ces béton entre eux (à différent type et dosage en granulats).

## Introduction générale

---

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

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

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

- Le premier est consacré à une revue sur la documentation accentuée sur les bétons légers en général et notamment sur les bétons de liège. Et il comporte trois chapitres basés sur une recherche bibliographique :
  - Le premier chapitre est consacré à généralité sur le béton ordinaire.
  - Le deuxième chapitre fait l'objet à l'état de connaissances sur les bétons légers.
  - Le troisième chapitre dans cette partie est consacré à l'état de connaissance du liège, nous montrons les caractéristiques, l'origine et les utilisations des différents types du liège, la production du liège à travers le monde, et ensuite le béton de liège (propriétés, utilisation, mise en œuvre ...ect)
- La deuxième partie sera réservée à l'étude expérimentale des bétons de granulats de liège dans l'état expansé, elle comportera trois chapitres :
  - Le premier chapitre consiste à présenter les méthodes expérimentales.
  - Le deuxième chapitre comporte deux parties :
    - La première partie est donnée les résultats des essais de caractérisation physique, mécanique et chimique des différents constituants du béton.
    - La deuxième partie sera réservée à l'étude expérimentale des bétons à granulats de liège dans l'état expansé pour le différent dosage des granulats ; formulation, caractérisation physico-mécanique...ets.
  - Pour le troisième chapitre fait l'objet à l'état de comparaison entre deux états des granulats de liège (naturel et expansé).
  - Enfin, sur la base des résultats obtenus, on termine notre mémoire par une conclusion générale et perspective.

En variant les principaux paramètres suivants :

- La nature du liège : naturel et expansé.
- Le dosage du granulats de liège : 20% jusqu'à 60%.de volume totale de la matrice calcaire.

## Introduction générale

---

- Mode de conservation des éprouvettes de béton a l'air.
- Age du béton : 3, 7, 14, 21 et 28 Jours

Les différents bétons de liège ont été teste à l'état frais et a l'état durci.

Nous avons axé notre recherche aux études suivantes :

- ✓ La masse volumique.
- ✓ Résistance à la compression.
- ✓ Résistance à la traction.
- ✓ Retrait.
- ✓ Capacité d'absorption.
- ✓ Porosité.

# Chapitre I

## Etude bibliographique

## I.1 Introduction

La limitation de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment est basée en premier lieu sur le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe. Parmi les matériaux de construction les plus utilisés le béton. Il est facile à fabriquer et présente des propriétés structurelles intéressantes et une bonne durabilité. Cependant, il a une masse volumique élevée d'où la mise en place de fondations importantes pour supporter le poids de construction. Globalement, ce matériau est performant du point de vue mécanique, mais il est moins intéressant de point de vue thermique.

De nouveaux matériaux sont alors apparus, connus sous l'appellation de bétons légers. Ils ont une masse volumique plus faible que celle des bétons ordinaires et visent principalement une meilleure isolation thermique (Yasar, E et Erdogan, Y.E, 2008). Ces matériaux peuvent être obtenus grâce à la substitution des granulats traditionnels par des granulats plus légers (Shink. M ,2003), souvent artificiels tels que l'argile expansée, le schiste, la perlite, la vermiculite, le laitier expansé, etc. Ces bétons, qui sont aujourd'hui bien maîtrisés au niveau de leur formulation et de leur mise en oeuvre (Arnould . M et Virlogeux. M ,1986), présentent des densités se situant en général dans la fourchette (Arnould . M et Virlogeux. M ,1986; Ramachandran et la, 1998).

Cependant, on peut atteindre des densités plus faibles encore, en utilisant des granulats extrêmement légers tels que des agglomérés de liège, et des billes de polystyrène expansé qui font l'objet de notre étude.

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

## I.2 les bétons de sables calcaires

Dans ce paragraphe on présente quelques travaux de recherches concernant l'effet des fines calcaires issues du sable de concassage sur les propriétés du béton et du mortier à l'état frais et durci. Avant de mettre en exergue cet effet, on propose une définition des fillers calcaires, leur provenance, les exigences auxquelles ils doivent répondre et leurs rôles.

Par définition les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage et/ou sélection, provenant des gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. Les fillers se différencient les uns des autres par:

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui' ils contiennent.

- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface, leur dureté et leur porosité.

Le calcaire doit respecter les exigences de la norme **NFP15-3011994** qui sont les suivantes :

- La teneur en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) doit être supérieure ou égale à 75% en masse.
- La teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène ne doit pas être supérieure à 1,20g/100g.
- La teneur totale en carbone organique doit être inférieure à 0,50 % en masse.

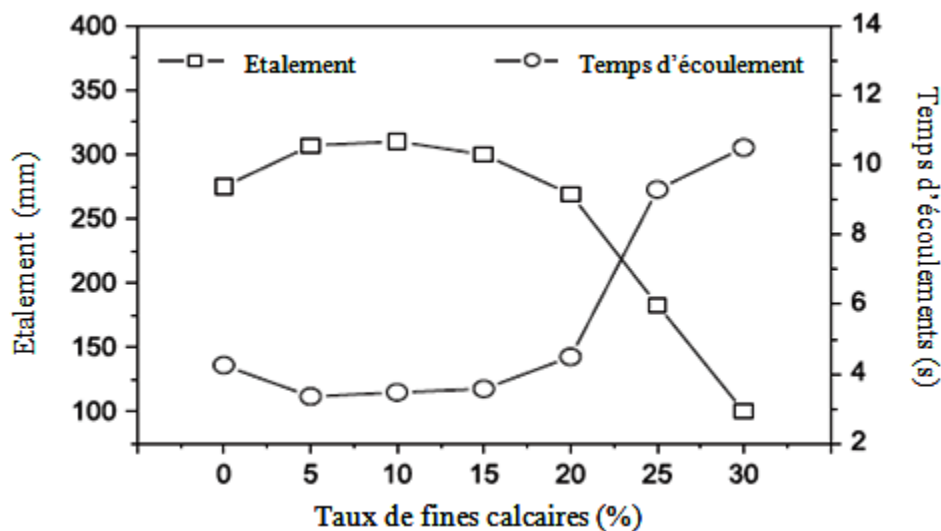
Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un ciment CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle. Le ciment au calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments pouzzolaniques (**Chloup-Bondant M,1996 ; Zhu W et Gibbs JC, 2005**).
- Un rôle chimique, en conduisant à l'accélération de l'hydratation du ciment Portland de la phase aluminatée du ciment C3A, surtout celle de C3S au jeune âge et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates (**Estellé P et al,2008 ; Bonavetti VL et al,2001**).
- Un rôle physique, en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

#### ✓ *Ouvrabilité*

L'augmentation de la demande en eau des mélanges des bétons et des mortiers à base de sable de concassage est l'un des problèmes qui se posent pour l'obtention d'une ouvrabilité adéquate. Cet effet nocif est dû principalement à la présence d'un pourcentage élevé de fines, à la forme et à la texture du sable de concassage. Cette augmentation de la demande en eau peut être réduite par l'utilisation des superplastifiants (**Chi. C et al, 2004 ; Kenai S et al,1999**). (**Bonavetti VL et Irassar EF, 1994**) ont étudié l'influence du pourcentage de fines calcaires, dans le sable, sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers. Trois types de fines ont été utilisés lors de cette étude de nature quartz, granite et calcaire. Ils ont trouvé que la demande en eau augmente avec l'augmentation du taux de fines dans les mortiers notamment les fines de calcaires et de granites. Cette augmentation est beaucoup plus remarquable lorsque le pourcentage de fines dépasse 10%. Cet effet semble dû à la grande surface spécifique des fines.

(Benabed B et al, 2012) ont trouvé que l'incorporation de 10% à 15% de fines calcaires, au mélange du mortier, améliore l'aptitude d'ouvrabilité. Cependant, quand le taux dépasse 15% une diminution considérable de la valeur d'étalement du mortier et une augmentation de temps d'écoulement ont été enregistrées comme c'est montré sur la **figure I.1**. Ils ont attribué cet effet à la finesse et à la surface spécifique de particules fines qui nécessite plus d'eau pour se mouiller. Cependant, de nombreux auteurs (Kenai S et al, 1999; Persoz B ,1960 ; Ramirez JL et al,1990 ; Donza H et al,1999) ont montré que l'incorporation de 5% à 10% de fines calcaires améliore l'ouvrabilité.



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

D'après une étude de l'effet de fines calcaires dans le sable concassé réalisée par (Kenai S et al, 1999), l'augmentation du pourcentage de fines calcaires augmente la demande en eau de gâchage. Le rapport E/C augmente d'environ de 0.61, 0.62, 0.64 et 0.66 respectivement pour des taux de fines de 0%,10%,15%et20% (**figure I.2**). Ils ont attribué cet effet à la grande surface spécifique, à la forme et à la texture des fines calcaires. De plus, différents auteurs ont établi que les fines calcaires augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP frais ( Esping O, 2008; Ye G, Liu X et al,2007; Nanthagopalan P et Santhanam M,2009).

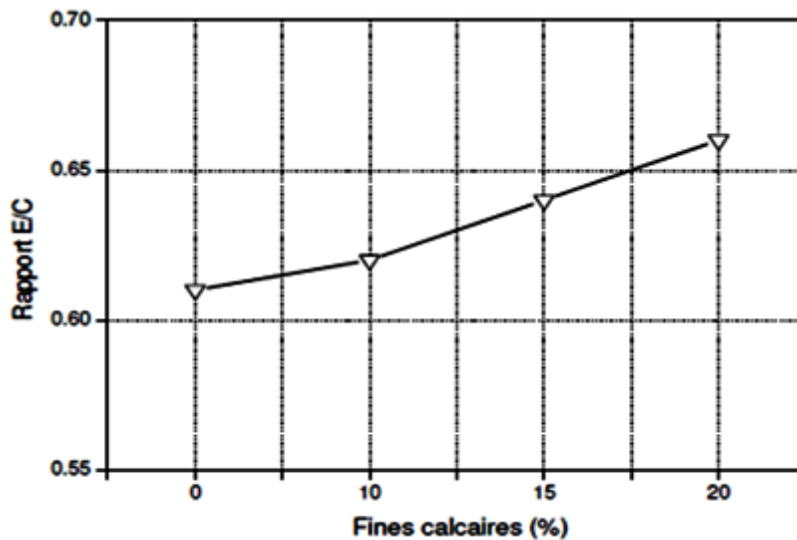


Figure I.2: Variation du rapport E/C avec le pourcentage de fines calcaires (Kenai S et al,1999)

### I.3 Généralités sur les bétons légers

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux développés par des ingénieurs. Ses caractéristiques spécifiques, suggèrent de nouvelles applications architecturales. Ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m<sup>3</sup>, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 kg/m<sup>3</sup>. La technologie de ces nouveaux bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement. Son faible poids, sa résistance et ses autres propriétés le rendent pertinent à utiliser dans des conditions de mise en chantier plus spécifiques. De plus, l'utilisation d'un béton de masse volumique faible peut permettre de construire sur un sol de faible capacité portante. Les bétons légers ont des utilisations très importants dans le domaine de construction, en raison

#### I.3.1. Définition du béton léger

Faible masse volumique et ces caractéristiques d'isolation thermiques et phoniques. Et cela nous permet d'économiser la consommation d'énergie.

Béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est supérieure ou égale à 800 kg/m<sup>3</sup> mais inférieure ou égale à 2 000 kg/m<sup>3</sup>. Il est produit entièrement ou partiellement à partir de granulats légers. (1 NF EN 206-1)

Ils peuvent être constitués de granulats légers ou lourds et de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousse polyuréthane, etc.). Certains d'entre eux, pour obtenir leurs caractéristiques définitives, subissent des traitements à hautes températures et hautes pressions. L'utilisation des bétons légers en construction signifie par delà une amélioration des

performances thermiques, une manutention plus aisée, un gain de temps et de matériel et donc un positionnement plus intéressant par rapport à la compétitivité économique. ( Ziregue A,2005)

### **I.3.2 Classification des bétons légers**

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

#### **\*. Méthode s'appuyant sur la technique employée pour obtenir des vides dans le béton**

Selon cette méthode, nous distinguons trois grandes familles de bétons légers (D.C. TEYCHENNE, 1968)

##### **a) Les bétons caverneux**

Les bétons caverneux sont des bétons constitués d'un squelette de granulats légers ou non, ayant sensiblement la même grosseur, et d'une pâte de liant assurant l'enrobage et le collage de ces éléments entre eux. En fait, il s'agit de bétons dont on a supprimé tout ou partie de l'élément et du liant servant à son enrobage.

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

Avec les granulats courants la densité peut être de l'ordre de 1.6 à 1.8 t/m<sup>3</sup>. On peut descendre au-dessous avec les granulats légers (0.7 à 1 avec de l'argile expansé). Les résistances mécaniques sont très faibles. En compression, on a en général  $3 < f_{c28} < 7$  MPa.( Dreux G et Festa.J, 1998)

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

##### **b) Les bétons cellulaires**

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

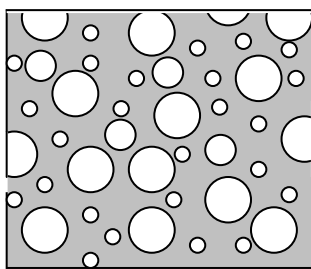
La densité des bétons cellulaires varie, suivant les compositions, de 0.4 à 1.2 t/m<sup>3</sup> et leur conductivité thermique fonction de leur densité est comprise entre 0.16 w/m.°C pour des bétons

de masse volumique de  $400 \text{ kg/m}^3$  à  $0.4 \text{ w/m}^{\circ\text{C}}$  pour une masse volumique de  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Les résistances à la compression sont d'environ  $0.5$  à  $0.8 \text{ MPa}$  pour des masses volumiques de  $400 \text{ kg/m}^3$  et atteignent  $4$  à  $5 \text{ MPa}$  pour des masses volumiques de  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Les résistances en traction sont en général de l'ordre de  $30 \%$  de celles en compression. .( **Dreux G et Festa.J, 1998**)

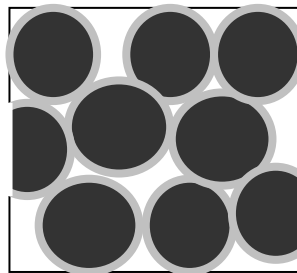
### c) Les bétons de granulats légers

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

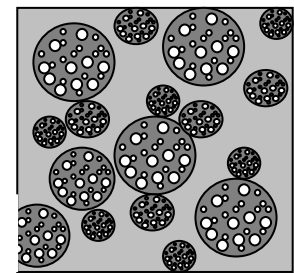
Ces bétons présentent en général des résistances d'autant plus faibles qu'ils sont plus légers, mais cette dernière qualité peut, dans certain cas, être particulièrement intéressante (préfabrication, isolation, gain de poids sur fondation difficiles ou onéreuses, etc.) .( **Dreux G et Festa.J, 1998**)



**Béton cellulaire**



**Béton caverneux**



**Béton de granulats léger**

**Figure I-3:** Représentation schématique des différents types de béton légers.

### \*. Méthode s'appuyant sur les masses volumiques apparentes et sur les utilisations s'y rapportant

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

#### a) Les bétons de remplissage

Ces bétons sont de masse volumique apparente faible et comprises entre  $300$  et  $1000 \text{ Kg/m}^3$ . Et ne sont pas porteurs (**Document technique réglementaire , 1997**) Ils sont en général de bons isolants thermiques. Leur constitution est d'ailleurs souvent caverneuse ou cellulaire. Leurs contraintes admissibles en compression sont faibles. On les utilise donc principalement pour le

remplissage de murs non ou peu porteurs, pour la fabrication de formes de pente de toitures-terrasses et d'éléments manufacturés.

### b) Les bétons porteurs et isolants

Les qualités isolantes de ces bétons sont naturellement inférieures à celles des bétons précédents, mais suffisantes pour assurer le confort thermique sous certaines épaisseurs ; par contre ils présentent des caractéristiques mécaniques nettement supérieures. Leurs masses volumiques apparentes sont comprises entre 1000 et 1400 Kg/ m<sup>3</sup> (**Document technique réglementaire , 1997**). Les bétons classés dans cette catégorie sont généralement des bétons de granulats légers. On les utilise principalement pour la fabrication de pièces préfabriquées (panneaux, allèges, etc.)

### c) Les bétons de structure

Les bétons destinés à être armés ou précontraints pour la constitution de structures. La masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 Kg/m<sup>3</sup>. (**Document technique réglementaire , 1997**) Leur isolation thermique est faible, mais leurs résistances mécaniques sont importantes et peuvent être du même ordre que celles des bétons pleins normaux.

Les bétons de structure à base de granulats légers sont définis comme des matériaux ayant, après séchage à l'air à 28 jours d'âge, une résistance à la qualité supérieure à 175 Kg/ cm<sup>2</sup> environ une densité apparente inférieure à 1850 Kg/m<sup>3</sup>. (**A.C.I. Comité, 1970**)

### I.3.3 Différences entre béton classique et béton léger

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

- Le poids propre des éléments de béton très élevés qui peuvent présenter un grand pourcentage de charge de structure.
- Exigence d'un sol de forte capacité de portance.
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage).
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres (**Kedjour N.E, 1993; Alrim K et al ,1991**).

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

- D'éléments porteurs de faible section
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Permet de construire sur des sols de faible capacité de portance.
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique (**Adam M. Neville, 2000**).

La faible masse volumique des bétons légers provient de leur porosité élevée. Cette porosité peut être localisée dans trois endroits :

- Au sein des granulats : c'est le cas **des bétons de granulats légers**.
- Dans la pâte du ciment : c'est le cas **des bétons cellulaires**.
- Entre les gros granulats par suppression des granulats fins : c'est le cas **des bétons caverneux**.

### **I.3.4 Domaine d'utilisation des bétons légers**

Les bétons légers sont utilisés dans les domaines suivants :

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

### **I.3.5 Les bétons de granulats légers**

Ce sont des bétons dans lesquels des granulas normaux ont été remplacés par des granulas légers, il peuvent être pleins ou caverneux, dans ce dernier cas, la granulométrie est fortement discontinue et les éléments fins sont partiellement ou totalement supprimés.

Les comportements physiques et mécaniques des bétons de granulas légers sont dictés par le type de granulats légers utilisés, et par leurs propriétés physiques et mécaniques d'une part, et d'autre part par la nature de la matrice utilisée. Selon les exigences demandées et selon le béton utilisé, le choix du type de granulats et de la nature de la matrice s'avère important.

#### **I.2.5.1 Les granulats légers**

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique.

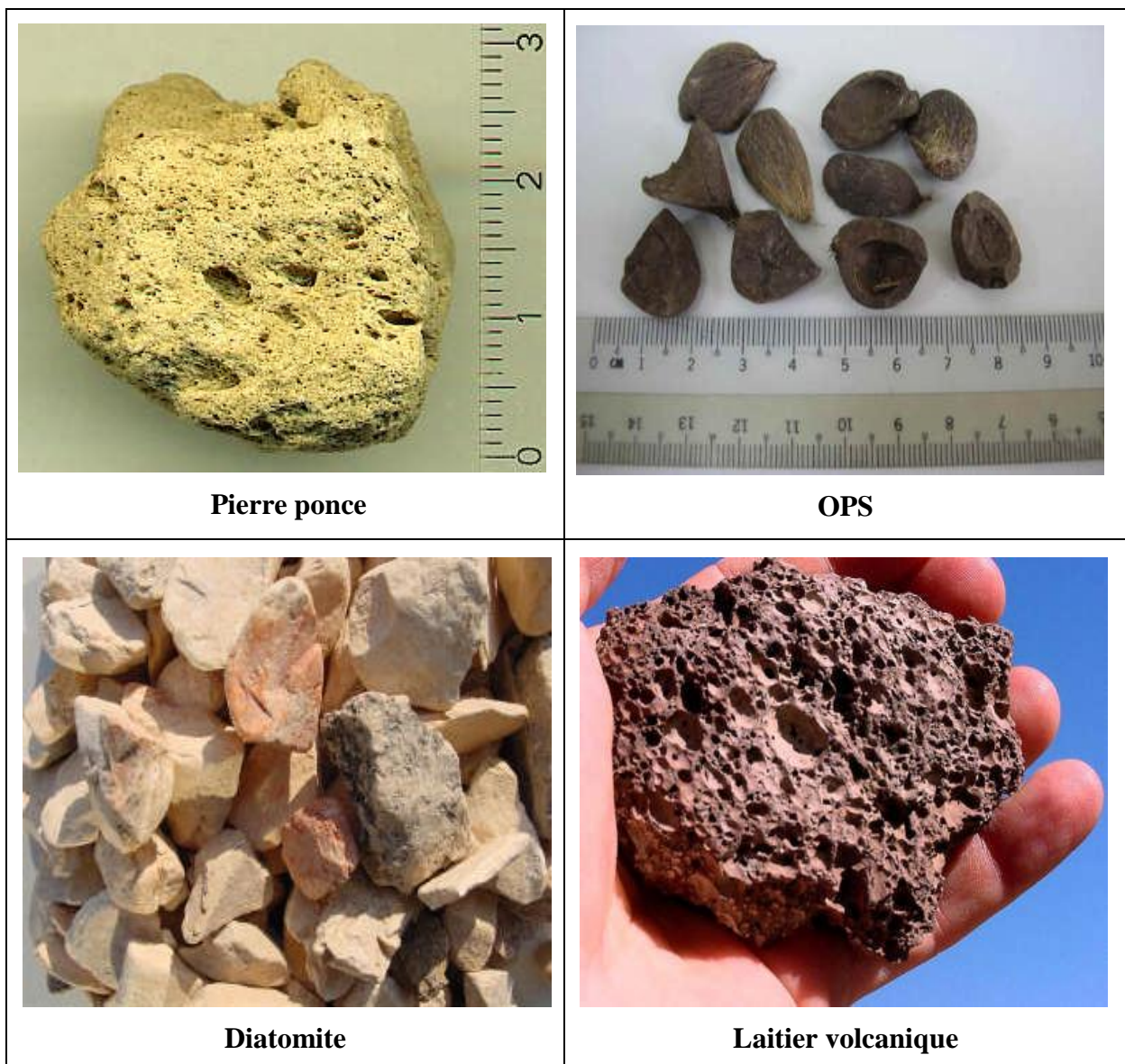
On retrouve ainsi , le verre expansé (**Tasserie, 1991**) le polystyrène (**Vénuat, 1983**) ou encore les granulats de bois (**Ouadi, 1991**)

**I.3.5.2 Types de granulats légers**

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

**.1 Granulats naturels**

Certaines roches, comme la pierre ponce, ont à l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassant, on obtient donc des granulats légers. Il existe également d'autres matériaux naturels dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats légers pour des utilisations locales. La **Figure I-4** présente quelques exemples de granulats naturels : OPS (Oil Palm Shell) (TEOD C L,2006), la diatomite (UNAL O,2007) et le laitier volcanique (DEMIRDAG S,2006)



**Figure I-4. Différents granulats légers naturels (TEOD.C.L,2006), (UNAL. O,2007), (DEMIRDAG S,2006)**

**.2 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 (WANG H Y,2006) et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie (DE GENNARO R ,2005) ; soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS(Polystyrène Expandé) (LAUKAITIS A,2005), (SARADHI BABU D,2005), (MILED K,2004), (Figure I-5).



**Argile expansée**



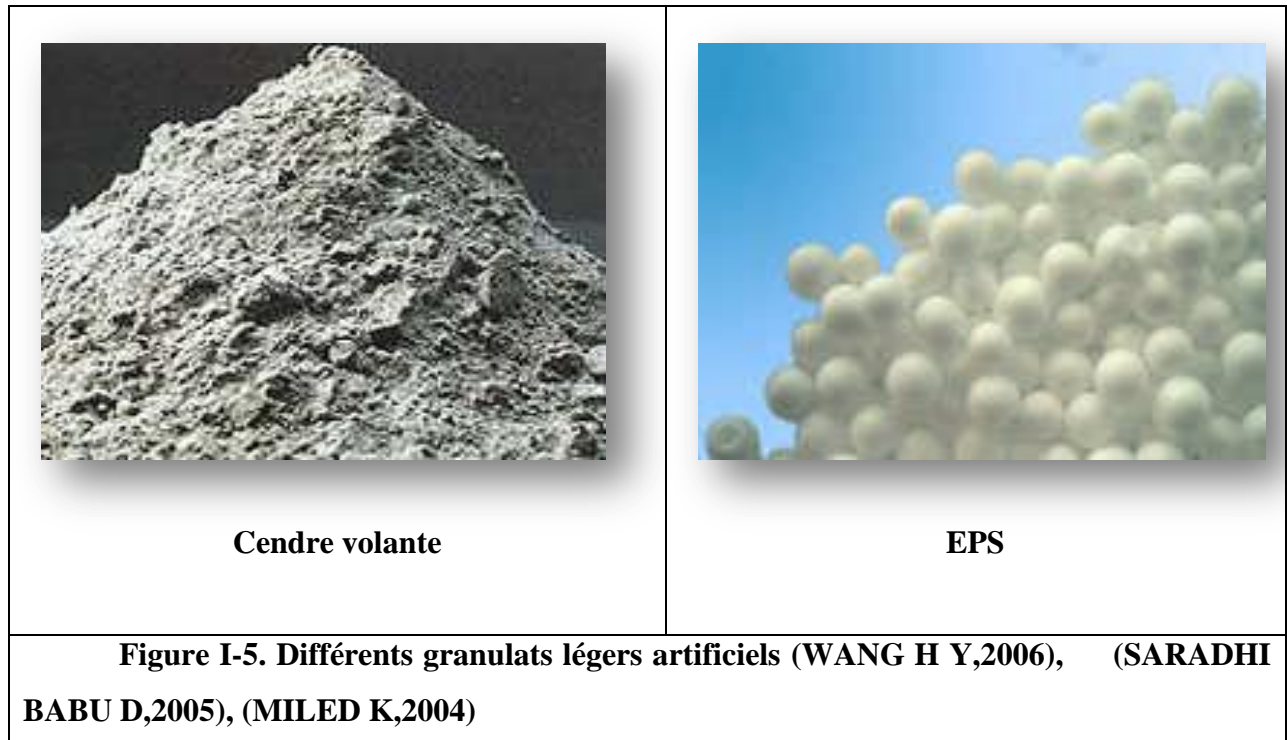
**Schiste expansé**



**Laitier refroidi à l'air**



**Laitier expansé**



Les granulats légers artificiels fabriqués à partir de matières premières naturelles sont produits en formant tout d'abord une pâte dense par mélange d'une poudre avec de l'eau.

Cette pâte est ensuite fractionnée en petits agrégats de quelques millimètres de taille, puis passée dans un four à haute température (1000°C à 1250°C environ), (**Figure I-6**).

L'expansion de l'eau et la vitrification du minéral aboutissent à la formation de granulats plus ou moins sphériques, constitués d'une coque renfermant des bulles gazeuses dispersées dans une matrice. En jouant sur la marche des fours, on favorise plus ou moins l'expansion. Il apparaît alors une corrélation entre la taille moyenne des grains et leur densité absolue, les plus gros étant les moins denses. Les granulats artificiels sont généralement assez ronds ; les argiles expansées sont lisses et les schistes sont parfois plus rugueux. Leur masse volumique en vrac varie entre 300 et 800 kg/m<sup>3</sup>.



**Figure I-6. Four à très haute température à 1250°C, GEM, France**

Les laitiers qui constituent la base d'une autre catégorie de granulats artificiels comprennent les laitiers de haut fourneau, les laitiers d'aciérie et autres laitiers métallurgiques.

Les laitiers métallurgiques sont uniquement utilisés comme matériau de remblai pour les routes et comme granulats pour le béton bitumineux. Seuls les laitiers de haut fourneau sont utilisés pour des bétons de structure. Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Il est refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact, connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air ». Il peut également être refroidi rapidement et traité au moyen de jet d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé». Le laitier expansé doit alors être concassé pour former des granulats. Un autre procédé permet de fabriquer du «laitier expansé bouleté». Le laitier fondu contenant des bulles de gaz est projeté à travers un jet d'eau pour former des boulettes. Celles-ci sont de forme arrondie et ont un revêtement lisse en surface. Leur masse volumique en vrac est de l'ordre de 850 kg/m<sup>3</sup>.

Les cendres volantes qui peuvent également être à la base de granulats légers sont mélangées avec de l'eau et transformées en boulette soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion (JO B W,2006), (GESOGLU M,2006-1), (GESOGLU M,2006-2). On a découvert que l'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs

thermiques et mécaniques. Par la suite, les boulettes sont frittées dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150°C à 1200°C et par conséquent, les petites particules de

cen­dres volan­tes fusion­nent et for­ment un aggloméré. Ces nodules frit­tés de forme arron­die, de bon­ne résis­tance et pos­sé­dant une absorp­tion d’eau modé­rée consti­tuent de bons granu­lats. Leur masse volu­mique en vrac est com­prise entre 1000 et 1200 kg/m<sup>3</sup>.

### I.2.5.3 Classification des granu­lats légers

Les granu­lats légers sont des granu­lats ayant une masse volu­mique réelle ne dépas­sant pas 2000 kg/m<sup>3</sup> (2,00 Mg/m<sup>3</sup>) ou une masse volu­mique en vrac ne dépas­sant pas 1200 kg/m<sup>3</sup>. (NF EN 13055-1,2002)

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

- **Matériaux minéraux naturels non préparés** : Par définition ce sont des matériaux qui n’ont subi que des traitements mécaniques tels que lavage, broyage, tamisage. Les granu­lats les plus connus dans cette catégorie sont : la ponce, les pouzzolanes, roches d’origine volcanique, les tufs calcaires ou volcaniques. (Arnoud M et Virlogeux, M,1986 ; Ledhem A,1997)
- **Matériaux minéraux naturels préparés** : Ce sont des matériaux spécialement traités en usine en vue de leur emplois dans le béton légers, cette catégorie de granu­lats est la plus importante et on y trouve en particulier : l’argile, le schiste et l’ardoise expansées ou frit­tés, la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.
- **Déchets industriels non préparés** : Ce sont des déchets de l’industrie qui ne subissent pas de traitement particulier à part, dans certains cas un traitement mécanique de tri. Le principal granu­lat dans ce type est le mâchefer, résidu de la combustion des charbons gras du coke ou des ordures ménagères. (Ledhem A,1997)
- **Déchets industriels préparés** : Ce sont en générale des sous produits de l’industrie qui doivent subir divers traitements en vue de leur transformation en granu­lats légers. Les granu­lats de ce type les plus répandus sont : le laitier expansé ou granulé, les cen­dres volantes frit­tés ou expansés et le verre expansé.
- **Matériaux organiques** : dans cette catégorie on classe des produits qui sont soit des polymères solides de synthèse, soit des matériaux d’origine végétale, on peut ranger dans cette catégorie les granu­lats de polystyrène expansé qui sont assez répandus les granu­lats de bois (copeaux ou sciure) et le liège expansé.

### I.2.5.4 Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers

- **Propriétés physico Masse volumique**

- Masse volumique

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

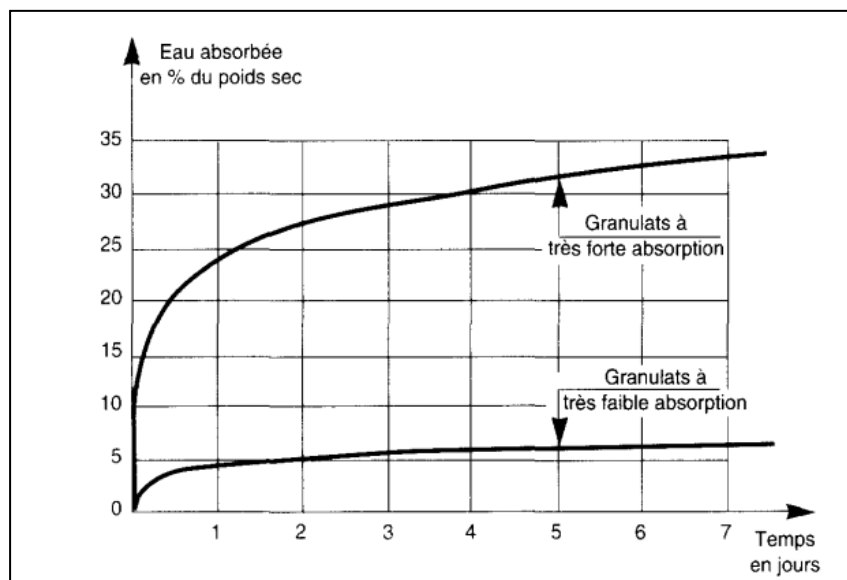
Elle dépend principalement du (**Corman P,1961**):

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

- **Porosité et absorption**

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% (**Arnoud M et Virlogeux, M,1986 ; Shink M, 2003 ; Corman P, 1961**). La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption.

L'absorption d'eau, importante et variable, des granulats légers a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons. (**Dreux G et Festa J, 1998**)



**Figure I-7:** Courbe d'absorption d'eau (**Dreux G et Festa J, 1998**)

On remarque essentiellement deux choses :

- Une forte proportion de l'absorption se situe dans les premières minutes, ce qui permet d'envisager de minimiser ce phénomène par un prémouillage des granulats.

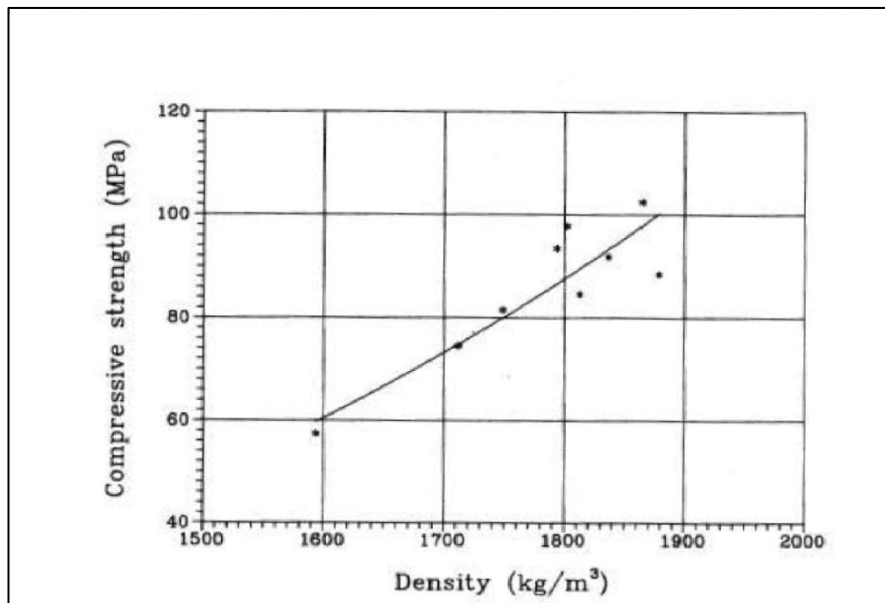
- L'absorption a tendance à être plus faible si les granulats sont plus denses, donc moins poreux, et s'ils présentent une surface plus lisse donc plus fermée à l'absorption.

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

- **Propriétés mécaniques des granulats légers**

- **résistance à la compression**

Avec des granulats légers et une formulation de béton appropriée, il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraîneurs d'air, AEA, superplastifiants, SP, agents réducteurs d'eau, WR et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. Des résistances en compression de 100 MPa ont même été obtenues et sont présentées (voir figure I-8).



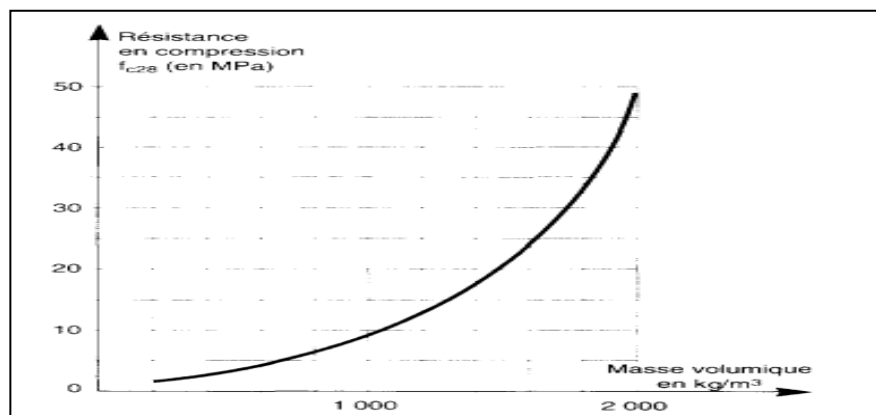
**Figure I -8:** Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers (ZHANG M H 2, 1991)

Dans le cas du béton léger, les granulats (légers) sont, contrairement au béton traditionnel, en général moins résistants que le mortier. Ils constituent le point faible du béton. Par contre, grâce à leur surface poreuse et aux liaisons qui en résultent, il y a une très bonne adhérence entre le mortier et les grains. La rupture se produit donc par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent un grand nombre de granulats. (ARNOULD M, 1986)

Cependant, il est judicieux de mentionner que des granulats légers ayant une même résistance à l'écrasement ne donnent pas nécessairement des bétons d'une même résistance à la compression, même si le rapport E/L est identique. En effet, d'autres paramètres doivent être pris en compte :

□ Les caractéristiques physiques et chimiques des granulats viennent modifier la zone d'interface entre la pâte et les gros granulats (ITZ en anglais, pour Interfacial Transition Zone). De plus, dans le cas des granulats légers, cette zone peut également s'étendre plus ou moins profondément dans les granulats légers eux-mêmes, selon la quantité de pâte absorbée dans les pores de surface. Une plus grande tendance à absorber entraîne la densification de l'ITZ au voisinage des granulats légers. Cette densification de l'ITZ engendre des bétons plus résistants. Par exemple, des granulats légers d'une capacité d'absorption 200 % plus grande (absorption au bout de 6 h d'immersion des granulats secs) donnent des résistances en compression jusqu'à 25 % plus élevées. (WASSERMAN R, 1996)

□ D'un point de vue chimique, deux phénomènes sont susceptibles d'être impliqués : d'une part, une réaction pouzzolanique entre le granulat (si le granulat a une réactivité pouzzolanique élevée) et la solution alcaline susceptible d'y pénétrer, et, d'autre part, un processus d'imprégnation au cours duquel des CH (Portlandite) se déposent dans le granulat. Ils pourraient semble-t-il conduire chacun à une augmentation de la résistance de l'ordre de 20 % entre 28 jours et 90 jours. (WASSERMAN R, 1996)



**Figure I-9:** Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique ( Dreux G et Festa J, 1998)

### Propriétés thermiques des granulats légers

#### ➤ Propriétés thermiques

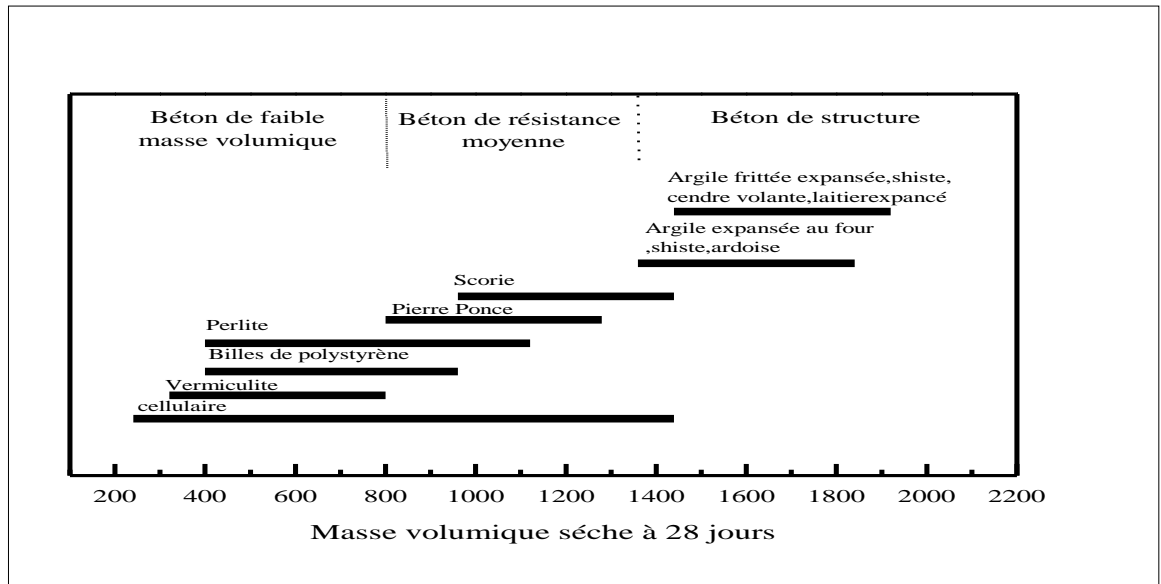
La nature des granulats et le taux d'humidité ont une grande influence sur les caractéristiques thermiques. Le tableau I-1 donne certaines caractéristiques de granulats légers.

Tableau I-1 : Caractéristiques des granulats légers

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

I.3.6 Les bétons de granulats légers

➤ Masse volumique

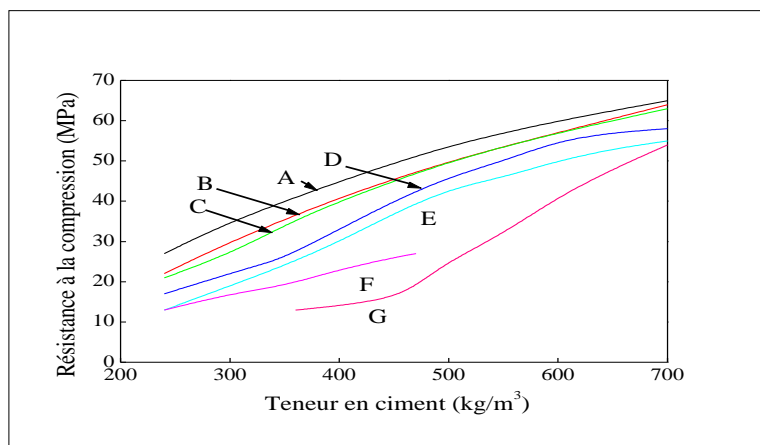


Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R-87

➤ La résistance à la compression

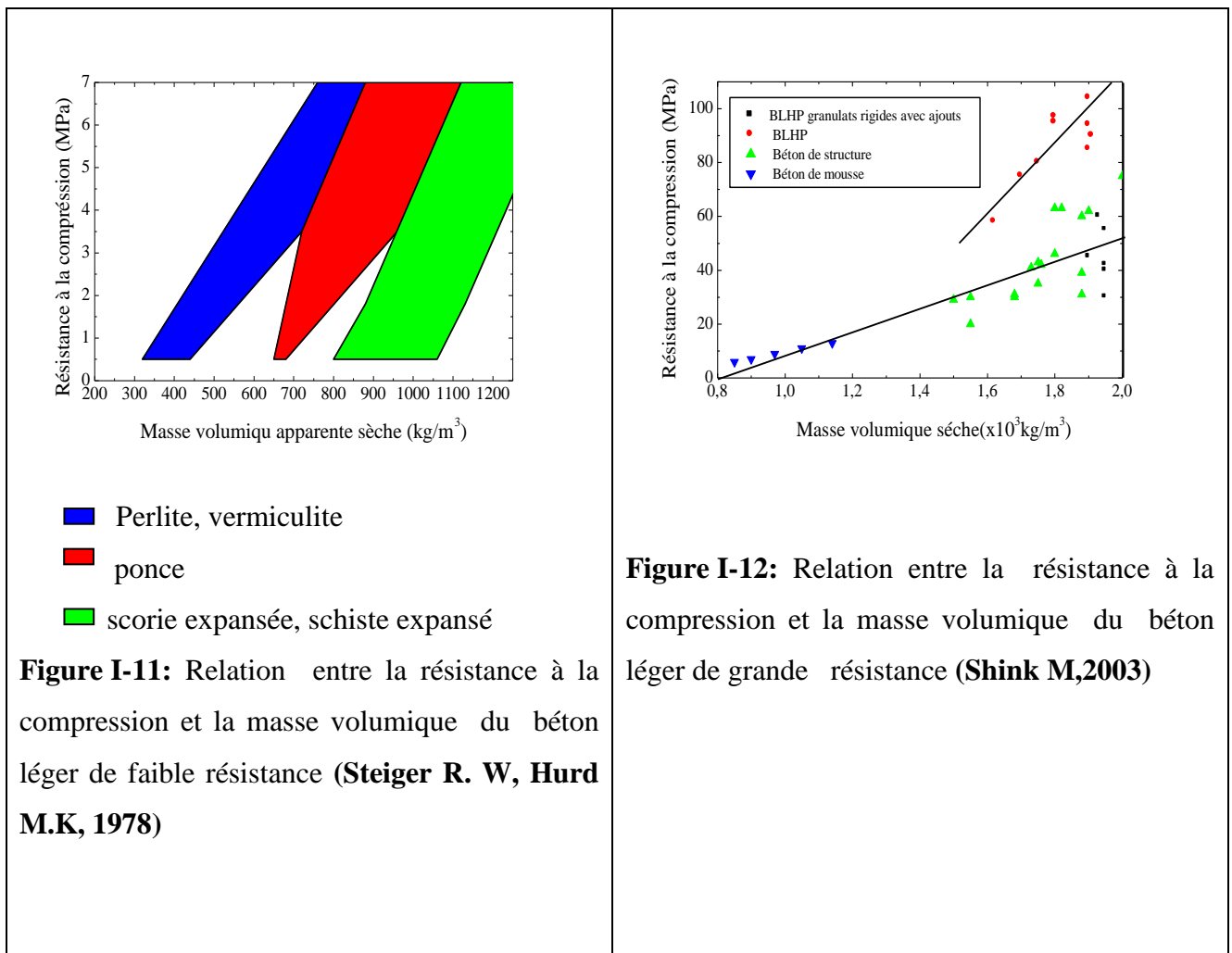
La résistance à la compression d'un béton léger est d'autant plus élevée que la résistance spécifique des granulats légers utilisés et leur masse volumique sont elles-mêmes plus grandes. (**Béton armé**)

La qualité des granulats est considérée comme le principal facteur limitant la résistance en compression des bétons de granulats légers, vient ensuite la qualité de la matrice utilisée et la masse volumique du béton durci. (**Shink M, 2003 ; Corman P 1961 ; Yamasaki J et al,**)

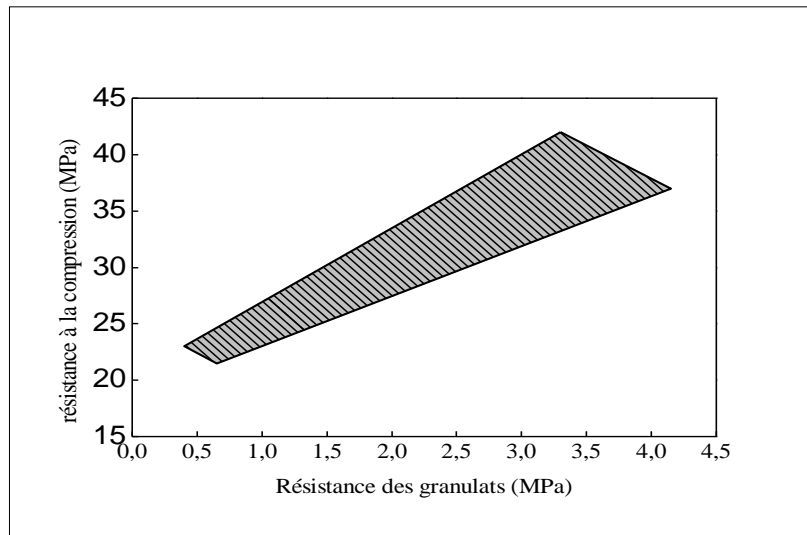


**Figure I-10 :** Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats ( Adam M. Neville, 2000)

Graphe	Désignation
A	cendres volantes frittées et granulats ordinaires
B	laitier de haut fourneau en boulettes et granulats fin ordinaire
C	cendres volantes frittées
D	schiste fritté
E	ardoise expansée
F	argile expansée et sable
G	laitier expansé



**Relation entre résistance à la compression du béton de granulats léger et résistance du granulats**



**Figure I-13:** Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains (Arnoud M et Virlogeux M, 1986).

➤ **Résistance à la traction**

La résistance à la traction des bétons légers est exprimée, selon BAEL, par la formule (Béton armé) :

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

M.BONZEL donne une autre formule de calcul de la résistance à la traction du béton léger en fonction de la compression. ( Adam M. Neville, 2000)

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

➤ **Module de d'élasticité**

Le module d'élasticité des bétons légers est fonction de leurs masses volumiques apparente et leur résistance à la compression. D'après (Rilem ,1970) :

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

Avec :  $\delta_b$  masse volumique apparente du béton en t/m<sup>3</sup>.

$\sigma_{jm}$  résistance à la compression du béton sur cubes en kg/cm<sup>2</sup> à (j) jours.

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

**Tableau I-2:** Module d'élasticité de quelques types de bétons légers (Rilem, 1970)

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

## I.4 Béton de granulats de liège

### I.4.1 Etat d'art sur le liège

#### I.4.1.1 Introduction

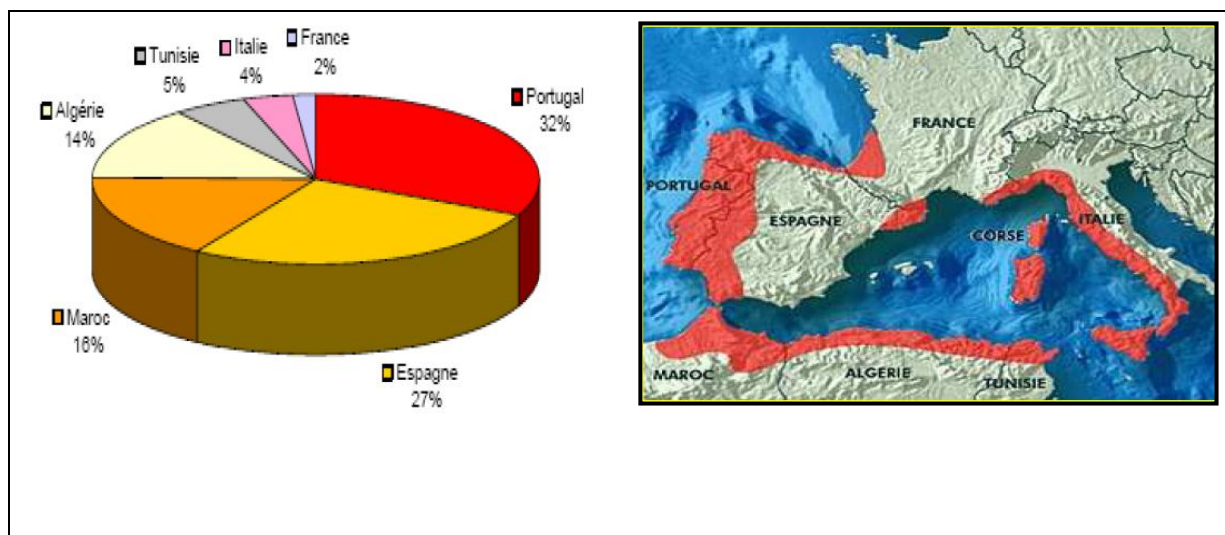
La croissance économique mondiale durable et l'amélioration de la vie des gens est grandement dépendent de l'utilisation de produits alternatifs dans l'architecture et de construction, tels que les déchets industriels classiquement appelé matériaux verts qui engendre le sous-produit de l'industrie du liège (Les granulés de liège). (Eires R et al,)

Compte tenu de ses diverses intéressantes caractéristiques mécaniques et physiques, le liège est un matériau polyvalent avec une grande multitude d'utilisations possibles. Dans les dernières décennies, le liège a été beaucoup plus largement utilisé comme matériau dans l'industrie du bâtiment. Il a contribué à améliorer la qualité et la performance des produits existants et nouveaux, principalement pour l'isolation thermique et acoustique, mais aussi comme un absorbeur de vibrations. (Fernando G et al,2007)

#### I.4.1.2 Historique

Le liège est un matériau vivant et naturel, provenant d'une variété de chêne-liège qui reconstitue son écorce dès quelle est prélevée chaque année. L'arbre produit une épaisseur de liège variant de 1 à 10 mm selon l'âge déjà acquis par l'écorce elle-même. Chaque accroissement annuel est séparé du précédent par une ligne brune bien déterminée. Du point de vue thermique et acoustique le liège est un très mauvais conducteur. Sa première utilisation en tant qu'isotherme remonte très tôt dans l'Antiquité dans la fabrication de ruchers. En ce qui concerne sa place dans la construction, on retrouve quelques traces des premiers emplois comme isolant thermique, parmi les populations primitives d'Afrique du Nord qui l'utilisaient en plaque et mélangé avec de

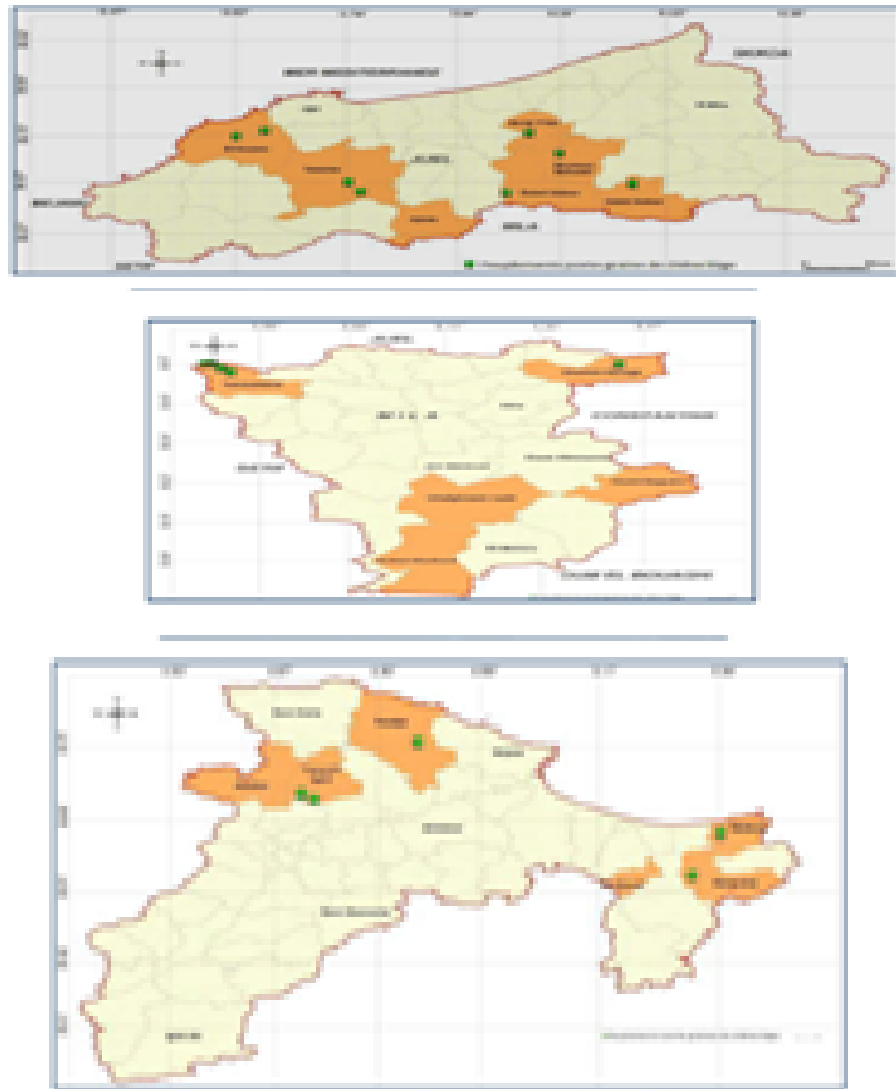
l'argile pour la construction des murs de leurs habitations. L'habitat naturel du chêne-liège est le pourtour du bassin méditerranéen occidental (présent depuis plus de 60 millions d'années). L'aire naturelle de la subéraie mondiale est d'environ 2687000 hectares repartis principalement sur sept pays (**figure I -14**). Les principales subéraies algériennes sont situées essentiellement en zone sub-humide au nord, et entre l'Algérois et la frontière Tunisienne, ou elles s'étendent de la mer jusqu'à 1200 m d'altitude.



**Figure I -14** : Répartition mondiale des subéraies

#### I.4.1.3 Chêne liège (*Quercus suber* L) en Algérie

(Benamirouche S et Chouial M) ont caractérisé géographiquement et donné quelques descriptions des peuplements porte-graines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien). Ils ont constaté que 22 peuplements occupant une superficie totale de 1025 hectares ont été retenus. Au centre de chaque peuplement un point GPS, a été pris, puis utilisé pour établir les cartes de localisation par wilaya. Dans un deuxième temps, les peuplements en question sont en cours pour description détaillée permettant leur délimitation plus précise possible, leur caractérisation éco-dendrométrique et le renseignement de fiche signalétique pour chaque peuplement. En parallèle, les données recueillies sont transcrites au fur et à mesure dans la base de données géographique préalablement élaborée.



**Figure I.15.** Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège  
(Benamirouche S et Chouial M)

#### I.4.1.4 Anatomie et Constitution du liège

Les cellules du liège ont été étudiées au microscope optique, la première fois par Hooke en 1664, puis par microscopie électronique à balayage par (Gibson L.J et al, 1981). Ces auteurs ont très bien décrit la forme et l'arrangement des cellules du liège selon les trois sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle (Figure I.16). Dans la section radiale, les cellules sont disposées en «nid d'abeilles» et ont une forme principalement hexagonale. Certaines peuvent avoir cinq, sept ou huit côtés. Cette disposition des cellules permet de considérer que le liège est un matériau isotrope dans le sens radial, impliquant que les directions axiale et tangentielle sont presque équivalentes.

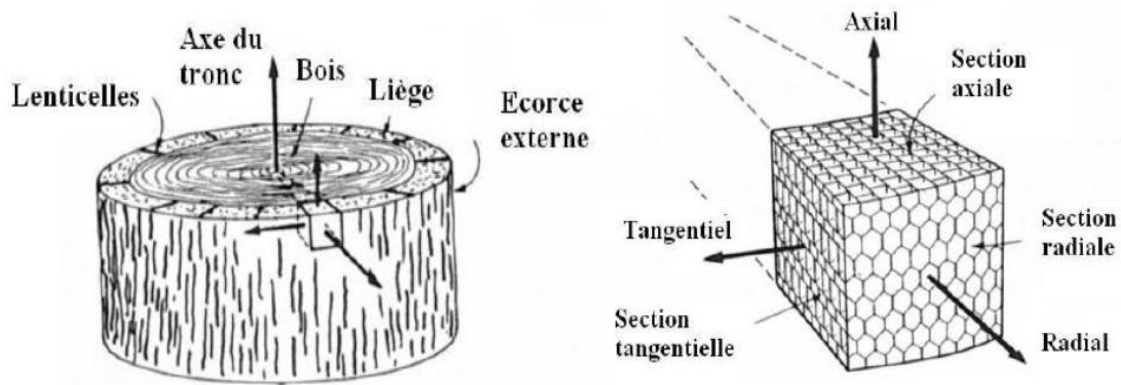


Figure I.16. Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle (Gibson L.J et al, 1981).

#### I.4.1.5 Qualités du liège

La composition chimique, avec sa structure cellulaire particulière, fournit en liège avec d'excellentes propriétés :

- **Elasticité - Compressibilité – Souplesse** : Comprimé rapidement dans sa limite élastique, il reprend presque instantanément 85% de son volume initial. Il amortit les vibrations par sa structure cellulaire et son élasticité.
- **Légèreté** : Sa faible densité est variable avec la qualité du liège. elle est due à l'air contenu dans ses cellules. Sa masse volumique est comprise entre 100 et 130 kg/m<sup>3</sup>.
- **Imperméabilité - Etanchéité**: Il absorbe moins de 18 à 20% d'eau. Il résiste à l'action des hydrocarbures. Il ne conduit pas d'électricité.
- **Imputrescibilité – Durabilité** : Du fait de sa faible perméabilité, il résiste aux agents extérieurs. Il résiste aux parasites, termites et rongeurs. De plus il ne moisit pas.

**Faible conductivité phonique et thermique** : Du au fait que l'air reste enfermé dans ses cellules (minuscules compartiments étanches) et isolé par une matière non hygroscopique (substance qui a tendance à absorber l'humidité de l'air) et de faible poids spécifique. Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,035 et 0,045 W/m.K (à titre de comparaison, celui des différentes laines de verre est compris entre 0,035 et 0,060 W/m.K); c'est la raison pour laquelle le tissu subéreux du chêne liège figure parmi les substances douées de la plus haute capacité isolante. Il absorbe un maximum des ondes sonores grâce à sa structure cellulaire unique.

#### I.4.2. Comparaison entre le liège et le bois

Le granulé de liège peut être considéré comme un agrégat léger plutôt que des fibres de renfort. La différence la plus caractéristique de la composition chimique entre le liège et le bois est la présence de subérine dans le liège, la subérine est un polymère composé d'alcools aliphatiques à

longue chaîne et de monomères d'acide. Il est hydrophobe et lorsqu'ils sont combinés avec des cires, il contribue de manière significative à l'imperméabilité du liège (**Karade S R, 2002**).

**Tableau I-3:** Comparaison de la composition chimique du liège et de fibres de bois conventionnelles (**Karade S R, 2002**).

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

Il peut être vu que les bois sont plus forts que le liège. Cela peut être dû au fait que le bois est un matériau cellulosique contenant de la fibre, alors que le liège est un matériau granulaire et ne contient que 9% de cellulose par rapport au bois, qui contient de 40 - 50% de la cellulose. (**Karade, 2002**)

#### I.4.3. Propriétés physique du liège

- **Densité**

(**Gil, 1997; Silva S.P et al, 2005; Pereira H, 2007** ) ont trouvé que la densité du liège peut varier entre 110 et 300 Kg.m<sup>-3</sup> 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 L.J et al, 1981** ) et à des cellules de petite hauteur (15 µm). D'après (**Pereira H, 2007**) cette densité peut atteindre 1250 Kg.m<sup>-3</sup> sous l'effet d'une forte compression (55 Mpa). Cette faible densité fait du liège un bon isolant thermique et acoustique. Cela permet également au liège de pouvoir être utilisé pour amortir les vibrations (chocs).

#### I.4.4 Composition chimique

Le liège du chêne *Quercus suber* est une substance très complexe. L'étude de sa composition chimique a été menée au cours de nombreux travaux qui ont conduit à des résultats parfois contradictoires. La plupart des constituants du liège ne sont accessibles qu'après dépolymérisation et les résultats sont fortement liés aux procédés utilisés. Les constituants du liège sont présents à des proportions qui varient selon l'âge et l'habitat du chêne liège. Il est

cependant admis que le liège est généralement constitué d'environ 40 % de subérine, 22 % de lignine, 20 % de polysaccharides et de 18 % de composés divers parmi lesquels les cires, la matière minérale et l'eau (**Lopes M.H et al 2001 ; Boudaoud N, 2006**).

#### *La subérine*

La subérine est le constituant principal des parois des cellules du liège, elle lui permet son élasticité. C'est une substance originale très complexe, sorte de polymère lipidique. La structure macromoléculaire de la subérine n'est pas encore établie de façon définitive puisque son extraction ne peut se faire qu'après dépolymérisation, par des méthodes d'hydrolyses alcalines (**Cordeiro N et al,1998 ; Rocha S et al, 2001**).

#### *La lignine*

La lignine est un produit de masse moléculaire élevée, résultat du couplage de polymères polyphénoliques distribués de façon aléatoire. Les trois unités monomères de la lignine sont l'alcool coniférylique, l'alcool para-hydroxycinnamique et l'alcool sinapylique (**Riboulet J.M, 1986**) C'est elle qui permet la liaison entre les divers composants.

#### *La cellulose et les polysaccharides*

La cellulose résulte de la condensation exclusivement linéaire d'unités glucose unies entre elles (**Riboulet J.M, 1986**) et les polysaccharides composent les parois des cellules, et contribuent à la définition de sa texture.

#### *Les tannins*

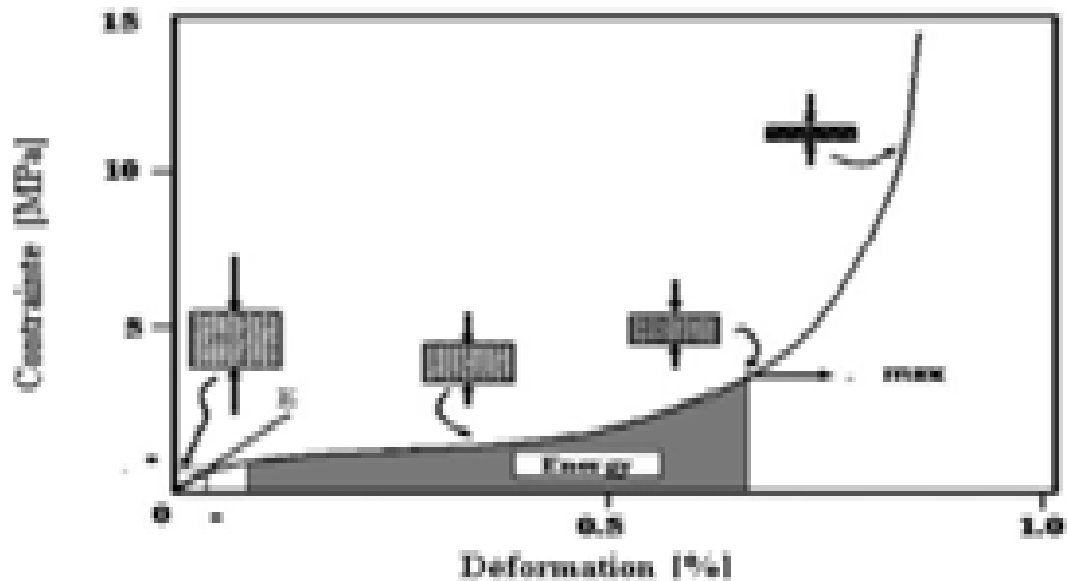
Ils déterminent la couleur.

#### *Les céroïdes*

Ce sont des Composés hydrophobes assurant l'imperméabilité.

### **I.4.5. Propriétés mécaniques du liège**

Le liège présente plutôt des propriétés mécaniques particulières. La courbe de compression (contrainte-déformation) présente trois régions liées aux trois mécanismes responsables pour les propriétés des matériaux alvéolaires flexibles (**Rosa ME et al,1991 ; Gibson L.J et al, 1981 ; Gil L, 1998**).



**Figure I.17.** courbe Typique contrainte-déformation de compression pour le liège,  
( Gibson L.J et al 1981 ; Gibson L. J et Ashby M. F,1997)

D'après la **figure I.17**, la première région, jusqu'à une déformation d'environ 7%, correspond à une flexion élastique des parois des cellules ; le second plateau est presque horizontal, qui s'étend à une déformation d'environ 70%, provoquée par le flambage progressif des parois cellulaires ; Enfin, l'écrasement des parois cellulaires et l'effondrement complet des cellules provoque la courbe à la hausse raide (Gibson L. J et Ashby M. F, 1997 ; Rosa M.E et Fortes M.A 1988, Romano A et Martins-Loução M.A, 1999). La contrainte de l'effondrement et de la déformation de liège correspondant à l'extrémité de la région du plateau, sont résumées dans le **tableau I.4**.

Lorsque la compression est dans la direction NR, la paroi cellulaire de courbure latérale, à redresser et à des contraintes élevées, inverser la tendance d'ondulation, ce qui conduit au rétrécissement dans la direction R et, par conséquent, à un rapport de Poisson négatif à des contraintes élevées (Fortes M.A et Nogueira M.T, 1989)

L'épaisseur des planches de liège, à un effet important sur les propriétés mécaniques (Pereira H et al, 1992 ; Pereira H , 1998).

La plus faible résistance à la compression dans les trois directions principales et le module d'Young inférieure de liège avec le calibre supérieur peuvent largement s'expliquer par les différences dans les dimensions de la cellule et à l'ondulation motif ; dans les directions tangentielle et axiales, l'effet des pores devrait également être inclus dans les modèles de compression (Pereira H, 1992)

Tableau I.4. Propriétés mécaniques générales de liège.

propriétés	valeur	Références
Module de compression, liège naturel, non bouilli [MPa]	8-20 (R)	[65, 66, 67]
	13-15 (NR)	[66]
Module de compression, bouilli [MPa]	6 (R)	[66]
	8-9 (NR)	[66]
Module de la compression à 100°C, 28 jours [MPa]	11(R)	[65]
	11 (NR)	[65]
	15 (R)	
Module de la compression, à 150°C, 28 jours [MPa]	14 (NR)	[65]
	38 (R)	[65]
Module de traction, bouilli [Mpa]	24-26 (NR)	[57]
Réduire (flambage) déformation [%]	4 (R)	[57]
	6 (NR)	[44]
Contrainte de rupture en traction [MPa]	1.0 (R)	[44]
	1.1 (NR)	[44]
Ténacité à la rupture, bouillie [MPa m <sup>1/2</sup> ]	9 (NR)	[44]
	60-130	[57,44]
	0-	
Le coefficient de Poisson, bouillis	0.097(NR,NR)	[44, 61]
Coefficient de perte à 0,01 Hz	0-0.064(NR,R)	[44, 61]
	0.26-	[44, 61]
	0.5(NR,NR)	[44, 62]
	0.1-0.3	

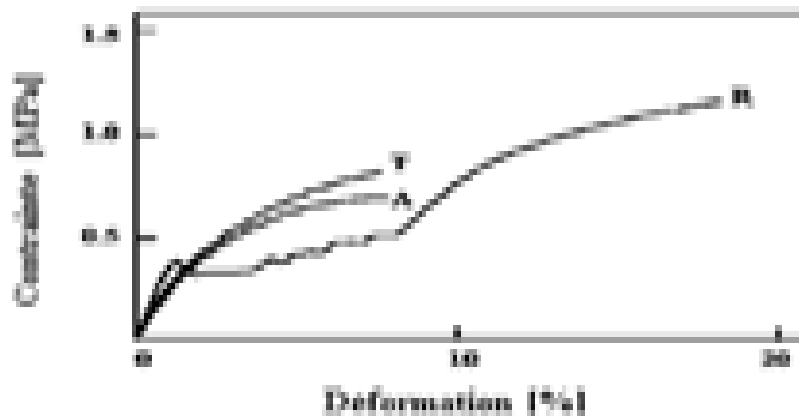
R, mesurée dans la direction radiale ; NR, mesurée dans des directions non radiales

Le traitement thermique dans l'air affecte les propriétés de compression de liège de reproduction. Rosa et Fortes (**Rosa M.E et Fortes M.A, 1988**) ont rapporté que le traitement à 100-300°C réduit considérablement la force de liège.

Le traitement thermique avec de l'eau (le processus industriel d'ébullition( **Relvas , 2002**) affecte également les propriétés mécaniques du liège. L'absorption d'eau pendant la cuisson ramollit les parois des cellules, tandis que les différences de pression entre les cellules adjacentes induisent des contraintes de traction suffisante pour redresser les murs (**Rosa M. E et al, 1990**). Cela provoque trois principaux changements dans les propriétés mécaniques : la réduction de la force et de l'anisotropie (en particulier dans la région élastique) et l'apparition d'une limite d'élasticité plus forte au cours de la compression dans la direction R. Le dernier effet est fortement lié à la

réduction de l'amplitude des ondulations, comme avec des amplitudes plus élevées, le rendement de la transition devient moins fort et la région de plateau moins bien définie.

Les courbes moyennes 'contrainte-déformation' tractions sont présentées sur la **figure II. 18** Les propriétés obtenues sont résumées dans le **tableau I.4** Les courbes pour les deux directions NR (A et T) sont tout à fait différentes de celui de la direction R qui représente une zone intermédiaire avec des dentelures. Cette région intermédiaire a été expliquée en termes d'apparition de microfissures successives qui se propagent à travers quelques cellules environnantes, avant que la croissance soit arrêtée (**Rosa ME et Fortes MA, 1991**).



**Figure I.18.** Comportement mécanique en traction pour le liège, dans toutes les directions (LRT) (**Rosa ME et Fortes MA, 1991**).

En général, le liège présente un comportement différent en traction et en compression. Rosa et Fortes (**Rosa ME et Fortes MA, 1991**) ont rapporté que le module d'Young en compression est sensiblement inférieur à celle de la traction. Le plus grand module de traction peut être expliqué en termes de rigidité des plaques ondulées (parois cellulaires) qui augmente à mesure que l'amplitude des ondulations diminue : la compression augmente l'amplitude, alors que la traction diminue (**Rosa ME et Fortes MA, 1991; Gil L, 1998**).

## I.4.6 Utilisation du liège

### I.4.6.1. Bouchons en liège naturel

Pendant plusieurs siècles, le liège s'est avéré être la fermeture la plus efficace pour le vin, la protection de ses qualités et lui permettait de développer et d'améliorer au fil du temps. La technique d'arrêt des bouteilles de vin au nettoyage, le liège non scellé a été perfectionné par les moines bénédictins au VIIe siècle (**Gibson L.J et al 1981, Rosa ME et Fortes MA, 1991**) puis, en 1680, la première utilisation de liège pour fermer champagne par Don Pierre Perignon, a

été le précurseur commencé d'une révolution dans le vin en bouteille (**Gil L,1998 ; Borges M.et Cunha C 1985;Rosa M.E et al, 2002**), l'imperméabilité du liège aux liquides et aux gaz, provenant du fait que ses parois cellulaires fermées sont principalement constituées de subérine, et sa grande compressibilité et la flexibilité. Il est idéal pour étanchéité des bouteilles. Le liège est recommandé pour les bouteilles de vin de réserve et des vins qui ont besoin de l'âge dans la bouteille. Les bouchons en liège naturel sont perforés directement de la meilleure écorce de liège de qualité.(**Gil L,1998 ; Borges M.et Cunha C 1985;Rosa M.E et al, 2002**).

#### **I.4.6.2.. Isolation du liège**

Pour les applications d'isolation, des agglomérats de granulés de liège (noir), sont employés. pression (environ 40 KPa), sans l'utilisation de colle (**Pereira et al, 1989 ; Baptista et al, 1993**). Ce processus industriel induit la dégradation thermo-chimique de la paroi cellulaire du liège (**Pereira,1992**), avant l'expansion de ces granulés, comme discuté ailleurs (**Rosa M.E et al,1990**). Les sous-produits de dégradation agissent comme des adhésifs naturels entre les granules à former le liège (**Pereira H,1992 ; Rosa et al,1988 ; Amen-Chen C et al ,2001**). Ces agglomérats expansés de noir sont produits à partir des bouchons de qualité résiduelle et plus faible, impropres à d'autres applications ou à partir de déchets de liège et les résidus provenant d'autres procédés industriels (**Gil L et al,2003 ; Diaz-Parralejo A et al,2003 ; Ferreira E et Pereira H, 1986**). Isolation du liège aggloméré à trois applications principales : isolation thermique (**Pereira H et Ferreira E,1989**) .absorption acoustique et amortissement des vibrations. Ainsi, les agglomérés de liège sont utilisés pour diverses applications de construction ; les murs intérieurs ou extérieurs, des bâtiments et des plafonds, pour fournir une isolation thermique et acoustique et l'isolation de sous-revêtement pour minimiser la transmission des bruits de répercussion (**Pinto R et Melo B,1988 ; Tadeu A et Santos P,2003**).

#### **I.4.6.3. Autres applications**

Au cours de la production de bouchon, une grande quantité de liège n'est pas utilisée car elle ne convient pas ou est éliminée au cours de la production. Ce matériau est granulé et utilisé dans une variété d'applications, principalement pour la production de composites de liège/caoutchouc à usage général aggloméré (**Molinas M et Verdaguer D, 1993**) et agglomérats de paroi (**Denisselle A et Doubrovsky G ,1992**) et revêtements de sol.

Pour la fabrication d'agglomérés, des granulés de liège sont mélangés avec un liant polymère et compressés à chaud, sous pression. Les variables les plus importantes dans ce processus sont la taille et la fraction de granulés de liège dans le mélange (aussi élevé que 90% en poids) ; le type de liant polymère (des polyuréthanes, des résines phénol-formaldéhyde, etc.) et de la densité de tassement. Les blocs obtenus sont stratifiés, en forme de dimensions finales et terminés. Des articles tels que des semelles de chaussures, (**Christian B et'Shoe sole, 2003**) tableaux

d'affichage, des cadeaux et des panneaux sont produits de cette manière. Les agglomérats de panneaux de sol décoratifs sont réalisés d'une manière similaire, mais plus rigide et plus solide. Ceci est habituellement accompli en changeant la pression de remplissage ou à l'aide d'un liant différent. Dans certains cas, une couche polymère de protection est utilisée pour augmenter la résistance à l'usure. Ces agglomérats peuvent être utilisés seuls ou en produits multicouches (ensemble avec les panneaux de fibres de bois à haute densité, polymère et des couches adhésives). Les propriétés les plus importantes du liège pour cette application sont sa haute résistance et d'absorption d'énergie, près de coefficient de Poisson zéro (pour plus de confort lors de la marche) et coefficient de friction élevé. Composites liège / caoutchouc sont produites par addition de granulés de liège pour une formulation de caoutchouc ; le mélange est ensuite aggrégé, vulcanisé et façonné. Presque tous les types de caoutchoucs peuvent être mélangés avec du liège (**Takayuki M ,1997**). La principale application de ces composites est : les joints (**Hiroaki A, 1997**) pour les voitures et les contenons d'huile. En plus ils sont imperméables aux liquides, le faible ratio de Poisson de liège signifie que ces joints ne souffrent pas d'extension latérale excessive (**Fortes M.A et Nogueira M.T, 1989**).

#### **I.4.7. Production du liège :**

L'écorce est composée de deux parties. La plus interne est dite écorce mère qui produit le liège, écorce qu'il ne faut pas abîmer lors de la récolte. La première écorce d'un arbre est dite mâle: c'est un liège de mauvaise qualité. Pour récolter du liège de bonne qualité, il faut enlever cette écorce mâle sur des sujets assez âgés, et attendre que l'écorce mère produise à nouveau du liège.

L'écorce primitive est coupée sur une hauteur de deux mètres environ, et les troncs présentent alors une couleur brun rouge très caractéristique sur toute la partie démasclée. L'écorce mère va donc produire à nouveau des tanins, donc une épaisseur de liège dit écorce femelle que l'on récolte environ tous les dix ans. Cette opération s'appelle le levage, et elle est faite par un leveur, avec un outil spécialisé. (**Le Chêne liège <http://www.shnh.com>**.)

La moitié de l'écorce de ces arbres est soigneusement enlevé tous les 9-12 ans (**Karade S R et al,2002**)

Pour le liège expansé, le liège peut provenir directement de la levée, de liège à recycler ou peut être récupérer sur les branches et les arbres morts. Il est broyé puis stocké sous forme de granulés. Les granulés sont injectés dans des blocs. Ils sont passés au four à 380°C , Cuit à haute température, le liège se dilate et s'agglomère avec sa propre résine (la subérine) pour donner le liège expansé pur. A leur sortie du four, de l'eau est injectée dans les blocs pour permettre leur stabilisation et éviter la sur-cuisson. Les blocs sont stockés pendant une quinzaine de jours pour

assurer leur stabilisation. Les blocs sont ensuite dimensionnés comme voulu et découpés en plaques de largeur 50 cm et longueur 100 cm et d'épaisseur variant de 2 à 30 cm.

La fabrication des plaques en liège expansé au niveau de l'usine de Jijel se déroule selon les étapes suivantes .( Documents de l'usine de la fabrication de Liège)

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

Concassage	0 à 50 mm	filtration
Broyage	0 à 22 mm	filtration
Tamisage	3 à 22 mm	stockage
	> à 22 mm	
Broyage	2 <sup>ème</sup> passe	filtration
Tamisage	2 <sup>ème</sup> passe	stockage
- 1) **Séchage**

Grain humide	séchage	filtration
Grain sec	(taux humidité <= 8 %)	
- 2) **Agglomération**

Cuission	à la vapeur surchauffée T° = 380 °C	
Capacité	260 blocs / 8 h chaque bloc (p = 21 à 22 kg , v = 0,17 m <sup>3</sup> )	
Stockage	des blocs	
- 3) **Sciage**

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

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

#### I.4.8. Les travaux antérieurs sur les composites à base de liège

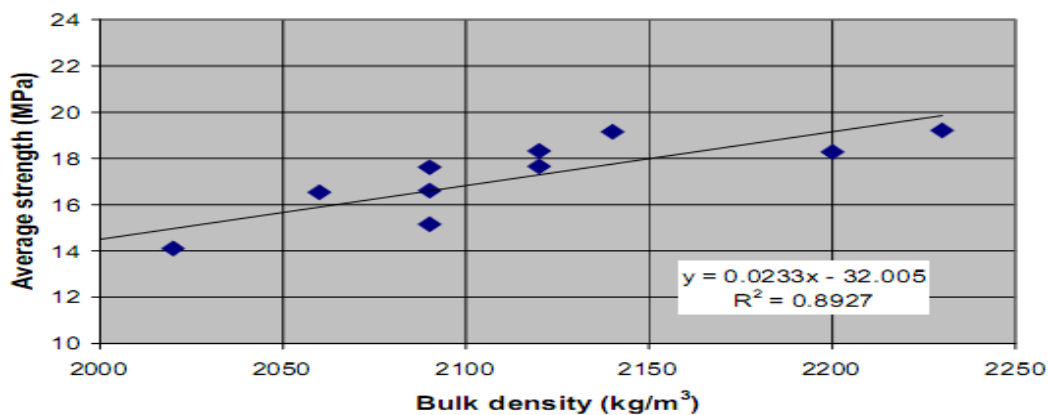
(Aziz M A et al,1979), ont utilisé des granulés de liège obtenu à partir de l'emballage des déchets d'étals de fruits à Singapour pour fabriquer des produits en ciment liège. Ils ont mélangé le ciment et le liège dans la ration de 1:1 à 1:3 en volume et faites des échantillons de béton avec un écart de densité de 475 à 890 kg/m<sup>3</sup>, qui avait des forces de compression dans la gamme de 4,2 à 12,0 MPa et résistance à la traction entre les 0,6 et 2,0 MPa. Ils n'ont pas signalé de problèmes de compatibilité entre le ciment et le liège.

(Hernandez-Olivares F et al,1999), ont utilisé des déchets de liège avec du gypse pour la fabrication de matériaux composites. Ils ont trouvé de bonnes propriétés d'isolation thermique du composite. Basé sur l'examen de la liaison entre le plâtre et le liège par microscope électronique à balayage (MEB), ils ont rapporté une bonne compatibilité entre le gypse et le liège.

#### Les travaux de Fernando (Fernando G et al, 2007)

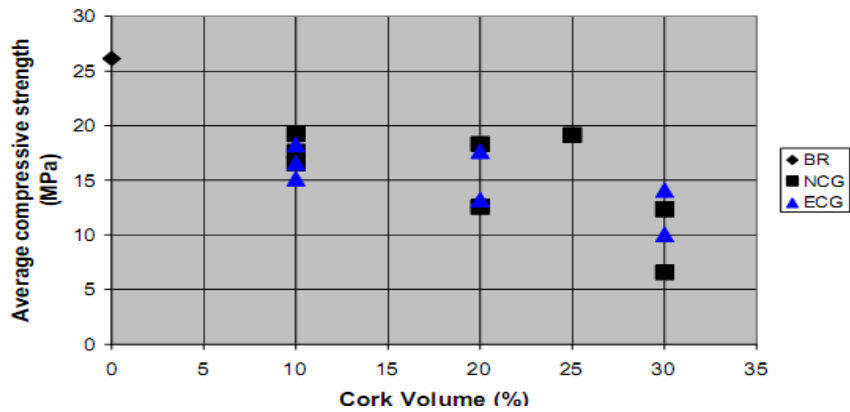
Deux types de granulés de liège (naturels et le liège expansé) ont été utilisés au lieu des granulats calcaires grossières primaire et / ou du sable de rivière. Comme prévu, quand le pourcentage de liège granulé a augmenté, la résistance à la compression du béton est tombée. Lorsque le liège expansé est utilisé pour remplacer les agrégats, la perte de résistance a été généralement plus élevée que lorsque le liège naturel a été utilisé.

La **figure I-19** montre la variation de la résistance à la compression avec la densité apparente. Les résultats indiquent que la force moyenne du béton contenant des granulats de liège est étroitement liée à sa densité apparente.



**Figure I-19** : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction de la densité apparente

La **figure I-20** montre la variation de la résistance moyenne à la compression avec la quantité de liège contenue dans le mélange. Une perte de force peut être observée avec l'augmentation du pourcentage de liège. Les deux types de liège étudié conduisent à des baisses similaires en force.



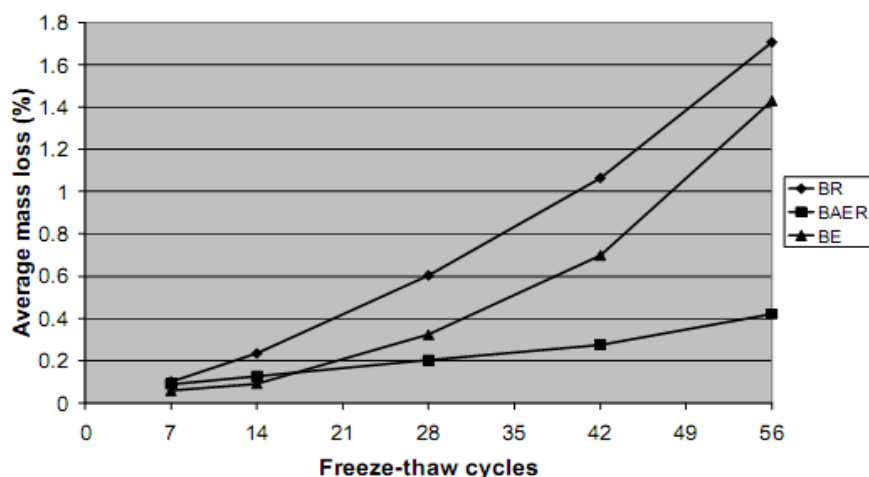
**Figure I-20 :** Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège.

Où :BR (béton de référence),NCG (granulat naturel de liège), ECG ( granulat expansé de liège). (Eires R et al, 2008), ont utilisés des déchets de l'industrie de liège contenant différentes tailles de particules dans la fabrication de plâtre et des panneaux de plâtre pressés, avec des pourcentages de 2,5% et 5% de la masse de gypse.

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

(Fernando G et al,2007 ), ont été évalué la durabilité du béton de liège vis-à-vis le phénomène de gel-dégel. Trois différentes compositions ont été étudiées : BR (béton de référence) , BAER ( béton contenant un produit entraîneur d'air), BE ( béton de granulat de liège expansé).

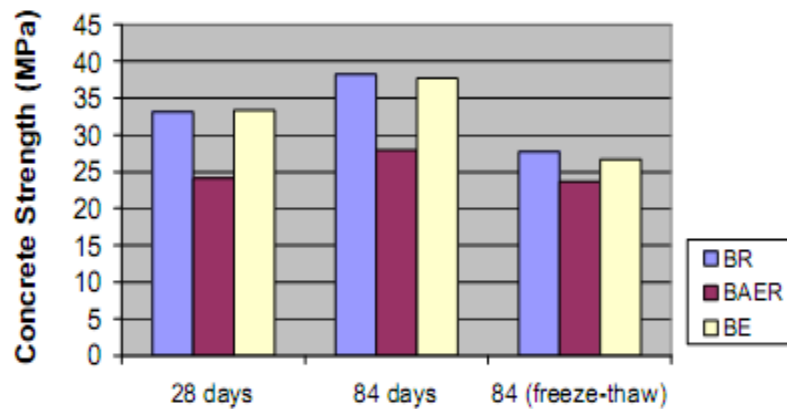
La **figure I-21** montre que BR est le plus dégradé que les autres bétons.



**Figure I-21:** Masse sèche cumulé du matériau dégradé.

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

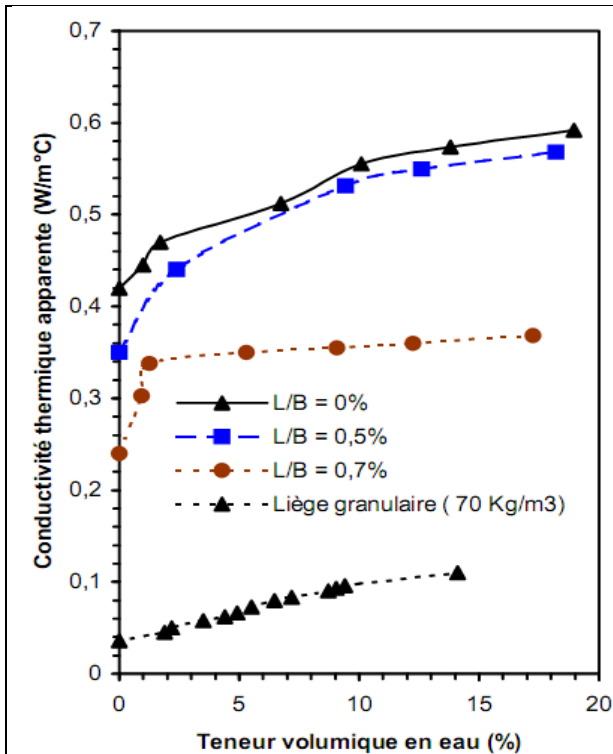
Une augmentation de la résistance à la compression avec l'âge a été observée, pour tous les types de béton testé. La perte de la résistance mécanique du béton BE est similaire à celui observé en BR.



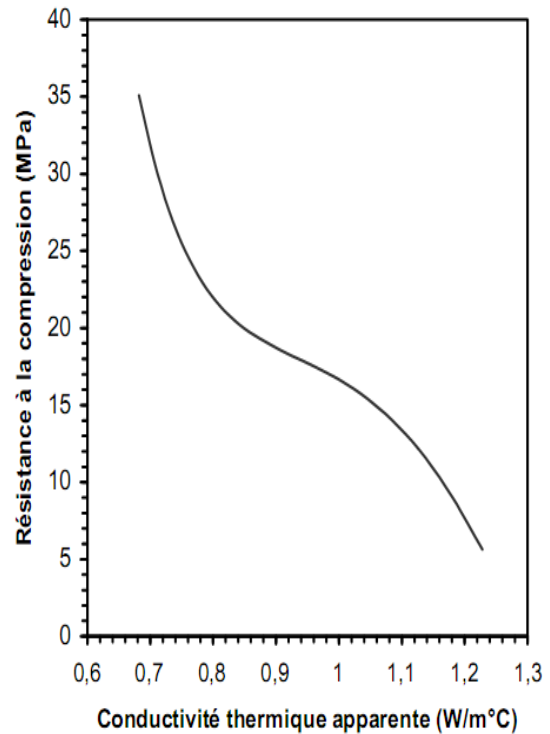
**Figure I-22:** Résistance moyenne à la compression du béton

(Abderrahman EL et al, 2005), ont constaté une nette amélioration du pouvoir d'isolation thermique du béton incorporé du liège (**figure I-23**). Ceci s'explique par une porosité fermée très grande dans les granulats du liège. Ce résultat apparaît évident si on compare les valeurs de la conductivité thermique apparente à l'état sec, dans le cas du liège granulaire ( $\lambda = 0.034 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .) D'après les résultats obtenus, ils remarquent que la résistance à la compression diminue en augmentant la quantité du liège.

Ils ont pu déduire les courbes de référence qui donne la variation de la résistance à la compression en fonction de la conductivité thermique apparente (**figure I-24**) pour le béton allégé avec le liège.



**Figure I-23** : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau : cas du béton de liège.



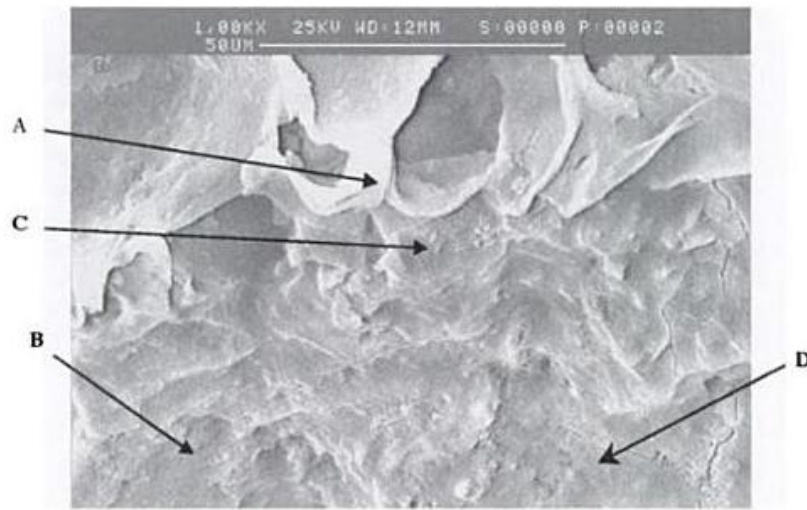
**Figure I-24** : Variation de la résistance à la compression en fonction de la conductivité thermique apparente : cas du béton allégé avec du liège.

(Merabti S, 2005), a fait une étude expérimentale sur trois types de déchets de liège (expansé, cru et poudre de liège expansé) et mélangé en volume avec le ciment (C/L :1/1, C/L :1/2, C/L :1/3) pour obtenir un matériau composite.

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

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

(Karade S R et al, 2002), ont trouvé une bonne liaison entre liège -ciment , que peut être vu dans la figure I-25. Après la fissuration de la pâte de ciment, le lien entre les cellules du liège et de la pâte de ciment est intact.



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

**Figure I-25 :** Micrographie d'échantillons de la composition liège - ciment fracturée (MEB). Les résultats indiquent que les granulés de liège réduisent considérablement la résistance de la composition. L'avantage d'utiliser des granulés de liège est qu'ils contiennent plusieurs cellules ouvertes à leurs surfaces. Cela facilite une bonne liaison avec la pâte de ciment, comme on peut le voir dans la **figure I-25**. Depuis le liège contient environ 85% en volume de vides d'air, son ajout à la matrice de ciment réduit la densité du béton. Il en résulterait une conductivité thermique réduite.

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

# Chapitre II

## Matériaux et méthodes expérimentales

**II.1 Introduction**

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

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

**II.2 Matériaux**

Les principaux constituants des bétons de sable calcaires élaborés dans ce travail sont :

**II.2.1 Sable**

➤ Masse volumique

• Masse volumique absolue

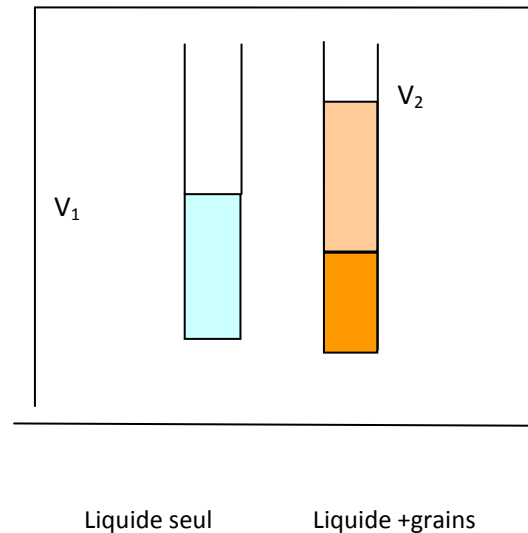
C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau (vides non compris) selon la norme NFP18-555, elle est déterminée :

Par la méthode de l'éprouvette graduée

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

M : masse de l'échantillon

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



**Figure II-1 : Schémas de l'éprouvette graduée**

○ **Par la méthode de pycnomètre.**

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

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

D'où l'on tire  $\rho_s$ .

$M_1$  : la masse du pycnomètre remplie d'eau.

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

$M_3$  : la masse totale du pycnomètre avec échantillon.

$\rho_s$  : la masse volumique des grains solides.

$\rho_w$ : la masse volumique de l'eau (=1g/cm<sup>3</sup>).

Cette méthode est plus précise que la première.

• **Masse volumique apparente**

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

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

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

Il s'agit de remplir un volume de 1 dm<sup>3</sup> et on détermine la masse totale  $M_T$ , la masse de l'échantillon sera :  $M=M_T-M_R$ . ( $M_R$  est la masse du récipient).

➤ **Absorption**

**Essai d'absorption :**

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

$$\text{➤ Abs} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \dots\dots\dots(\text{II.4}).$$

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

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

➤ **Equivalent de sable**

L'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton. Cet essai est réalisé selon la norme **NFP 18-598**, une solution lavante sépare les

éléments fins de la fraction 0/3 en provoquant leur fluctuation dans une éprouvette normalisée.

Après 20 mn de repos on mesure :

H<sub>1</sub> : hauteur du niveau supérieur par rapport au fond de l'éprouvette

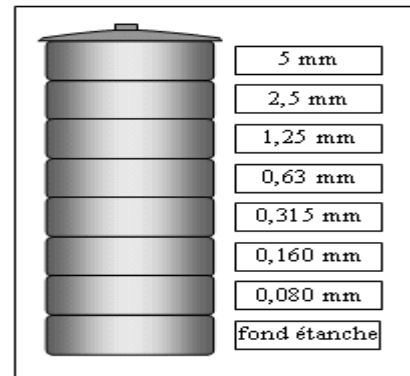
H<sub>2</sub> : hauteur du niveau de la partie sédimentée

L'équivalent de sable est donné par la relation :

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

➤ **Analyse granulométrique**

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



**Figure II-2 : Série de tamis**

▪ **la finesse du sable**

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Selon la norme **NF P 18- 560**: il est définie comme étant la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis de la série 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 3.5 et 5mm. A noter que plus le module de finesse est élevé plus le

sable est grossier.  $M_f = \frac{\left[ \sum \text{des refus (en \%)} \text{ des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 \right]}{100} \dots (\text{II.6})$

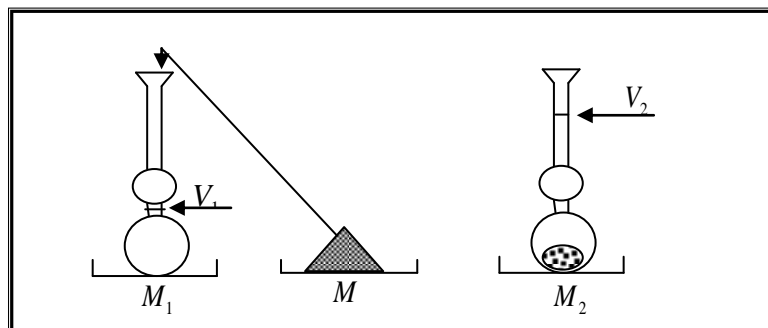
### II.2.3 Le ciment

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.

#### ➤ Masse volumique

**Masse volumique absolue : NF P18-555,**

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



**Figure II-3 :** Dispositif expérimental de l'appareil Le Chatelier

La masse volumique absolue est déterminée par la relation :

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

Où  $M_1$  : Masse de (cellule + benzène),

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

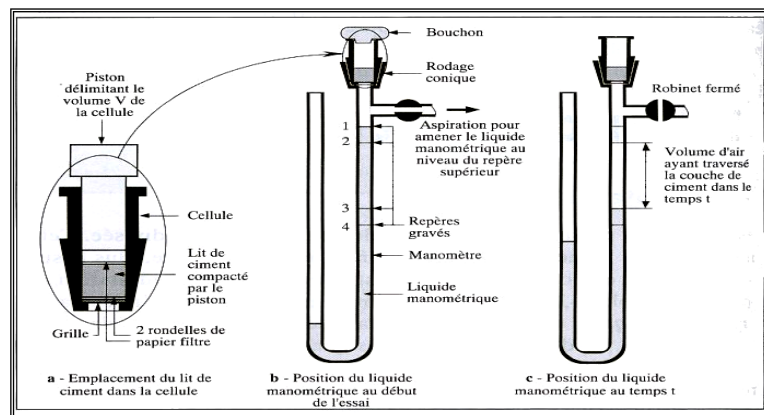
$V_1$  : Le volume du benzène initial,

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

#### ➤ Finesse

##### . Finesse du ciment

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



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

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

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

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

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

$t$  : temps mesuré par seconde.

$\rho_c$  : masse volumique absolue du ciment ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température de l'essai (poises).

### ➤ **Prise**

#### **. Essai de prise**

Cet essai est prescrit par la norme **EN 196-3**, il constitue une indication indispensable pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons. La prise d'un ciment est fonction de sa nature (à prise lente ou rapide), de sa finesse et de la température. A une température de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  le début de prise des ciments est à environ 2h à 2h30 et la fin de prise est aux environs de 3h45 à 6h (**Adam M. Neville,2000**).Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat, l'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans une pâte de consistance normale, le début de prise est définie comme étant le temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille cesse de s'enfoncer et

s'arrête à une distance  $d \geq 2.5$  cm du fond du moule. La fin de prise correspond au temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte de ciment.

➤ **Classe vraie**

La classe du ciment est une caractéristique indisponible pour l'estimation des résistances des bétons et des mortiers. Elle est déterminée par des essais de compression à 28 jours réalisés sur des éprouvettes 4x4x16 de mortier de consistance normale. Le dosage en ciment du mortier est tel que  $\frac{C}{S} = \frac{1}{3}$ . Après démoulage effectué après 24 heures, les éprouvettes sont immergées dans l'eau jusqu'au jour de l'écrasement en flexion trois points, puis en compression (norme **EN.196.1**).

➤ **Analyses chimiques :**

C'est le composé de base des ciments portland composés, il est constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium (3 CaO. SiO<sub>2</sub> et 2 CaO. SiO<sub>2</sub>). Son apport est de 80 à 94% pour les ciments types CEM II/ A et de 65 à 79% pour les types CEM II/ B, le pourcentage restant est constitué de l'un des trois ajouts énumérés précédemment, ou bien de deux de ces trois ajouts, ou bien des trois ajouts en plus des 5% de gypse. Les compositions chimiques et minéralogiques sont données par les **tableaux II.1 et II.2**. (Benachour A.2002)

**Tableau II.1 : caractéristiques chimiques du ciment**

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Perte au feu	Insolubles	Total
19.54	65.04	4.42	2.88	1.30	2.79	2.80	0.50	99.47

**Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment**

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO libre
70.84	2.61	6.84	8.76	0.90

Le ciment courant est fabriqué par mélange et co-broyage de clinker et d'autres constituants minéraux, avec une certaine quantité de sulfate de calcium, nécessaire pour réguler la prise.

#### II.1.4 Le liège

➤ **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**, de masses volumiques en vrac, réelle et absolue.

### Masse volumique en vrac

La masse volumique en vrac représente la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. La détermination de la masse volumique en vrac est réalisée suivant la norme **EN 1097-3**. Les granulats sont séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Ils sont ensuite versés dans un récipient de 2 litres 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 (**Figure II-5a**). Les granulats restants ont donc une masse correspondant au volume du récipient. Nous en déduisons la masse volumique en vrac des granulats :

$$\rho_v = \frac{M_s}{V} \dots\dots\dots(\text{II-9})$$

où  $M_s$  est la masse des granulats mis en place sans tassement dans le récipient,  $V$  le volume du récipient



**Figure II-5 : a) Mesure de la masse volumique en vrac. b) Etat saturé surface sèche du gravillon  
c) Etat saturé surface sèche du sable léger**

### Masses volumiques réelles

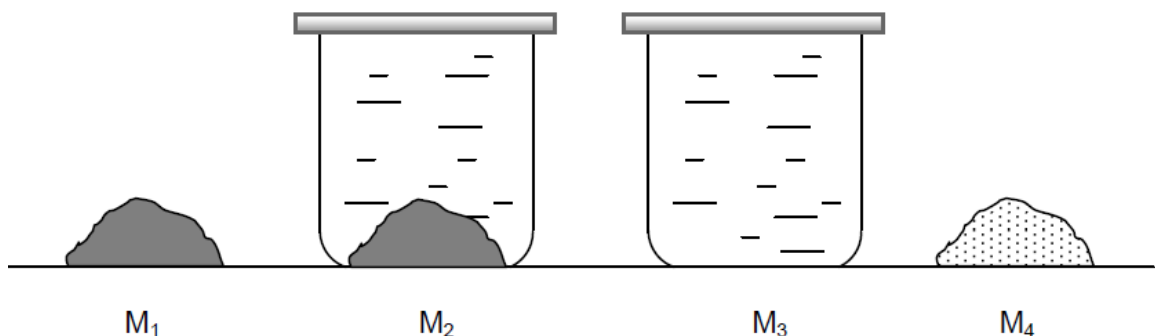
La masse volumique réelle des grains est définie comme le rapport de la masse d'un échantillon de granulat sur le volume de ses grains. Le volume des grains est délimité selon la norme **EN 1097-6** par l'enveloppe extérieure du grain, pores compris. Les masses volumiques réelles comprennent la masse 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.

Les granulats sont séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Après le séchage, ils sont immergés dans un pycnomètre rempli d'eau. Le pycnomètre est ensuite placé dans un bain d'eau à la température ambiante pendant 24 heures. A la suite de cette période, nous éliminons l'air occlus dans le pycnomètre puis le remplissons à nouveau à ras bord. La masse  $M_2$  du pycnomètre est mesurée après séchage de ses parois extérieures. En pesant le pycnomètre rempli d'eau sans les granulats, nous obtenons la masse  $M_3$ . Les granulats saturés sont ensuite égouttés pendant quelques minutes avant d'être séchés en surface. 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 (**Figure II-5b**).

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. (**Figure II-5c**).

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



**Figure II-6** : Principe de la caractérisation 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 : elle correspond au

rapport de la masse d'un échantillon de granulats séché en étuve sur le volume total des grains y compris le solide, les pores fermés et ceux accessibles à l'eau.

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_3 - (M_2 - M_1)} \dots \dots \dots (II-10)$$

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

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_3 - (M_2 - M_1)} \dots \dots \dots (II-11)$$

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

$$\rho_a = \frac{M_{41}}{M_3 - (M_2 - M_4)} \dots \dots \dots (II-12)$$

**-porosité**

La porosité intergranulaire des granulats est calculée à partir de la masse volumique en vrac et réelle. Elle s'écrit :

$$P_{int} = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{rd}} \dots \dots \dots (II-13)$$

➤ **Absorption**

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% (**Arnoud M et Virlogeux M,1986 ; Shink M,2003 ; Corman P,1961**). La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption.

L'absorption d'eau, importante et variable, des granulats légers a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons. (**Dreux G et Festa J,1998**)

On remarque essentiellement deux choses :

- Une forte proportion de l'absorption se situe dans les premières minutes, ce qui permet d'envisager de minimiser ce phénomène par un prémouillage des granulats.

- L'absorption a tendance à être plus faible si les granulats sont plus denses, donc moins poreux, et s'ils présentent une surface plus lisse donc plus fermée à l'absorption.

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

➤ **Analyse granulométrique**

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 lavés dans un tamis de 63 mm puis 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.



**Figure II-7** : Appareil de tamisage

### II.2.5 L'eau

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.2.6 l'adjuvent

Dans le béton, les adjuvants sont devenus des composants indispensables pour atteindre les propriétés recherchées. On utilise ces adjuvants chimiques, entre 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 superplastifiants (Médaplast SP 40)

On utilise les superplastifiants pour réduire le rapport **EL**, ce qui permet d'augmenter les résistances à la compression du béton tout en améliorant sa maniabilité. Le superplastifiant utilisé dans notre cas est un superplastifiant du type SP 40 produit par granitex alger

## II.3 Etude du béton à l'état frais

### II.3.1. Masse volumique à l'état frais NBN EN 12350-6

La masse volumique est déterminée selon la formule:

$$D = (m_2 - m_1) / V \dots\dots\dots \text{(II.14).}$$

Où :

D est la masse volumique du béton frais, en kg/m<sup>3</sup>

m<sub>1</sub> est la masse du récipient, en kg

m<sub>2</sub> est la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en kg

V est le volume du récipient, en m<sup>3</sup>

### II .3.2. Essai de consistance

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

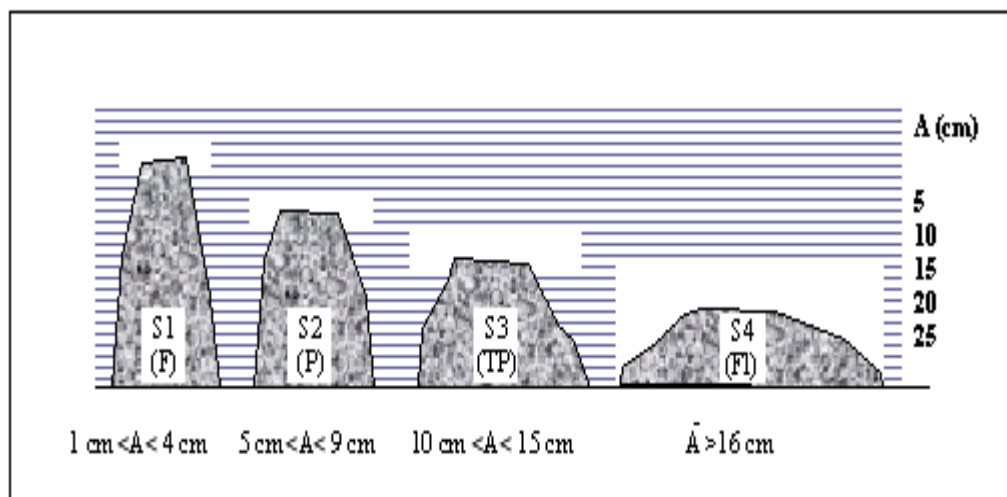
➤ **Essai d'affaissement au cône d'Abrams** (Slump test, norme **NFP18.451**)

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

Le béton est introduit dans un moule conique normalisé légèrement huilé, en trois couches d'égale hauteur, compactées par une tige de piquage actionnée 25 fois par couche, après avoir araser le bord supérieur, on enlève verticalement le moule, le béton s'affaissera. On mesure la hauteur d'affaissement qui est fonction de la consistance du béton.

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

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



**Figure II-8** : Classes de consistance mesurées au cône d'Abrams

### II.3.3 Formulation du béton de liège :

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

### II.3.4 Dosage en ciment :

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

### II.3.5 Optimisation du dosage en eau :

En général, la maniabilité d'un béton dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. Pour un béton de sable, où les grains des granulats sont caractérisés par une grande surface spécifique,

la quantité d'eau nécessaire est plus élevée que celle d'un béton ordinaire. Par conséquent, le rapport E/C (eau/ciment) est nettement supérieur à celui des bétons classiques et se situe généralement entre 0.6 et 0.7. (**Bederina M,2007**)

Pour un dosage en ciment C/S=1/3, on a procédé à la confection d'une série d'éprouvettes 4x4x16 cm en faisant varier le rapport E/C d'une valeur minimale de 0.35 à une valeur maximale de 0.65 .On soumet ces différents échantillons à l'essai d'écrasement par compression. La démarche suivie donc la suivante :

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

La plupart des bétons légers, notamment les bétons légers de structure sont formulés de la même manière que les bétons classiques. Les critères recherchés dans les méthodes de formulation sont généralement la résistance et la maniabilité (**Adam M. Neville, 2000 ; dupain R et al, 1995 ; Kedjour N E,1993**). Par contre, pour les bétons légers de construction et d'isolation, un compromis entre la résistance et les performances physiques et thermiques doit être optimisé lors de la formulation, c'est le cas des bétons de liège expansé dans ce travail.

### **II.3.6 Malaxage :**

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

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

### **II.3.7 Confection des éprouvettes :**

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes en béton sont de forme prismatique (7x7x28) cm<sup>3</sup>. Le choix des dimensions du moule est fixé par la norme **NF P.18-400**. Ils sont convenable pour réaliser les essais physicomécaniques des bétons élaborés.

Après la préparation des bétons, la mise en moule est faite en trois couches damées à 25 coups de chacune, sans vibration pour éviter le problème de ségrégation affectant l'homogénéisation des échantillons. (**Ziregue A , 2005**)

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

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

### **II.3.8 Maniabilité**

Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité du béton léger. Les deux paramètres les plus intéressants sont (**Gotteicha M ,2005**) :

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

La quantité d'eau de gâchage.

L'essai classique utilisé pour la détermination de la maniabilité est l'essai d'affaissement au cône d'ABRAMS selon la norme française **NF P 18-451**, c'est le plus couramment employé pour caractériser le béton sur chantier. On a utilisé également l'essai de consistomètre Vébé. L'évolution de la maniabilité du béton de liège expansé en fonction du dosage de liège

Nous avons constaté que l'ouvrabilité du matériau composite (liège expansé /sable), diminue avec l'ajout de liège, et elle est plus importante dans les bétons BL 8/15 que celle dans BL 3/8 et cela est du principalement à l'effet de l'introduction de la quantité nécessaire au mouillage des granulats de liège expansé 3/8. (**Ziregue A,2005**)

## **II.4 Etude du béton à l'état durci**

### **II.4.1 Masse volumique**

Les propriétés physiques étudiées sont : la masse volumique du béton séché à l'étuve, la masse volumique du béton saturé et la porosité accessible à l'eau. Elles sont mesurées selon la norme **EN 12390-7** Les éprouvettes de béton sont démoulées à 24h puis conservées dans l'eau jusqu'à l'âge de 28 jours. Pour la mesure des masses volumiques, les échantillons de petites tailles (5x5x3 cm) sont prélevés à différentes hauteurs le long d'une éprouvette Ø16x32 cm. Cela permet de s'affranchir des différences de concentration des granulats liées à une éventuelle ségrégation. Les mesures effectuées sur les trois échantillons donnent la moyenne de la propriété physique à déterminer. La détermination des masses volumiques du béton durci est effectuée sur le béton à l'état saturé, c'est-à-dire que l'échantillon est immergé dans l'eau jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées soit inférieure à 0,2% après 24h. On note la masse M1 mesurée à l'air libre du béton saturé séché en surface avec des chiffons mouillés. La masse M2 de l'échantillon de béton saturé immergé est ensuite mesurée. La différence de ces deux valeurs permet de déterminer le volume de l'échantillon. Après cette opération, l'échantillon est

séché à 105°C jusqu'à masse constante M3. En général, le béton atteint l'état sec après trois semaines dans l'étuve.

La masse volumique du béton durci séché est calculé par

$$\rho_{bs} = \frac{M_3}{M_1 - M_2} \rho_e \dots \dots \dots (II-15)$$

où  $\rho_e$  est la masse volumique de l'eau

**II.4.2 Retrait**

- **Variation dimensionnelles (N F P 15-433)** Il s'agit de mesurer le retrait et le gonflement sur des éprouvettes 7x7x28cm à l'aide de l'appareil de retrait (**voir figure II.9**).

Après démoulage, l'éprouvette est placée verticalement sur l'appareil de retrait comme indiqué sur la **figure II.9**, les valeurs du retrait ou du gonflement sont lues sur le comparateur placé sur l'éprouvette, on lit au premier jours la valeur  $l_0$  correspondante à la valeur de référence, la mesure suivante effectuée au temps t étant  $l(t)$ . Le retrait ou le gonflement enregistré au temps t est :

$$\Delta l(t) = l(t) - l_0 \dots \dots \dots (II.16).$$

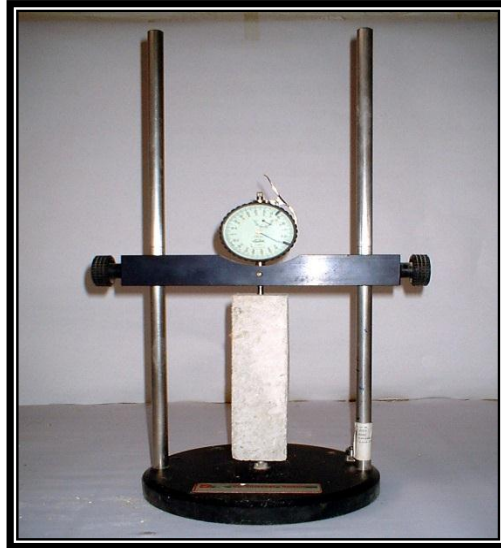
Le retrait ou le gonflement relatif est donc :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0} = \frac{l(t) - l_0}{l_0} \dots \dots \dots (II.17).$$

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

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

Pour chaque dosage en granulats et pour les deux types de bétons on mesure la variation dimensionnelle sur trois éprouvettes et la valeur moyenne est retenue comme caractéristique de la variation dimensionnelle.



**Figure II.9** Photo de l'appareil de retrait

.Le retrait endogène est une diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait de la consommation de l'eau pour l'hydratation ; on dit aussi retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation

### II.4.3 Essais mécaniques

#### ➤ Résistance à la compression

Les deux parties de les éprouvettes sont écrasées par l'essai de traction sont soumises l'une après l'autre à l'essai de compression conformément à la norme **NF EN 12390-3**. (Figure II.10), La valeur de la résistance à la compression est donnée par :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ en (MPa) } \dots\dots\dots \text{(II-18).}$$

$F_c$  : force de compression en (N).

$A$  : surface transversale de l'éprouvette en  $\text{mm}^2$  ( $4900 \text{ mm}^2$ ).



**Figure II.10** : Appareil de mesure de la compression

➤ **Résistance à la flexion**

Les éprouvettes (7x7x28) cm<sup>3</sup> sont soumis à un essai de flexion trois (3) points selon les normes NF EN 12390-5, (voir Figure II-11).

Si  $F_t$  est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion, le moment de rupture vaut  $F_t L/4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_t = \frac{1.5F_t L}{b^3} \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

En remplaçant L et b par leurs valeurs on obtient :

$$R_t = 0.234F_t \dots\dots\dots(\text{II-20})$$

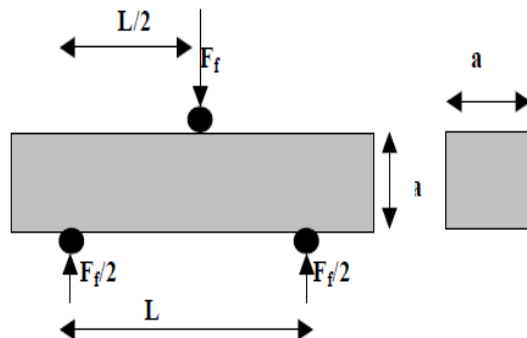


Figure II-11 : Appareil de mesure de la flexion (3 points)

## II.4.4 Essais thermiques

### II.4.4.1 Définitions :

Cette partie n'a pas été prévue au début de notre travail, néanmoins et à titre d'information nous avons voulu avoir une idée sur les caractéristiques thermiques de nos bétons, puisque la propriété la plus importante est leur pouvoir isolant qui est lié directement aux paramètres thermiques. Toutefois, une étude détaillée du comportement thermique des bétons élaborés pourra faire l'objet d'une étude ultérieure.

Avant d'explicitier les procédures expérimentales, il est nécessaire de définir les paramètres caractérisants le pouvoir isolant d'un matériau:

#### ➤ La conductivité thermique :

La conductivité thermique  $\lambda$  exprimée en  $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Parmi les facteurs qui influent sur la conductivité thermique des matériaux de construction, citons : la porosité et la teneur en eau.

#### ➤ La capacité calorifique :

Elle traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner la chaleur, elle est notée ( $c$ ) et exprimée en  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

#### .La diffusivité thermique :

Le rapport  $a = \lambda/\rho c$  est appelé diffusivité thermique du matériau, elle exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

➤ **L'effusivité thermique :**

L'effusivité thermique est la propriété d'un corps à arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact, elle est caractérisée par un coefficient d'arrachement ou effusivité,  $b = \sqrt{\lambda \rho c}$  exprimée en  $(\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1})$  (**Goual M S,2001; Bouguerra,1997**).

#### **II.4.4.2 Méthodes de mesure des paramètres thermiques**

De nombreuses méthodes de mesure de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermiques des matériaux s'appuient donc sur la détermination d'un champ de température dans des échantillons de géométrie connue, en imposant des conditions aux limites constantes ou variables avec le temps. Parmi ces méthodes, citons deux méthodes les plus utilisées, il s'agit de la technique de la sonde monotige à faible inertie thermique (**Laurent J P , 1986**).

, et la méthode de la sonde plane **TPS** (Transient Plane Source) (**Gustafsson S E,1991**).

Pour nos mesures on a utilisé la technique de la sonde plane **TPS**, en raison de sa capacité de détermination de la conductivité et la capacité thermique des matériaux contrairement à la méthode de la sonde monotige qui ne permet de déterminer que la conductivité thermique, de plus les erreurs liées à la résistance de contact sont minimales dans la **TPS** que dans la sonde monotige.

#### **II.4.4.3 Dispositif expérimental :**

L'essai consiste à placer en sandwich la sonde **TPS** (**figure II.12**) et la relier à un circuit électrique. La variation de la résistance au borne du pont de Whestone,  $\Delta U$  permet d'accéder à la différence de potentielle  $\Delta E(t)$  aux bornes de l'élément **TPS**. Une relation entre  $\Delta E(t)$  et la variation de température dans l'élément **TPS** peut être établie. Celle-ci est fonction de la diffusivité thermique **a** et de conductivité thermique  $\lambda$ . Un traitement mathématique approprié permet d'accéder à  $\lambda.a$  et ensuite **c**

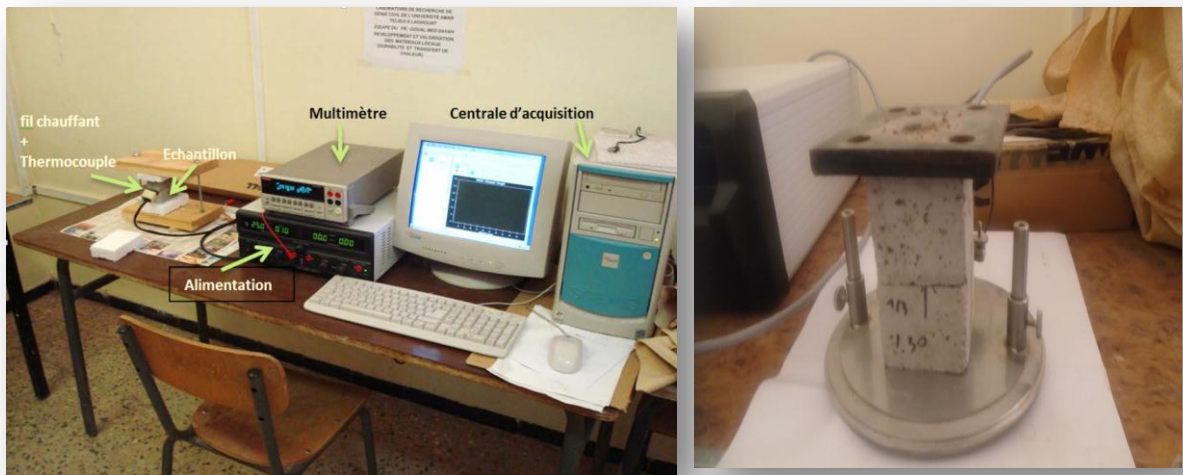


Figure II.12 Schéma de la sonde TPS

# Chapitre III

## Résultats expérimentaux et discussion

### III.1 Matériaux

#### ➤ Le sable

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

#### ➤ Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ45 Provenant de la cimenterie de Sour El Ghozlane.

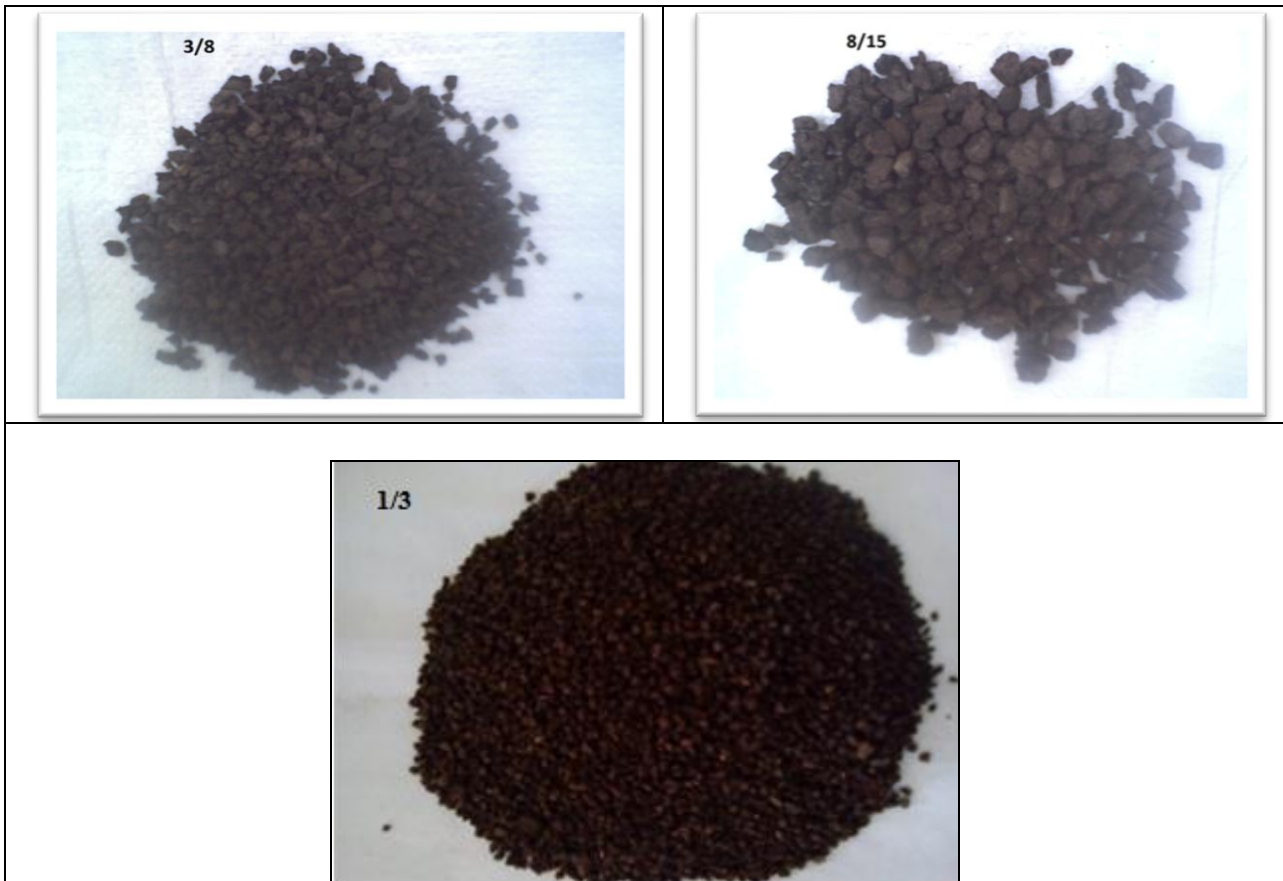


**Figure III.1** Echantillons de sable calcaire 0/3 et de ciment CPJ45

#### ➤ Les granulats

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

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



**Figure III.2** Echantillon de granulats de liège expansé 1/3, 3/8 et 8/15

➤ **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.

➤ **L'analyse chimique de l'eau de gâchage**

L'analyse chimique de cette eau est effectuée au laboratoire de l'EPDEMI et elle indique que c'est une eau de potabilité chimique passable à bonne avec un pourcentage élevé de sulfates. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau de gâchage sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau III.1** L'analyse chimique de l'eau de gâchage

Nature du point d'eau	Concentration en cations et en anions			
Ca <sup>+2</sup> en mg/L	104	Balance		5.2
Mg <sup>+2</sup> en mg/L	97	Cations		8
Na <sup>+</sup> en mg/L	102.3	m.éq/L		4.45
K <sup>+</sup> en mg/L	6.46	18.73		0.16
Cl <sup>-</sup> en mg/L	148	Balance		4.17
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> en mg/L	520	Anions		10.82
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en mg/L	94	m.éq/L		1.55
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en mg/L	12.4	16.24		0.2
Résidu sec à 105°C 1576 mg/l	PH (laboratoire) 7.7	Conductivité en 1/10 mm à 25° 16.80		Dureté total 43.25
Test chlore (ml d'eau de javel à 15° /m <sup>3</sup> 0.96 ml/l	T.H 66°F	T.A.C 7.75°F	S.A.F 95°F	I.S 62°F
Minéralisation 1067 mg/l	Oxygène dissous O <sub>2</sub> 12.05		SiO <sub>2</sub> 0.0 mg/l	Somme des ions 1101.55
Cations	Ca <sup>+2</sup> =15%	Mg <sup>+2</sup> =23%		Na <sup>+</sup> =13% K <sup>+</sup> =0.5%
Anions	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> =31.3%	Cl <sup>-</sup> =12%		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> =4.5% NO <sub>3</sub> =30.60%

### III.1.1 Matériaux utilisés

### III.1.2 Caractérisation des matières premières

#### III.1.2.1 Le sable

##### Caractéristiques physiques

##### A- Masse volumique apparente $\rho_{app}$ et absolue $\rho_{abs}$ :

Les masses volumiques apparente et absolue moyennes du sable sont :

Pour le sable calcaire :

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

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

Pour le sable alluvionnaire :

### B- 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**

$$C_p = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - P \dots\dots\dots (III. 7)$$

$$C_p = \frac{V_{abs}}{V} = \frac{\rho_{abs}}{\rho_{app}} \dots\dots\dots (III. 8)$$

Où  $V_v$  est le volume des vides et  $V$ , le volume total apparent.  $e$ , étant la Porosité.

Les résultats de mesure donne :  $C_p = \frac{1.53}{2.67} = 0.57$  soit  $p = 1 - C_p = 0.43$   
*tyy*

### C- Coefficient d'absorption d'eau :

Pour le sable calcaire est :  $C_{abs} (\%) = 7.78 \%$

Pour le sable alluvionnaire :  $C_{abs} (\%) = 0.97 \%$

### D- Equivalent de sable:

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

**Tableau III.2 Caractéristiques physiques des sables**

Type de sable	Masse volumique apparente ( $\text{kg/m}^3$ )	Masse volumique absolue ( $\text{kg/m}^3$ )	Equivalent de sable (%)	Absorption d'eau (%)	Module de finesse	Porosité
Sable calcaire	1530	2670	74	7.780	2.66	0.43
Sable alluvionnaire	1537	2620	94	0.97	4.10	0,41

D'après les valeurs des caractéristiques physiques des sables utilisé 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 pus 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 de 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.

### E-Analyse granulométrique :

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire et du sable alluvionnaire sont regroupés dans les tableaux III.3 et III.4 et leur courbes granulométriques est représentée sur les Figure III.3. Et III.4

**Tableau III.3** Résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire

<b>Masse du sable 1000 g</b>				
<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus partiel (g)</b>	<b>Refus cumulé(g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
4	1.6	1.6	0.16	99.84
3.15	22.2	23.8	2.38	97.62
2.5	69.1	92.9	9.29	90.71
1.25	311.1	404	40.4	59.6
0.63	215.4	619.4	61.94	38.06
0.315	103.7	723.1	72.31	27.69
0.16	101.7	824.8	82.48	17.52
0.08	47.6	872.4	87.24	12.76
Fond	121.8	994.2	99.42	0.58

**Tableau III.4** Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire

<b>Masse du sable 1000 g</b>			
<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulé(g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
3.15	70.2	3.51	96.49
2.50	24.8	4.75	95.25
2.00	28.9	6.195	93.805
1.6	22.7	7.33	92.67
1.25	32.4	8.95	91.05
1.00	33.8	10.94	89.06
0.80	50.00	13.14	86.86
0.50	270.9	26.685	73.315
0.40	244.3	38.9	61.10
0.315	205.8	49.19	50.81
0.25	287.0	63.54	36.46
0.20	253.6	76.22	23.78
Fond	475.4	99.99	0.01

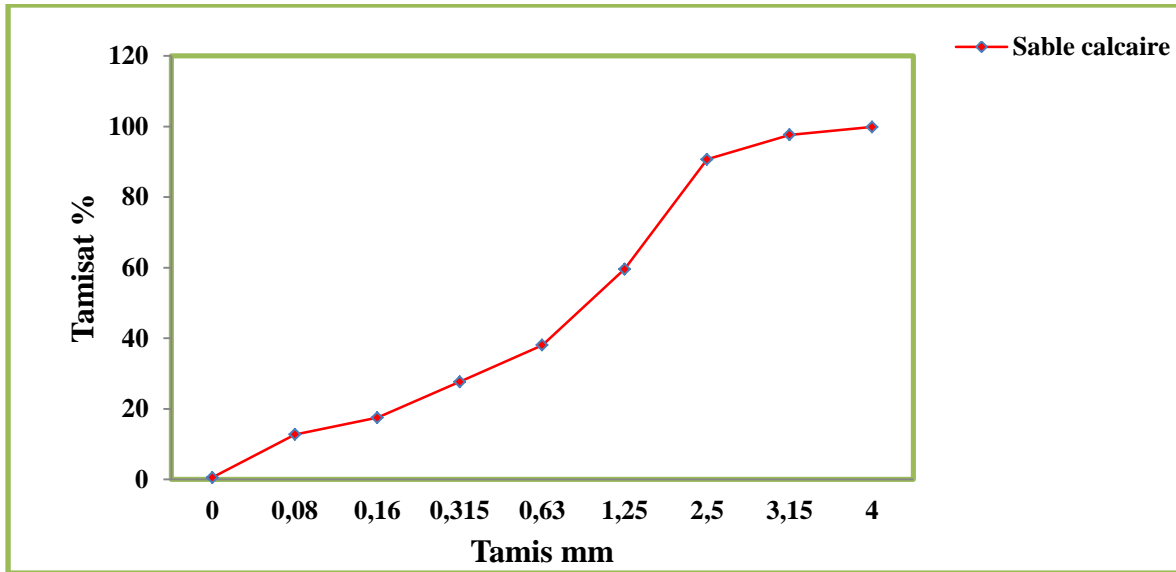


Figure III.3 Courbes granulométriques du sable calcaire

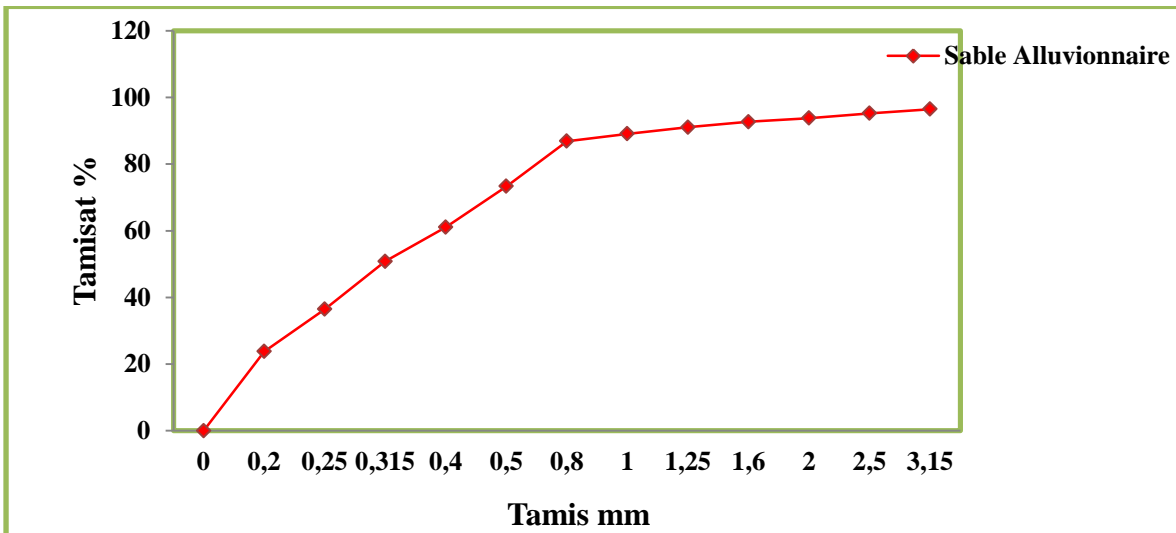


Figure III.4 Courbes granulométriques du sable alluvionnaire

A partir des courbes granulométriques on peut calculer les coefficients d'uniformité  $C_u$  qui est définie par la relation

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots \dots \dots (III. 1)$$

Pour le sable calcaire :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.45}{0.1257} = 3.57 \dots \dots \dots (III. 2)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{(0.225)^2}{0.1257 \times 0.45} = 0.894 \dots \dots \dots (III. 3)$$

Pour le sable alluvionnaire :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.4}{0.1} = 4 \dots \dots \dots \text{(III. 4)}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{(0.22)^2}{0.4 \times 0.1} = 1.21 \dots \dots \dots \text{(III. 5)}$$

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

$$M_f = \frac{\left[ \sum \text{des refus (en \%)} \text{ des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 \right]}{100} \dots \dots \dots \text{(III. 6)}$$

Pour le sable calcaire :

$$M_f = (0 + 9.29 + 40.4 + 61.94 + 72.31 + 82.48)/100 = 2.66$$

Pour le sable alluvionnaire :

$$M_f = (3.51 + 4.75 + 6.195 + 7.33 + 8.95 + 10.94 + 13.14 + 26.685 + 38.9 + 49.19 + 63.54 + 76.22 + 99.99)/100 = 4.10$$

Les courbes granulométriques des deux types de sables montrent que nos sables ont une granulométrie continue. En se référant aux valeurs des module de finesse on voit que 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.

Les courbes granulométriques montrent aussi que les pourcentages d'éléments fin ( $\varphi < 100 \mu\text{m}$ ) Sont de 2.66 Pour le sable calcaire et 4.10 pour le sable alluvionnaire ceci aura un impact sur le les propriétés à l'état frais et à l'état durci des bétons élaborés et par conséquent ce paramètre sera pris en compte dans le choix du type de sable à utiliser.

La courbe granulométrique du sable calcaire est étalée. et elle est bien graduée et sa continuité bien répartie

### III.1.2.2 Le ciment

Le type de ciment utilisé est un ciment portland CPJ45.Fabriqué l'usine de El Gozlane

#### ➤ Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques du ciment CPJ45 utilisé sont résumées dans le tableau III.5.

Tableau III.5 Caractéristiques physiques du ciment

Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	Surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)	Prise à froid	Prise à chaud	Expansion (mm)	Classe vraie	
						Rc (MPa)	Rt (MPa)
1410	3010	3640	2h25 5h10	30mn 1h10	10	43.2	4.3

### ➤ Composition chimiques et minéralogiques du ciment

La composition chimique du ciment CPJ a été obtenue à travers la fiche technique donnée par l'usine de Sour El Gozlane. Cette composition est résumée dans le tableau III.6 :

Tableau III.6 Composition chimique du ciment CPJ45 de Sour El Gozlane

Elément	SiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perte au feu	total
Quantité %	20.66	4.77	2.88	63.31	1.17	2.32	1.06	96.17

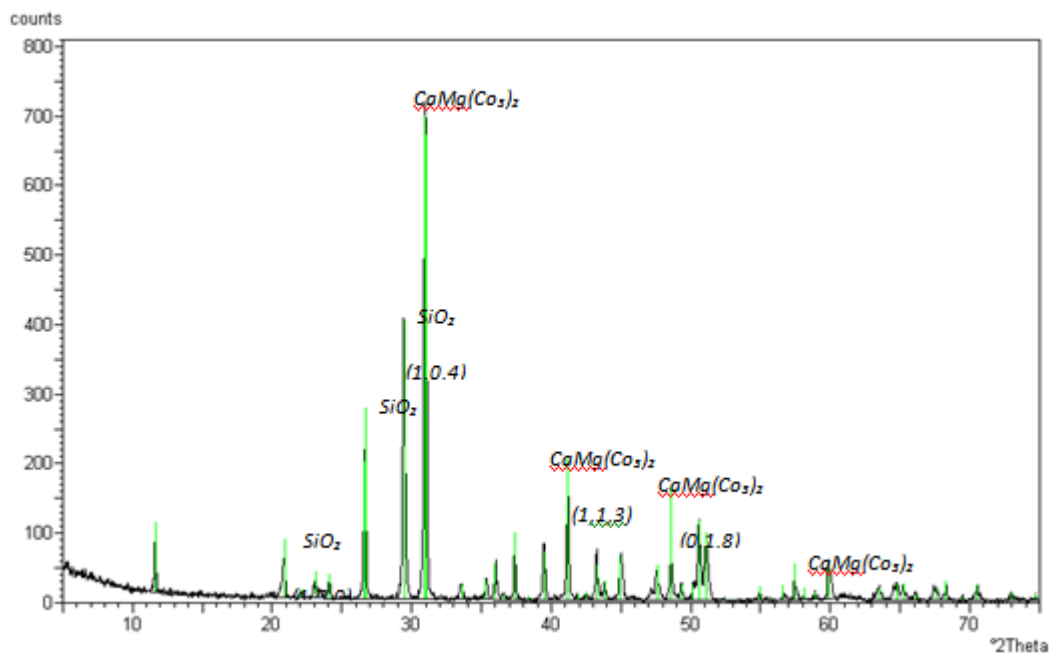


Figure III.5 Diffractogramme du ciment CPJ 45

D'après le diffractogramme du ciment on peut confirmer l'existence des silicates tricalciques  $C_3S$  ; des silicates bicalciques  $C_2S$  ; des Ferro-aluminates tétra calciques  $C_4AF$  qui sont généralement les composants de base des ciments CPJ. L'analyse a aussi révélé l'existence des aluminates tricalcique  $C_3A$  et des ferrites tricalcique  $C_2F$ . les résultats de l'analyse minéralogique du ciment sont représentés dans le tableau III.7

Les résultats de caractérisation physico mécanique et chimiques du ciment utilisé confirment bien la classe avec laquelle le ciment est identifié et commercialisé. sa finesse et son pourcentage élevé en CaO peuvent conférer aux bétons élaborés des performances requises.

**Tableau III.7** Analyse minéralogique du ciment

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au clinker + gypse (%)
Clinker	$C_3S$	58
	$C_2S$	18
	$C_3A$	5
	$C_4AF$	13
	$CaO_L$	1
Régulateur du prise	Gypse	5
Ajout	Calcaire	5
	Pouzzolane naturelle	7

### III.1.2.3 Les granulats de liège

#### ➤ Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats de liège expansé sont représentés dans les tableaux III-8. III.9. III.10 et ses courbes granulométriques sont représentées sur la figure III.6.

**Tableau III.8** Résultats de l'analyse granulométrique du liège 1/3

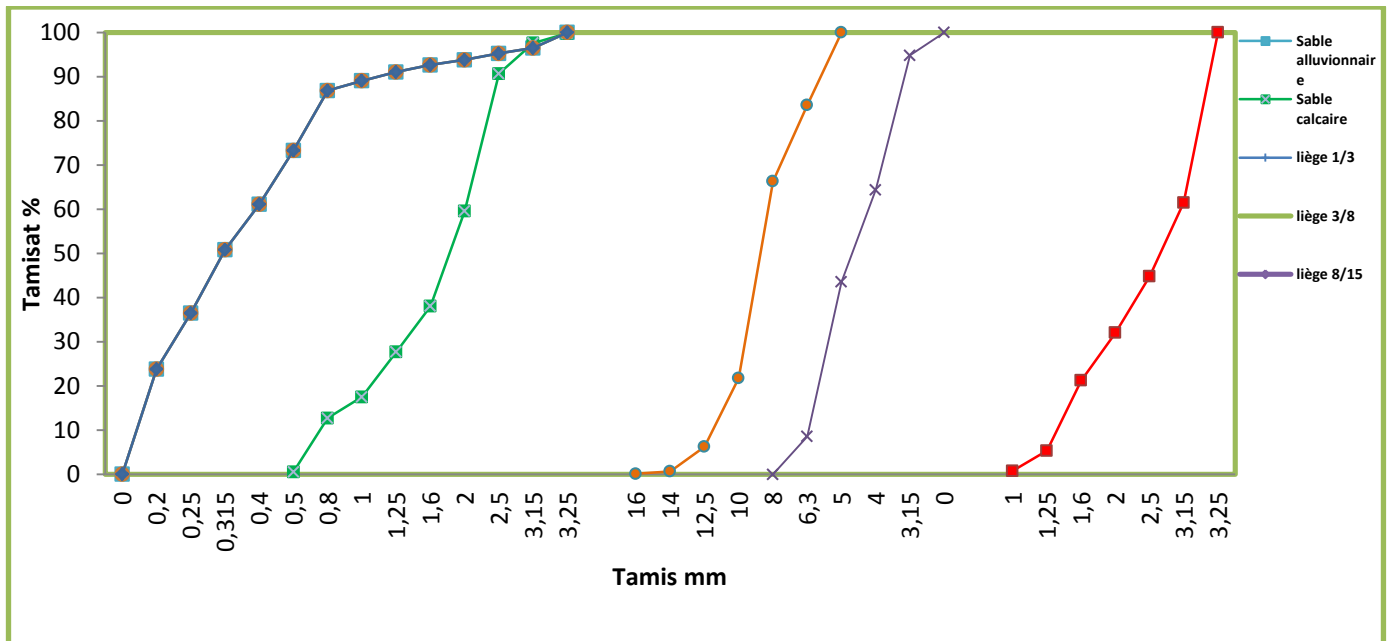
Masse du liège 200 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
3.25	0	0	0	100
3.15	77.00	77.00	38.5	61.5
2.5	33.3	110.3	55.15	44.85
2.00	25.6	135.9	67.95	32.05
1.6	25.6	161.5	8.75	21.25
1.25	27.8	189.3	94.65	5.35
1.00	9.10	198.4	99.2	0.8
Fond	1.60	200	100	0

**Tableau III.9** Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 3/8

Masse des granulats 160 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	0	0	0.00	100.00
6.3	8.3	8.3	5.19	94.81
5	48.7	57	35.63	64.38
4	33.3	90.3	56.44	43.56
3.15	56	146.3	91.44	8.56
Fond	13.7	160	100.00	0.00

**Tableau III.10** Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 8/15

Masse des granulats 160 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	0	0	0.00	100.00
14	26.3	26.3	16.44	83.56
12.5	27.6	53.9	33.69	66.31
10	71.2	125.1	78.19	21.81
8	24.9	150	93.75	6.25
6.3	8.9	158.9	99.31	0.69
fond	0.9	159.8	99.88	0.13



**Figure III.6** Courbes granulométriques du sable alluvionnaire, du sable calcaire et des granules de liège

D'après les courbes granulométriques des granules de liège et en se référant à celles des sables on voit qu'il y a une bonne continuité du liège avec le sable calcaire. Ceci aura certainement un impacte sur la rhéologie des bétons élaborés.

### ➤ Caractéristiques physiques

#### A- La masse volumique apparente

Pour détermination la masse volumique apparente des différents types de liège on utilise la méthode de récipient. Les résultats de mesure de la masse volumique apparente des différents granules sont représentés dans le tableau III.11 suivantes :

**Tableau III.11** Masse volumique apparente des granules de liège expansé 1/3, 3/8 et 8/15

granulome	masse volumique apparente					Moyenne (kg/m <sup>3</sup> )
	Volume du récipient (cm <sup>3</sup> )	masse du récipient vide(g)	masse du récipient plein (g)	masse de l'échantillon (g)	masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	
1/3	1000	2396.9	2476.6	79.70	79.70	79.32
	1000	2396.9	2474.8	77.90	77.90	
	1000	2396.9	2477	80.10	80.10	
3/8	1000	2396.9	2488.1	91.20	91.20	90.00
	1000	2396.9	2485.6	88.70	88.70	
	1000	2396.9	2487	90.10	90.10	
8/15	1000	2396.9	2468.4	71.50	71.50	70.70
	1000	2396.9	2466.6	69.70	69.70	
	1000	2396.9	2467.8	70.90	70.90	

**B- La masse volumique absolue**

Pour détermination la masse volumique absolue des différents types de liège on utilise la méthode de pycnomètre. Les résultats de mesure de la masse volumique absolue des différents granulats sont représentés dans le tableau III.12

**Tableau III.12** Masse volumique absolue des granulats de liège 1/3,3/8 et 8/15

granulome	masse volumique absolue							
	masse du picno plein M3	masse du pic et ech M2	masse de l'échantillon M4	M1	masse volumique absolue	mv réelle de	mv sat	porosité %
1/3	1488.3	1345.3	44.3	30	246	256	173	31.20
3/8	1480	1363.8	45.5	30	281	311	205	29.21
8/15	1487	1322.4	45.1	30	210	231	154	30.75

Les valeurs obtenues des masses volumiques montrent que le matériau du liège est assez léger relativement à d'autres matériaux comme le bois. La légèreté du liège nous permettra certainement d'avoir des bétons assez légers. Les granulats 8/15 ont la plus faible masse volumique par rapport à la granulométrie 1/3 et 3/8.

**C- Degré d'absorption d'eau**

Afin de contrôler la quantité d'eau dans le mélange à cause de leur effet très important sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton (maniabilité et la résistance), nous avons effectué des mesures de l'absorption des granulats de liège par immersion. Après l'immersion d'une masse des granulats secs dans l'eau pendant 48 h. on mesure la masse d'eau absorbée pour chaque 1 minute jusqu'à la stabilisation de celle dernière où on assure que l'eau trouve dans les pores intérieurs des granulats soit sortie. Les valeurs de mesure de l'absorption sont représentées sur le tableau III.13 et III.14

**Tableau III.13** Essai d'absorption et désorption des granulats de liège 1/3 .3/8 et 8/15

granulat	Masse d'échantillon (g)	Masse du récipient vide	Masse du récipient plein
1/3	300.00	582.00	649.70
3/8	200.00	566.70	659.50
815	145.00	404.89	438.30

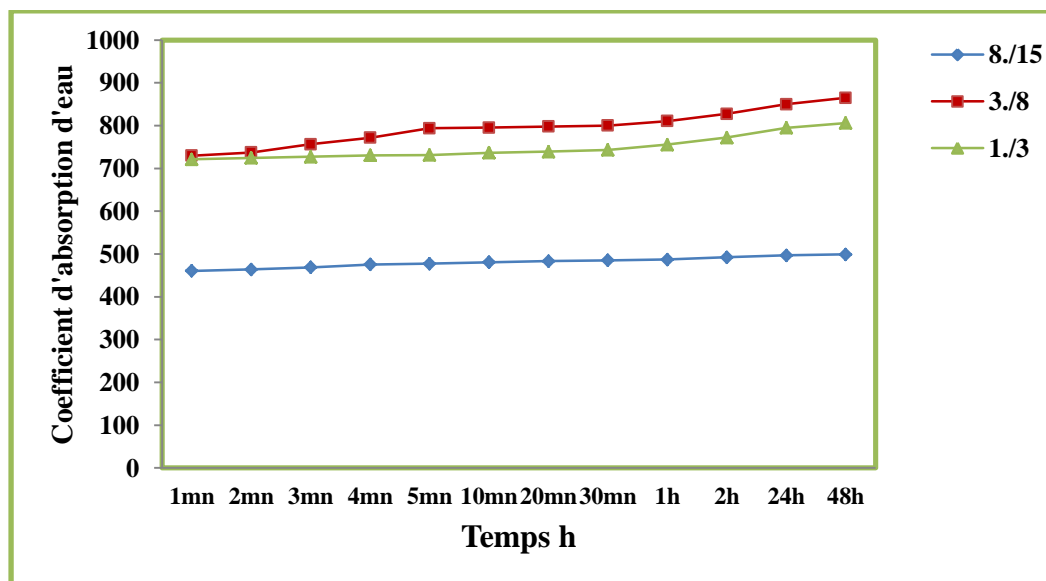
**Tableau III.14** Absorption d'eau des granulats de liège 1/3 .3/8 et 8/15

granulats		temps											
		1mn	2mn	3mn	4mn	5mn	10m n	20m n	30m n	1h	2h	24h	48h
1/3	9:30	721.3	724.5	727.2	730.5	731.4	736.7	739.3	743.4	755.6	772.3	794.8	806.3
3/8	9:30	729.9	737.5	756.4	771.6	793.8	795.2	797.8	800.2	810.7	827.3	850.1	864.8
8/15	9:30	460.4	463.9	468.8	475.3	477.5	480.7	483.4	485.3	486.9	492.2	496.7	499.2

**Tableau III.15** Désorption d'eau des granulats de liège 1/3 .3/8 et 8/15

granulats		temps											
		1mn	2mn	3mn	4mn	5mn	10m n	20mn	30m n	1h	2h	24h	48h
1/3	9:31	863.8	862.1	861.5	860	859.5	858.7	856.3	853.4	847.7	823.2	777.5	695.8
3/8	9:31	803.4	801.7	800.1	798.3	795.4	798.8	792.5	787.1	781.4	755.8	710.3	692.4
8/15	9:31	496.3	495.3	493	490.8	487.5	480.1	469.3	455.6	441.8	433.5	425.7	405.3

Les courbes représentant les taux d'absorption et désorption des granulats en fonction du Temps sont représenté sur les figures III.7 et III.8

**Figure III.7** Cinétique d'absorption des granulats légers pendant 48 heures

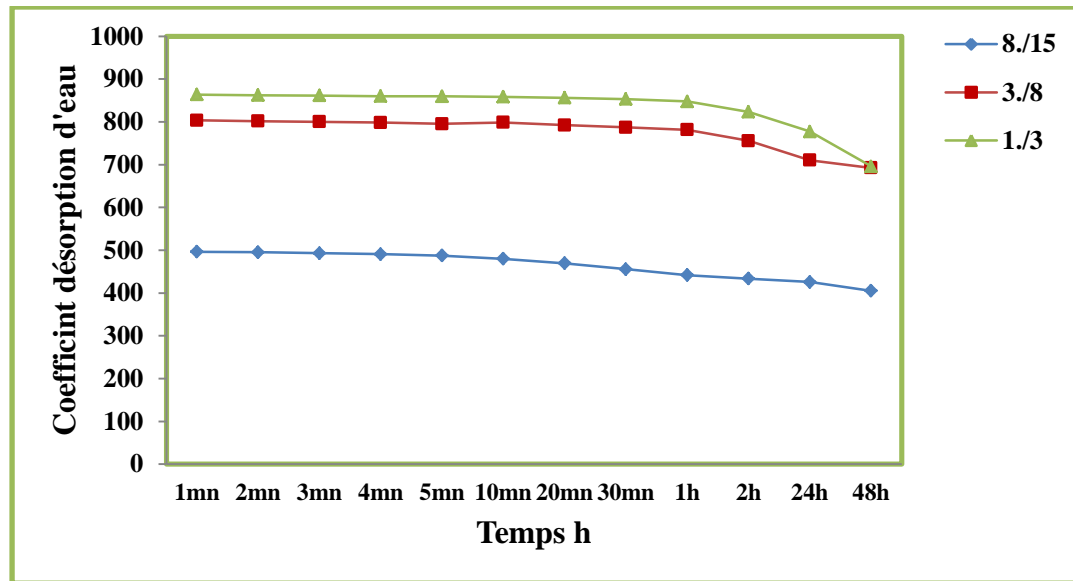


Figure III.8 Cinétique désorption des granulats légers pendant 48 heures

D'après les tableaux ci-dessous on voit que les granulats 1/3 ont un taux d'absorption de 24%. les granulats 3/8 ont un taux d'absorption de 31% et les granulats 8/15 ont un taux d'absorption 14%. D'après l'allure des courbe le gain de masse d'eau est important pour les granulats 1/3 que pour les granulats 3/8 ensuite pour les granulats 8/15. Cela est logique du faite que plus le matériau est fin plus il absorbe d'avantage d'eau. Au cours de désorption la fugue de l'eau est plus rapide pour les granulats 8/15 que pour celle des 3/8 et par la suite des 1/3

## III.2 Etude des bétons à l'état frais

### III.2.1 Formulation et élaboration des bétons

La plupart des bétons légers, notamment les bétons légers de structure sont formulés de la même manière que les bétons classiques. Les critères recherchés dans les méthodes de formulation sont généralement la résistance et la maniabilité. Par contre, pour les bétons légers de construction et d'isolation, un compromis entre la résistance et les performances physiques et thermiques doit être optimisé lors de la formulation. C'est le cas des bétons de liège expansé dans ce travail.

#### III.2.1.1 Formulation du béton témoin

Ce béton est un béton dépourvu de gros granulat. Il est composé essentiellement de ciment. De sable et éventuellement de l'eau.

➤ **Dosage en ciment**

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

➤ **Optimisation du dosage en eau**

En général, la maniabilité d'un béton dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. Pour un béton à base sable, où les grains des granulats sont caractérisés par une grande surface spécifique, la quantité d'eau nécessaire est plus élevée que celle d'un béton ordinaire. Par conséquent, le rapport E/C (eau/ciment) est nettement supérieur à celui des bétons classiques et se situe généralement entre **0.52** et **0.7**.

Pour un dosage en ciment C/S=1/3, on a procédé à la confection d'une série d'éprouvettes 4x4x16 cm en faisant varier le rapport E/C d'une valeur minimale de **0.40** à une valeur maximale de **0.65**. On soumet ces différents échantillons à l'essai d'écrasement par compression. La démarche suivie est donc la suivante :

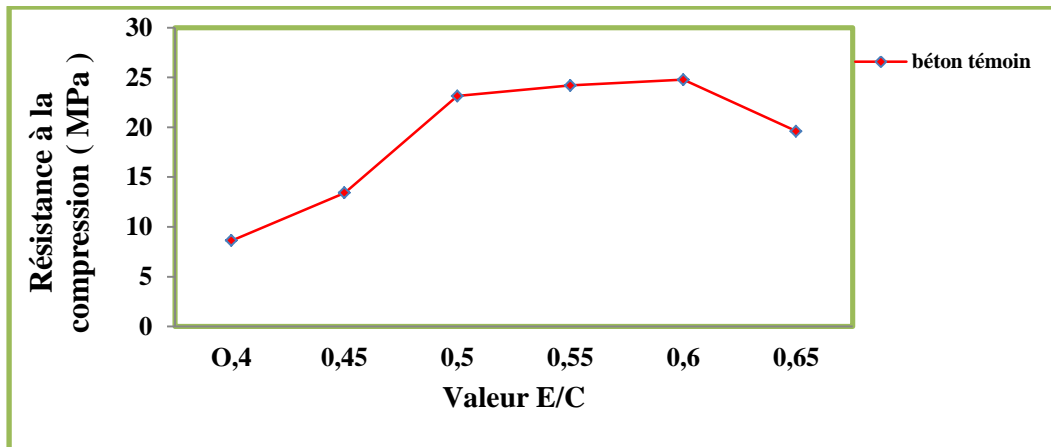
- Recherches des caractéristiques rhéologiques à l'état frais (bonne maniabilité).
- Etude du béton à l'état durci (recherche des résistances optimales à la compression).

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

**Tableau III.16** Valeurs de la résistance en compression des mortiers de sable calcaire en fonction du rapport E/C

<b>Dosage en eau (E/C)</b>	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
<b>Compression (MPa)</b>	8.63	13.41	23.13	24.19	24.78	19.60

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



**Figure III.9** Variation de la résistance à la compression du béton témoin en fonction du rapport E/C

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

Pour le sable alluvionnaire. du fait que le sable alluvionnaire de la région de Laghouat a été très utilisé dans beaucoup de travaux au sein du laboratoire de génie civil à titre d'exemple celui de (Bounoua. A 2012). On se contentera de prendre la valeur de  $E/C=0.55$  avec une résistance à la compression de **34MPa**

D'après les résultats de caractérisation des deux types de sable ainsi que les caractérisations à l'état frais et à l'état durci on peut conclure :

- En matière de granulométrie, le sable de calcaire est plus fin que le sable alluvionnaire. ceci induit une demande en eau plus grande. en revanche la maniabilité meilleure avec l'utilisation d'un super-plastifiant. D'autre par le sable calcaire a présenté une meilleur continuité et homogénéité de granulométrie avec celle des granulats
- En matière de résistance, c'est vrai que les mortiers à base de sable alluvionnaire présentent des résistances largement supérieures que celle des mortiers à base de sable calcaire ; mais sachant que notre béton léger à base de liège sera utilisé dans les éléments porteurs isolants ou des éléments isolants qui en générale demandent des résistances assez faibles ce critère de résistance ne sera pas pris en compte.
- Sur le plan environnemental l'utilisation du sable calcaire est plus bénéfique

En conclusion le sable qui sera utilisé dans l'élaboration des bétons légers sera le sable calcaire

### III.2.1.2 Formulation des bétons élaborés :

La quantité de l'eau de gâchage des bétons élaborés sera prise égale à celle du mortier témoin c.à.d.  $E/C = 0.60$  à condition d'utiliser des granulats à l'état saturé afin d'éviter l'absorption d'une partie de cette eau de gâchage par les granulats. Un superplastifiant (**SP40**) est utilisé à des dosages croissants à partir de **0.5%** de la masse du ciment pour le béton avec **20%** de liège jusqu'à **2.5%** pour le béton avec **60%** à des pas de **0.5%**.

#### ➤ Détermination du dosage minimum de granulats

Afin de situer les deux types de bétons dans la gamme des bétons légers (c'est-à-dire masse volumique inférieur à **1800 kg/m<sup>3</sup>**), nous avons réalisé une série de compositions en démarrant par un faible dosage en granulat et chaque fois on augmente ce dernier. Puis on pèse les échantillons après séchage à l'étuve et finalement on prend comme dosage initial en granulats celui qui nous donne une masse volumique qui se rapproche de la valeur **1800kg/m<sup>3</sup>**.

Pour notre cas il est de **20%** en proportion volumique

- Proportions des granulats employées

Le liège est incorporé à des dosages en rapport volumique granulats/matrice de **20%.30%.40%.50%** et **60%** pour les trois types de granulométrie. Les dosages pondéraux sont représentés dans le tableau III.17

**Tableau III.17** Masses volumiques de compositions à l'état frais pour les trois granulométries

N°ech	Pourcentage Du liège %	Poids du liège M <sub>l</sub> (gr)	Poids du Sable M <sub>s</sub> (gr)	Poids du Ciment M <sub>c</sub> (gr)	E/C	Quantité De super plastifiant	Quantité D'eau Totale E (l)
Ech 00	0	0	12420	4140	0.60	0	2484
Ech 01	20	314.7322	9885.3	3295.09	0.60	16.48	1977.054
Ech 03	30	472.0983	8649.6	2883.204	0.60	28.83	1729.923
Ech 04	40	629.4644	7414	2471.318	0.60	37.07	1482.791
Ech 05	50	786.8306	6178.3	2059.432	0.60	41.19	1235.659
Ech 06	60	944.1967	4942.6	1647.540	0.60	41.19	988.5272

➤ **Préparation des éprouvettes**

- **Malaxage**

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

Le sable et le ciment sont introduits en premier dans la bétonnière. Le malaxage dure pendant deux minutes. On introduit ensuite les  $\frac{3}{4}$  de la quantité d'eau nécessaire et le malaxage continu pendant une minute. Les granulats sont introduits graduellement pendant que le malaxage continue pendant une autre minute. Enfin on ajoute la quantité d'eau restante et on laisse la bétonnière tourner pendant une dernière minute.

➤ **La mise en moule**

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 que la plus petite dimension du moule doit être largement supérieure à la dimension des plus gros granulats. De plus les dimensions permettent de réaliser les essais de caractérisation recherchés. Pour la caractérisation physicomécanique des bétons élaborés dans ce travail, le choix de moules de dimensions 4x4x16cm pour les mortiers témoins et 7x7x28cm pour les bétons à granulats légers convient largement pour effectuer les essais de caractérisation.

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

Afin d'étudier l'apport de l'environnement de cure sur les caractéristiques physicomécaniques les éprouvettes ainsi élaborées sont conservées dans un environnement :

- Les conditions ambiantes du laboratoire (Air libre).

Les bétons élaborés seront notés BCLL1/3. BCLL3/8. BCLL8/15

### III.3 Caractérisation des bétons frais

#### ➤ Consistance et maniabilité

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

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

#### ➤ Etude de la masse volumique du béton frais

La masse volumique du béton de liège à l'état frais est déterminée expérimentalement en utilisant la relation :

$$\gamma_{app} = \frac{(M - M^*)}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \dots\dots\dots \text{(III. 9).}$$

Avec :

M : masse du moule rempli juste après la fin de malaxage.

M\* : masse du moule vide.

V : volume du moule.

Le tableau III-18 regroupe les valeurs de la masse volumique des bétons légers à base de granulats de liège à l'état frais.

### III.4 Caractérisation du béton durci

#### III.4.1 Caractéristiques physique

##### ➤ Masse volumique apparente

La masse volumique des bétons légers est l'une des caractéristiques les plus importantes.

Le tableau III-18 représente la variation de la masse volumique à l'état durci à 28 jours en fonction du dosage en liège expansé.

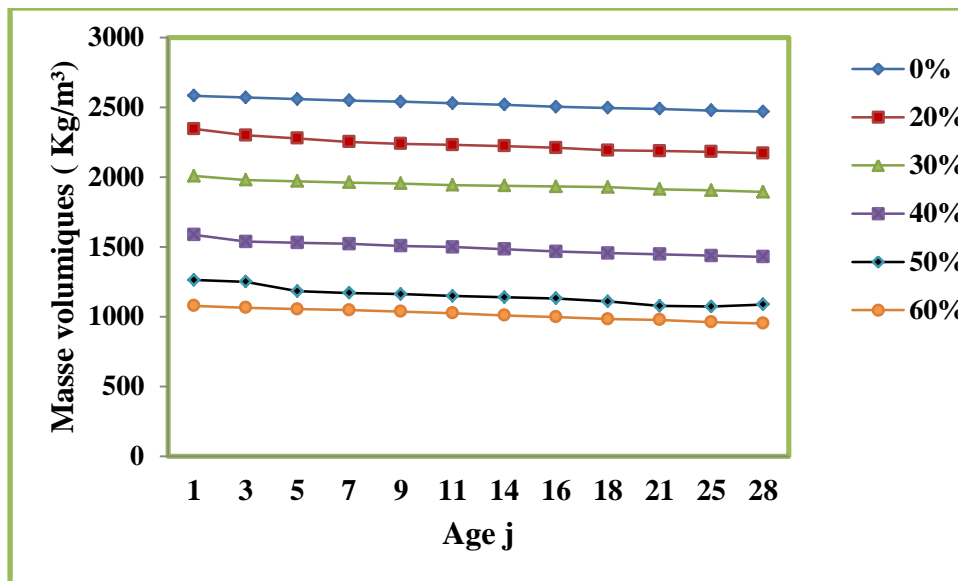
##### ● Résultats de la masse volumique par série d'échantillon

Les résultats de la mesure de la masse volumique à l'état durci et selon le dosage en granulats de liège pour les trois série de granulométrie sont représentés dans les tableaux III.18. III.19 et III.20.

Les variations de la masse volumique des bétons élaborés sont représentées sur les figures III.10, III.11 et III.12

**Tableau III.18** Variation de la Masse volumiques apparente de BCLL 1/3 en fonction du dosage en granulat

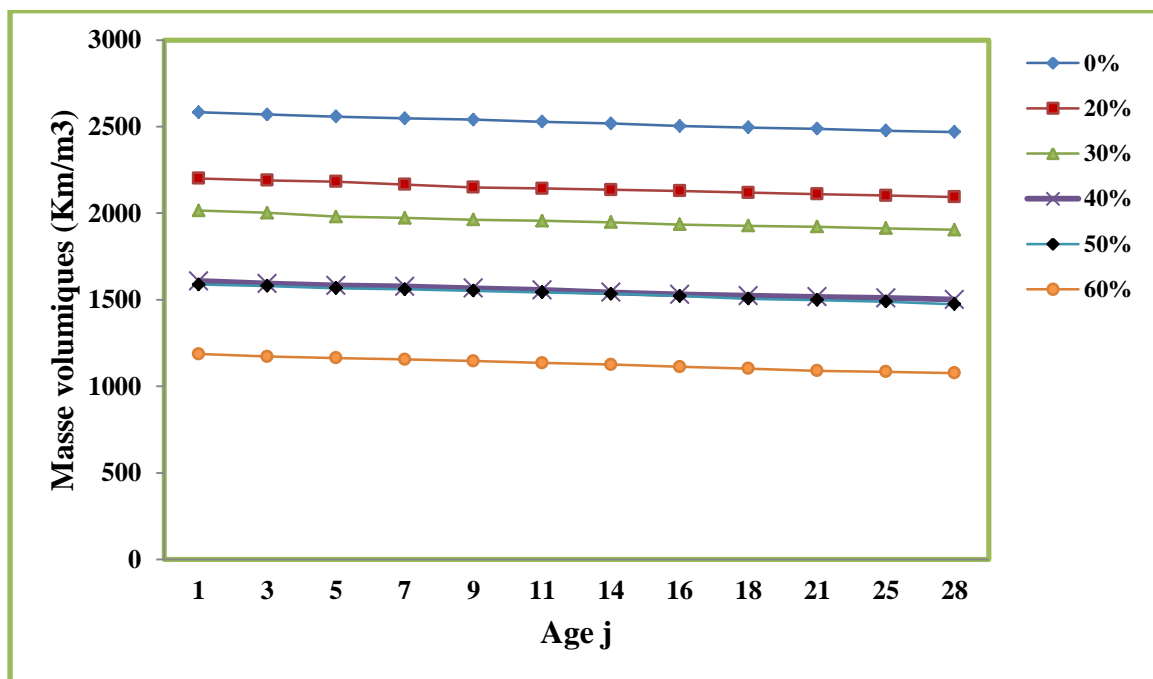
Age	Pourcentage de liège 1/3 expansé					
	0	20%	30%	40%	50%	60%
1	2582.46	2345.66	2008.53	1586.73	1263.06	1077.90
3	2570.33	2299.74	1979.56	1538.46	1250.43	1064.80
5	2558.2	2277.53	1970.33	1529.70	1182.60	1054.20
7	2547.63	2251.83	1961.1	1521.50	1170.40	1046.70
9	2540.00	2238.66	1953.7	1506.66	1162.00	1036.36
11	2528.4	2230.13	1943	1499.03	1147.90	1025.13
14	2518.3	2222.9	1938.16	1484.16	1138.93	1009.86
16	2503.7	2209.86	1932.83	1467.26	1130.33	998.16
18	2495.2	2191.3	1928.2	1454.80	1109.56	982.43
21	2487.9	2186.7	1912.63	1447.66	1077.16	977.73
25	2476.8	2180.76	1904.56	1436.76	1072.53	961.6
28	2469.5	2170.96	1893.7	1429.03	1087.26	951.90



**Figure III.10** Variation de la masse volumique du BCLL 1/3 En fonction de l'âge du béton

**Tableau III.19** Variation de la Masses volumiques apparente de BCLL 3/8 en fonction du dosage en granulat

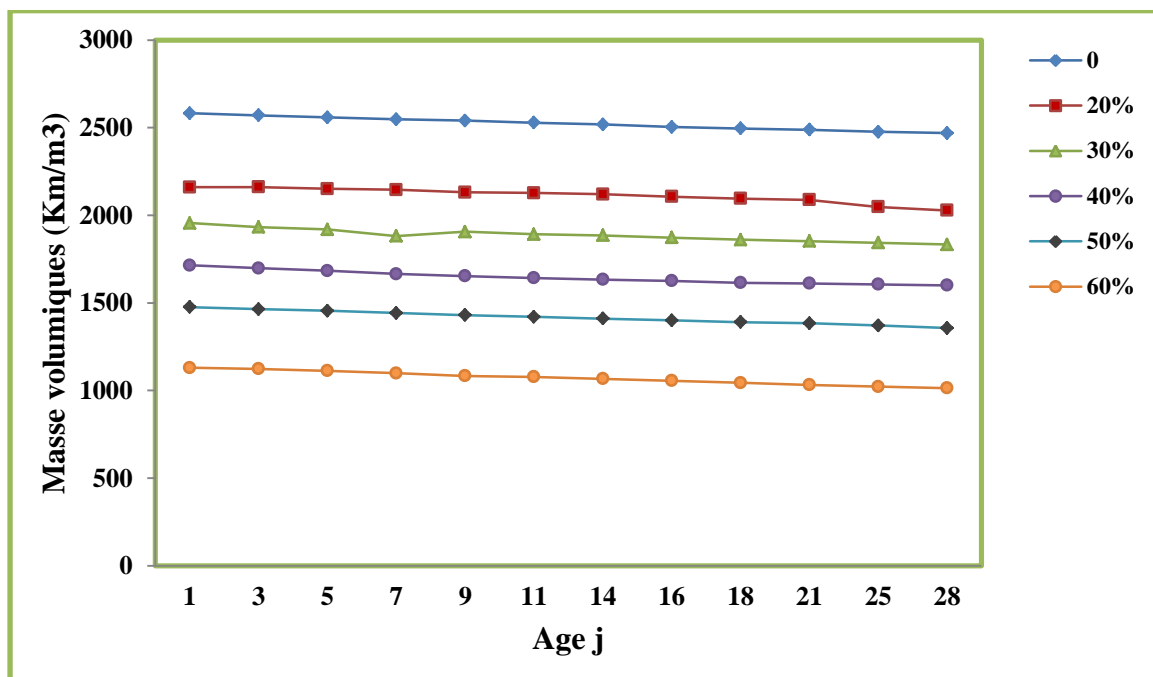
Age	Pourcentage de liège 3/8 expansé					
	0	20%	30%	40%	50%	60%
1	2582.46	2201.36	2014.80	1608.66	1588.46	1187.1
3	2570.33	2190.13	2002.26	1593.5	1579.63	1172.4
5	2558.2	2182.40	1979.90	1582.73	1567.13	1163.96
7	2547.63	2165.73	1973.03	1577.2	1560.73	1155.53
9	2540.00	2149.30	1962.10	1566.4	1551.86	1146.4
11	2528.4	2142.73	1955.56	1556.96	1542.33	1134.73
14	2518.3	2135.23	1947.43	1543.03	1534.76	1125.6
16	2503.7	2128.66	1934.80	1530.46	1521.43	1112.93
18	2495.2	2119.03	1927.26	1523.2	1505.36	1102.83
21	2487.9	2110.36	1922.00	1516.73	1498.56	1089.46
25	2476.8	2101.86	1912.60	1510.73	1488.93	1084.56
28	2469.5	2093.53	1904.63	1500.8	1474.63	1077.1



**Figure III.11** Variation de la masse volumique du BCLL 3/8 En fonction de l'Age du béton.

**Tableau III.20** Variation de la Masses volumiques apparente de BCLL 8/15 en fonction du dosage en granulat

Age	Pourcentage de liège 8/15 expansé					
	0	20%	30%	40%	50%	60%
1	2582.46	2160.5	1955.5	1714.83	1475.76	1129.9
3	2570.33	2161.06	1932.63	1697.83	1464.4	1123.43
5	2558.2	2151.63	1919.06	1683.26	1455.03	1112.43
7	2547.63	2145.7	1882.03	1665.26	1442.23	1098.76
9	2540.00	2130.8	1906.03	1652.96	1430.96	1083.23
11	2528.4	2127.36	1891.6	1642.56	1420.2	1077.5
14	2518.3	2120.6	1885.43	1633.63	1410.76	1066.66
16	2503.7	2106.9	1872.6	1625.7	1400.2	1055.56
18	2495.2	2095.3	1861.1	1615.4	1390.53	1044.53
21	2487.9	2088.56	1852.46	1611.03	1384.1	1032.3
25	2476.8	2047.63	1843.6	1605.5	1371.43	1022
28	2469.50	2027.90	1833.73	1600.26	1356.30	1013.73



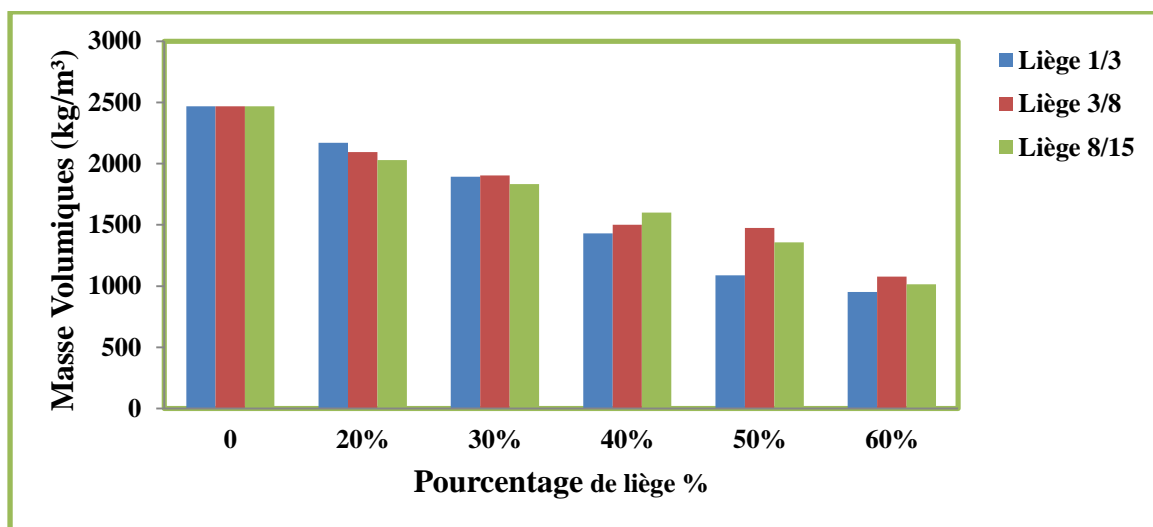
**Figure III.12** Variation de la masse volumique du BCLL 8/15 En fonction de l'âge du béton.

Afin de comparer les masses volumiques des BCLL1/3, BCLL3/8 et BCLL8/15 nous avons regroupé les résultats des masses volumiques à 28 jours pour les différents dosages en granulats liège dans le tableau III.21

Les variations de la masse volumique en fonction du dosage en granulats de liège pour les granulométries sont représentées sur l'histogramme de la figure III.13

**Tableau III.21** Comparaison des masses volumiques apparente de BCLL expansé à 28 jours selon le pourcentage de granulométrie

Pourcentage	La masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		
	Granulométrie 1/3	Granulométrie 3/8	Granulométrie 8/15
0	2469.5	2469.5	2469.5
20%	2170.96	2093.53	2027.90
30%	1893.7	1904.63	1833.73
40%	1429.03	1500.8	1600.26
50%	1087.26	1474.63	1356.3
60%	951.90	1077.1	1013.73



**Figure III.13** Histogramme de comparaison des masses volumiques en fonction de dosage en liège.

D'après ces résultats, on constate que :

La masse volumique apparente des compositions diminue lorsque le pourcentage des granulats de liège expansé augmente.

- Pour le dosage élevé en granulats de liège les BCLL1/3 ont des masses volumiques moins que ceux de granulats BCLL3/8 et BCLL8/15
- BCLL 3/8 ont des masses volumiques moins que ceux des BCLL 8/15
- Ceci est lié directement par les caractéristiques physiques des granulats de liège. car la compacité des granulats 1/3 est plus grande que celle des granulats 3/8 et 8/15.
- Ceci est lié directement par les caractéristiques physiques des granulats de liège. car la compacité des granulats 3/8 est grande que celle des granulats 8/15.

➤ **Retrait**

• **Evolution du retrait en fonction de l'âge**

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

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

Les résultats des mesures de retrait pour les différentes compositions des bétons de liège expansé sont représentés dans les résultats suivants.

• **Variation du retrait des bétons de liège expansé en fonction de l'âge**

**Tableau III.22** Evolution du retrait en fonction de l'âge 1/3

éch	Age de l'échantillon (mm/m)											
	01	03	05	07	09	11	14	16	18	21	25	28
<b>0</b>	0.420	0.731	0.987	1.143	1.327	1.475	1.675	1.762	2.410	2.543	2.715	2.855
<b>20</b>	1.185	1.715	1.826	1.943	2.016	2.058	2.068	2.092	2.274	2.387	2.431	2.862
<b>30</b>	1.014	1.540	1.857	2.242	2.413	2.436	2.490	2.565	2.635	2.755	2.927	2.973
<b>40</b>	1.542	2.156	2.617	2.886	3.004	3.071	3.154	3.180	3.216	3.225	3.467	3.768
<b>50</b>	1.705	2.480	2.766	3.124	3.425	3.688	3.938	4.379	4.466	4.507	4.554	4.885
<b>60</b>	1.667	2.876	3.370	4.013	4.317	4.673	4.879	4.935	4.974	5.008	5.074	5.426

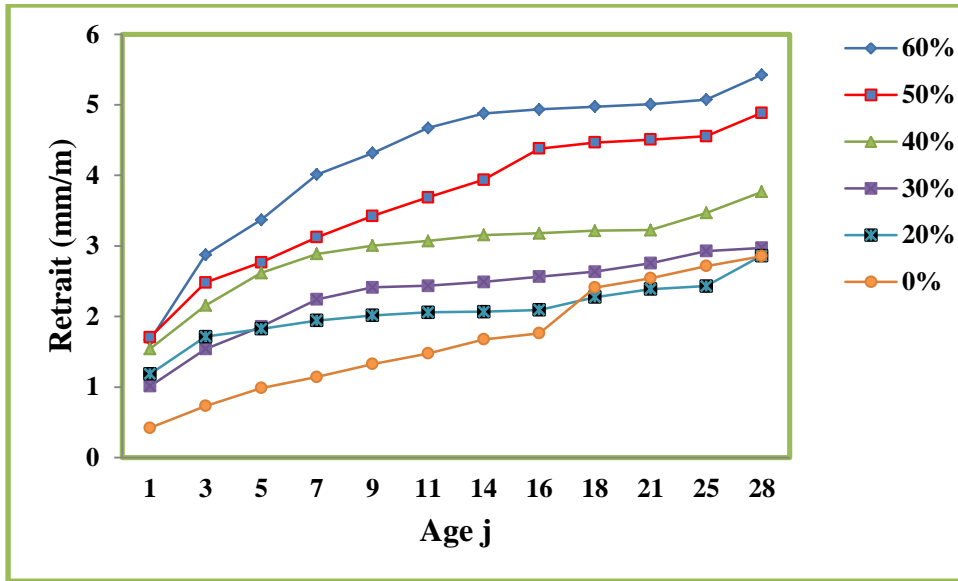


Figure III.14 Evolution du retrait du BCLL 1/3 en fonction de pourcentages de liège

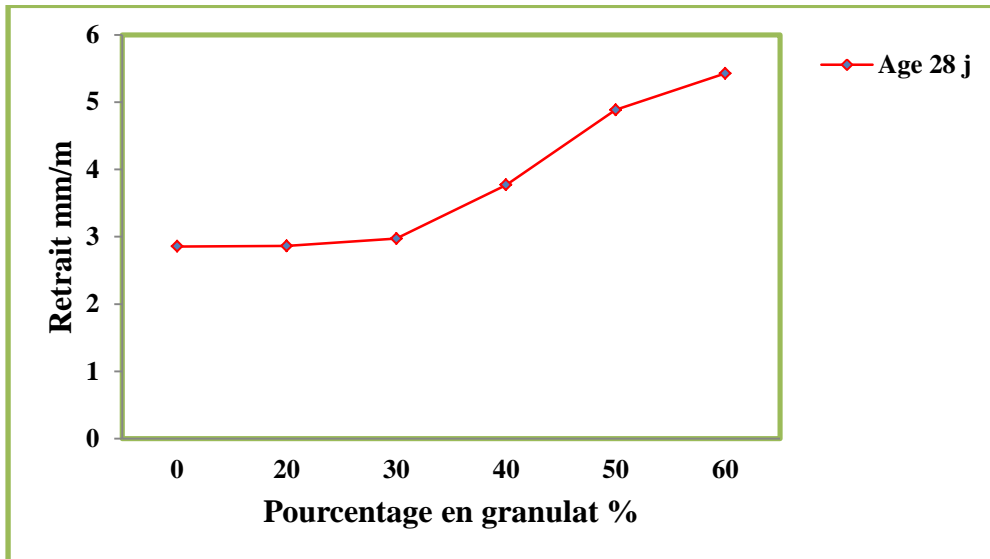


Figure III.15 Evolution du retrait du BCLL 1/3 en fonction de l'âge du béton

Tableau III.23 Evolution du retrait en fonction de l'âge 3/8

éch	Age de l'échantillon (mm/m)											
	01	03	05	07	09	11	14	16	18	21	25	28
0	0.420	0.731	0.987	1.143	1.327	1.475	1.675	1.762	2.410	2.543	2.715	2.855
20	0.969	1.331	1.568	1.698	1.811	1.892	1.918	2.113	2.180	2.268	2.589	2.936
30	1.295	1.618	1.661	1.876	1.987	2.204	2.305	2.366	2.499	2.570	2.642	2.957
40	1.660	1.892	2.010	2.135	2.187	2.320	2.400	2.444	2.659	2.720	2.799	3.057
50	1.705	1.904	2.026	2.153	2.256	2.347	2.426	2.457	2.673	2.741	2.824	3.068
60	1.736	1.919	2.044	2.193	2.268	2.359	2.457	2.475	2.678	2.748	2.852	3.123

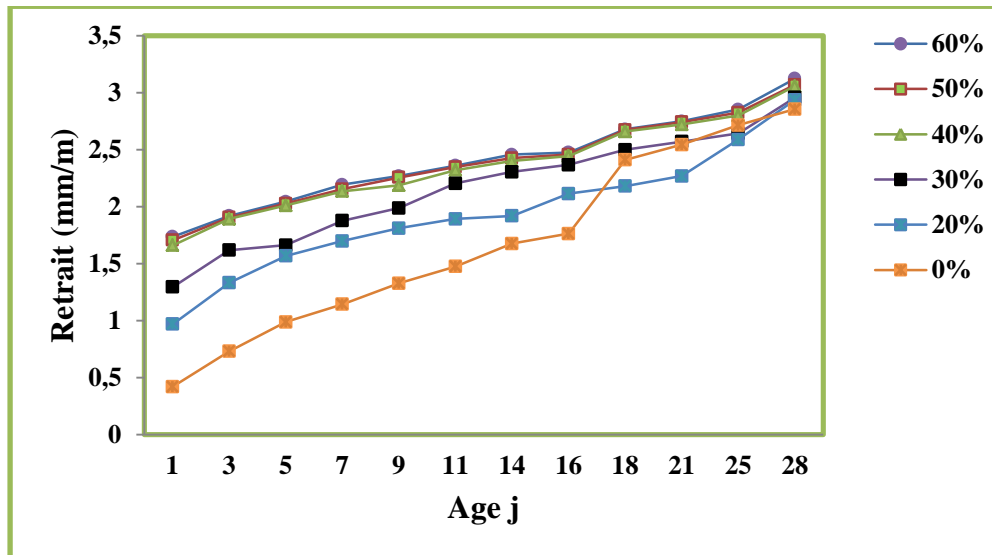


Figure III.16 Evolution du retrait du BCLL 3/8 en fonction de pourcentages de liège

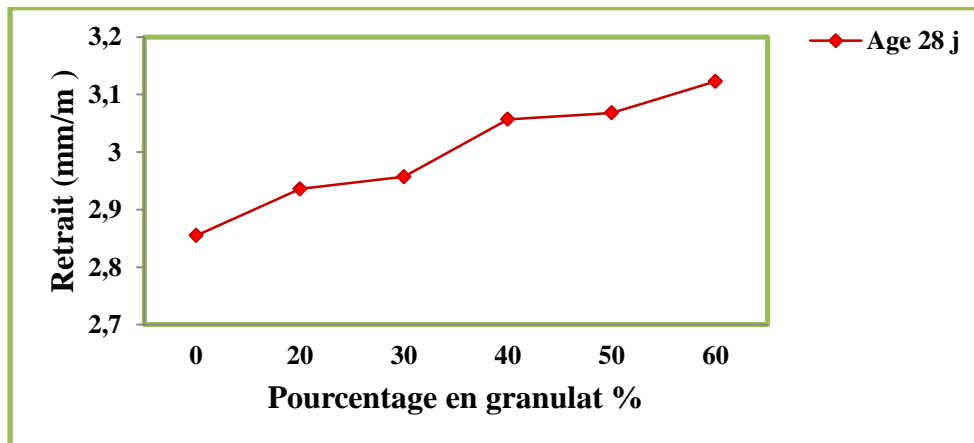


Figure III.17 Evolution du retrait du BCLL 3/8 en fonction de l'âge du béton

Tableau III.24 Evolution du retrait en fonction de l'âge 8/15

éch	Age de l'échantillon (mm/m)											
	01	03	05	07	09	11	14	16	18	21	25	28
0	0.420	0.731	0.987	1.143	1.327	1.475	1.675	1.762	2.410	2.543	2.715	2.855
20	1.271	1.570	1.907	1.924	1.955	1.987	2.017	2.056	2.092	2.110	2.133	2.865
30	1.324	1.623	1.967	2.034	2.050	2.100	2.143	2.185	2.211	2.226	2.241	2.888
40	1.397	1.688	1.976	2.075	2.115	2.141	2.162	2.204	2.231	2.320	2.362	2.920
50	1.665	1.870	2.030	2.093	2.119	2.158	2.186	2.211	2.243	2.339	2.367	2.941
60	1.677	1.876	2.040	2.110	2.164	2.176	2.195	2.222	2.257	2.357	2.390	3.001

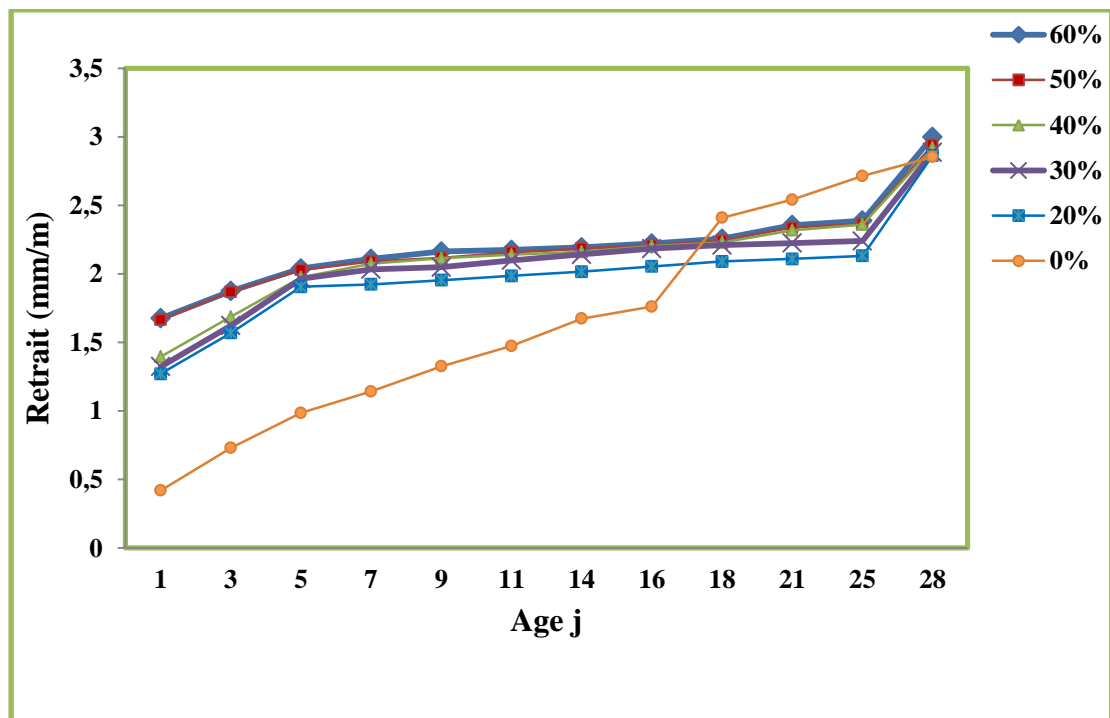


Figure III.18 Evolution du retrait du BCLL 8/15 en fonction de pourcentages de liège

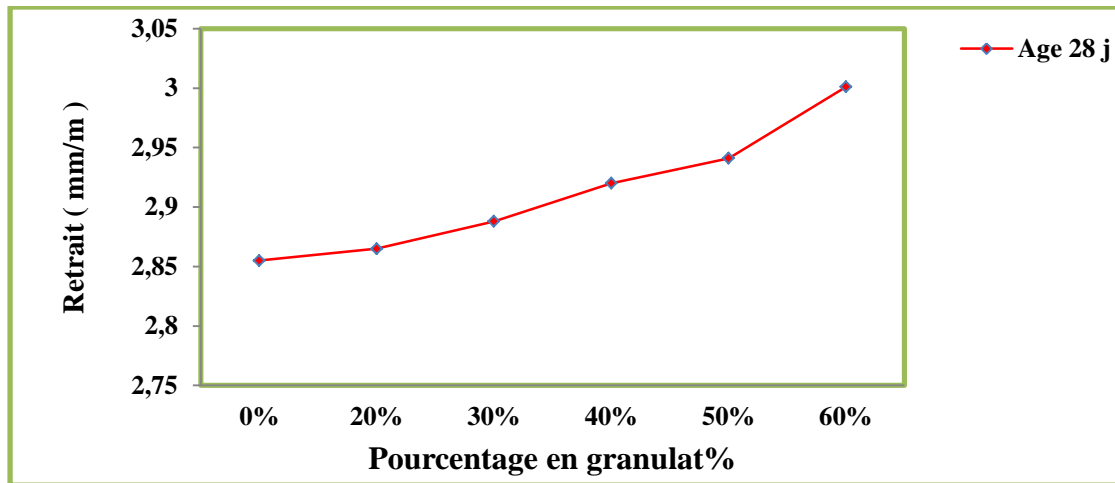


Figure III.19 Evolution du retrait du BCLL 8/15 en fonction de l'âge du béton

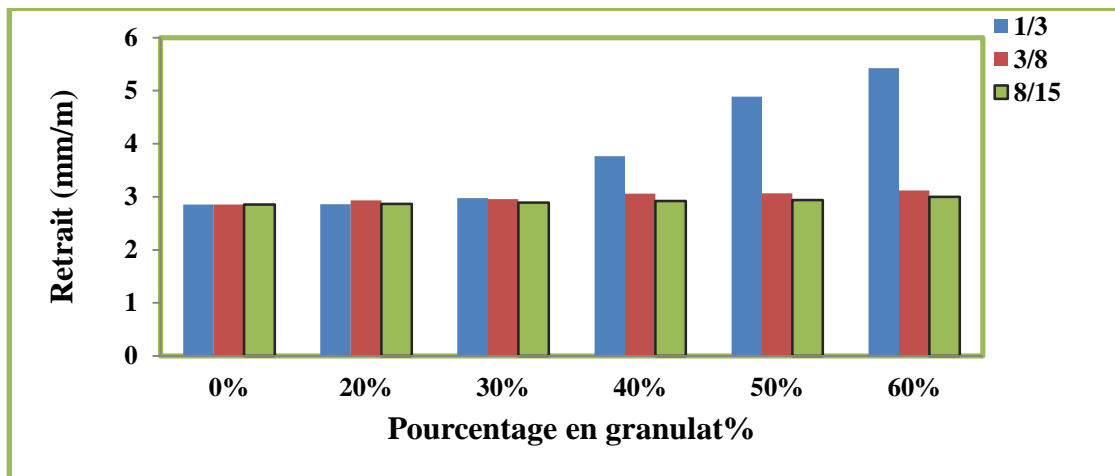


Figure III.20 Histogramme de comparaison du retrait du BCLL 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction de pourcentages de liège

D'après les valeurs du retrait et les courbe du retrait en fonction du dosage et selon la granulométrie pour les trois type de bétons élaborés on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le retrait augment en fonction de l'âge ceci est vrai pour tous les types de béton.
- le retrait est proportionnel avec la concentration du liège, c'est-à-dire que le retrait augmente lorsque le dosage en granulats de liège augmente. Ceci est pratiquement général pour tous les types de béton de granulats légers. Cela est expliqué par le faite que les granulats de liège par leur flexibilité facilitent le mouvement de retrait.
- La comparaison des trois bétons élaborés par granulats du liège expansé 1/3, 3/8 et 8/15. montre que le retrait est plus important pour les BCLL1/3 que pour lesBCLL3/8 ou encor les BCLL8/15

- L'effet de taille des granulats sur le retrait est que ce dernier est inversement proportionnel à la taille des granulats.

### III.4.2 Caractéristiques mécaniques

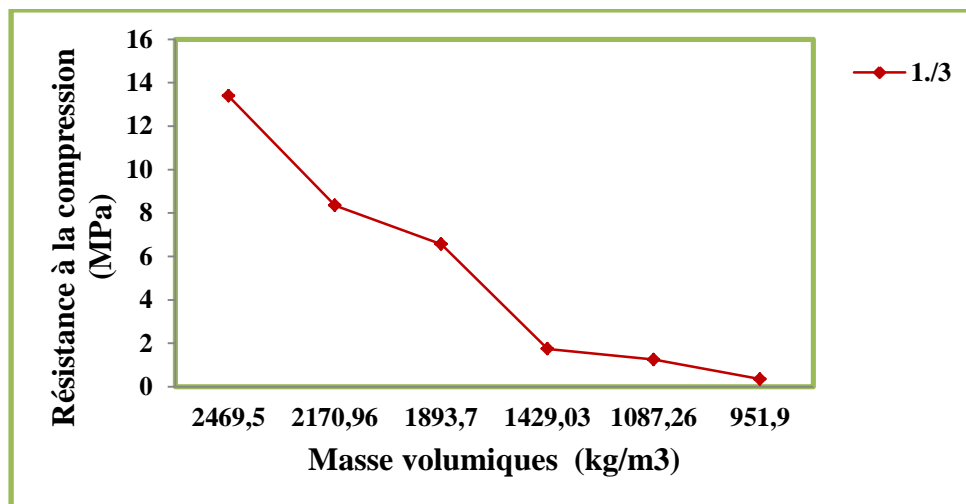
#### III.4.2.1 Résistance à la compression

Les mesures ont été effectuées sur les demi-éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm<sup>3</sup> issues de l'essai de flexion.

Les résultats des essais de compression sur les échantillons de BCLL en fonction des pourcentages du granulat pour les trois cas de granulométrie 1/3, 3/8 et 8/15 et pour environnement en salle sont résumés dans les tableaux III.25 et III.26 et III.27 et les variations de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique sont représentées dans les figures III.21 et III.22 et III.23

**Tableau III.25** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 1/3 en fonction du dosage en granulats

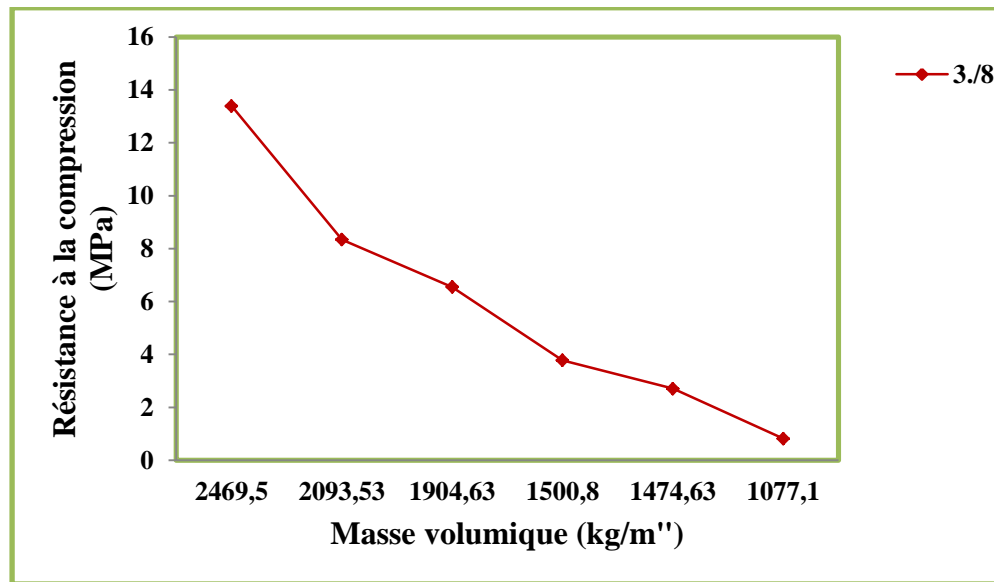
Série % liège	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance à la compression (MPa)			Rc(MPa)
		Age 28 jours			
		Rc <sub>1</sub> (MPa)	Rc <sub>2</sub> (MPa)	Rc <sub>3</sub> (MPa)	
0	2469.50	16.18	12.30	11.70	13.39
20	2170.96	9.73	7.75	7.56	8.35
30	1893.70	6.60	6.33	6.73	6.56
40	1429.03	1.39	1.57	2.28	1.74
50	1087.26	1.13	1.12	1.51	1.25
60	951.90	0.35	0.35	0.36	0.35



**Figure III.21** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 1/3 en fonction de la masse volumique

**Tableau III.26** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction du dosage en granulats

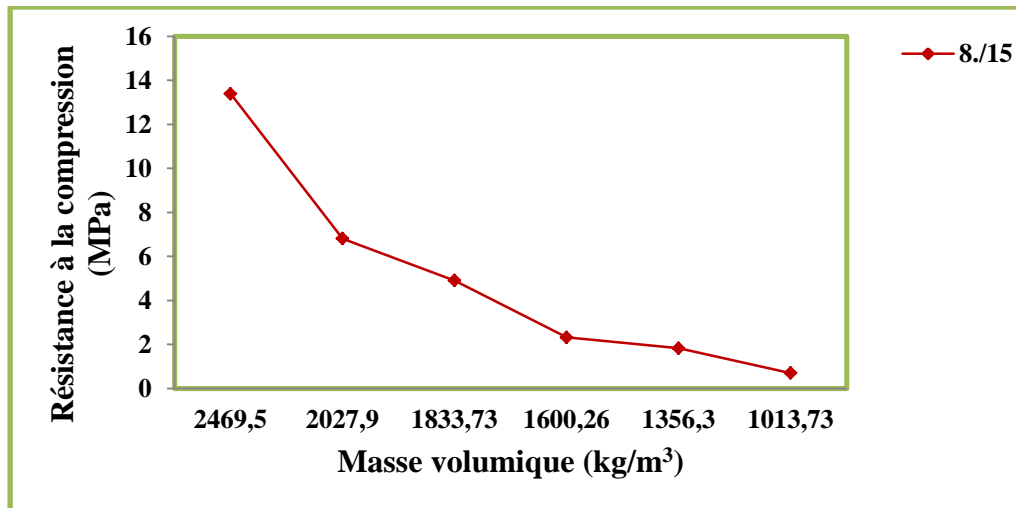
Série % liège	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Resistance à la compression (MPa)			Rc(MPa)
		Age 28 jours			
		Rc <sub>1</sub> (MPa)	Rc <sub>2</sub> (MPa)	Rc <sub>3</sub> (MPa)	
0	2469.50	16.18	12.30	11.70	13.39
20	2093.53	9.73	7.75	7.56	8.34
30	1904.63	6.60	6.33	6.73	6.55
40	1500.80	1.39	7.69	2.28	3.78
50	1474.63	1.13	5.49	1.51	2.71
60	1077.10	0.35	1.76	0.36	0.82



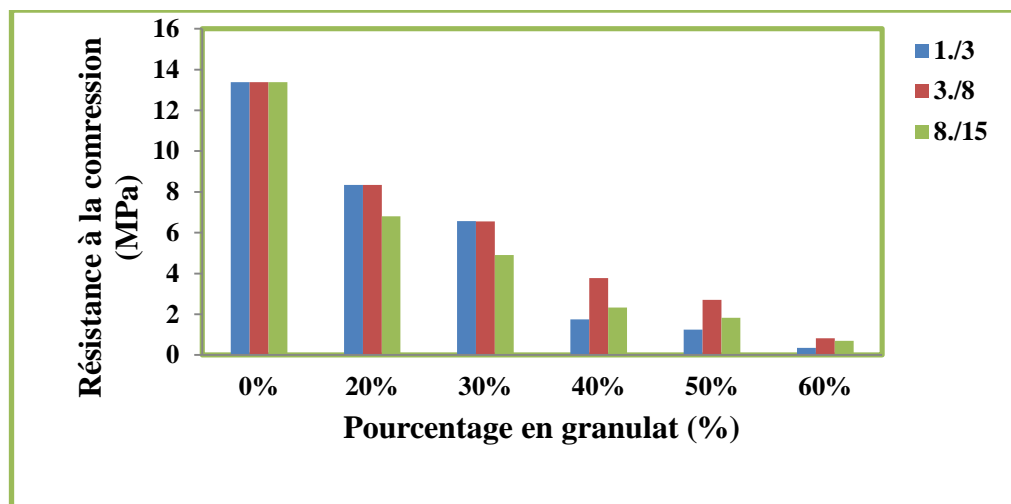
**Figure III.22** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction de la masse volumique

**Tableau III.27** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction du dosage en granulats

Série % liège	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Resistance à la compression (MPa)			Rc (MPa)
		Age 28 jours			
		Rc <sub>1</sub> (MPa)	Rc <sub>2</sub> (MPa)	Rc <sub>3</sub> (MPa)	
0	2469.50	16.18	12.30	11.70	13.39
20	2027.90	5.18	7.40	7.85	6.81
30	1833.73	5.19	4.61	4.91	4.90
40	1600.26	2.28	2.25	2.43	2.32
50	1356.30	1.96	1.90	1.64	1.83
60	1013.73	0.72	0.69	0.70	0.70



**Figure III.23** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction de la masse volumique



**Figure III.24** Histogramme de comparaison de la compression du BCLLE 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction de pourcentages de liège

D'après les valeurs de la résistance à la compression ainsi que les variations de cette dernière en fonction de la masse volumique on peut tirer les remarques suivantes.

- La résistance à la compression diminue lorsque la masse volumique diminue ceci est expliqué par le fait qu'on substitue une entité de matériau plus dense est plus résistante par une entité mole et moins résistante.
- La valeur maximale de la résistance à la compression est de **8.35MPa** et la valeur minimale est de **0.36MPa** qui est inférieur au seuil limites des bétons isolants
- L'histogramme de la figure III.24 montre que les BCLL1/3 affichent des résistances meilleurs que celles des BCLL3/8 et celles des BCLL8/15

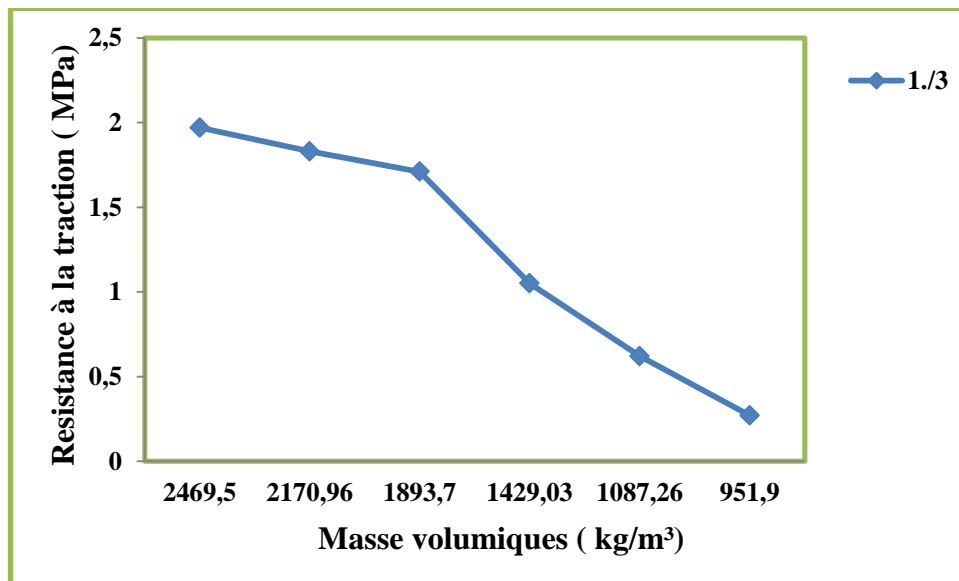
En résumé l'effet de taille sur la résistance à la compression des BCLL est en sorte que la résistance à la compression augment lorsque la taille des granulats diminue

### III.4.2.2 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion à trois points a été mesurée sur les éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm<sup>3</sup> pour chaque composition.

**Tableau III.28** Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 1/3 en fonction du dosage en granulats

Série % liège	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Resistance à la traction (MPa)			R <sub>t</sub> (MPa)
		Age 28 jours			
		R <sub>t1</sub> (MPa)	R <sub>t2</sub> (MPa)	R <sub>t3</sub> (MPa)	
0	2469.50	1.66	1.73	2.53	1.97
20	2170.96	1.96	2.19	1.67	1.83
30	1893.70	1.49	2.06	1.94	1.71
40	1429.03	0.85	1.28	1.03	1.05
50	1087.26	0.69	0.61	0.55	0.62
60	951.90	0.29	0.22	0.30	0.27

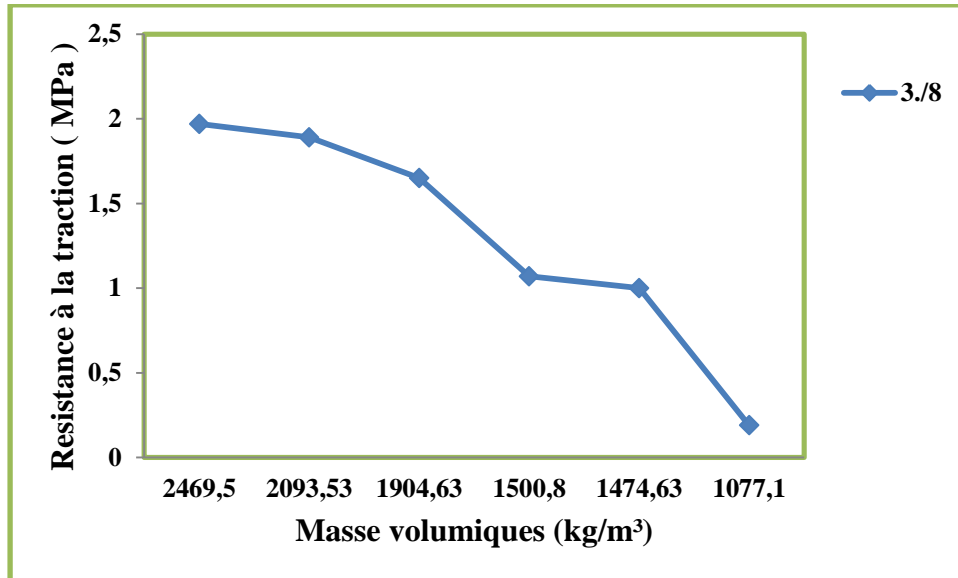


**Figure III.25** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 1/3 en fonction de la masse volumique

**Tableau III.29** Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction du dosage en granulats

Série %	Masse	Resistance à la traction	R <sub>t</sub> (MPa)
---------	-------	--------------------------	----------------------

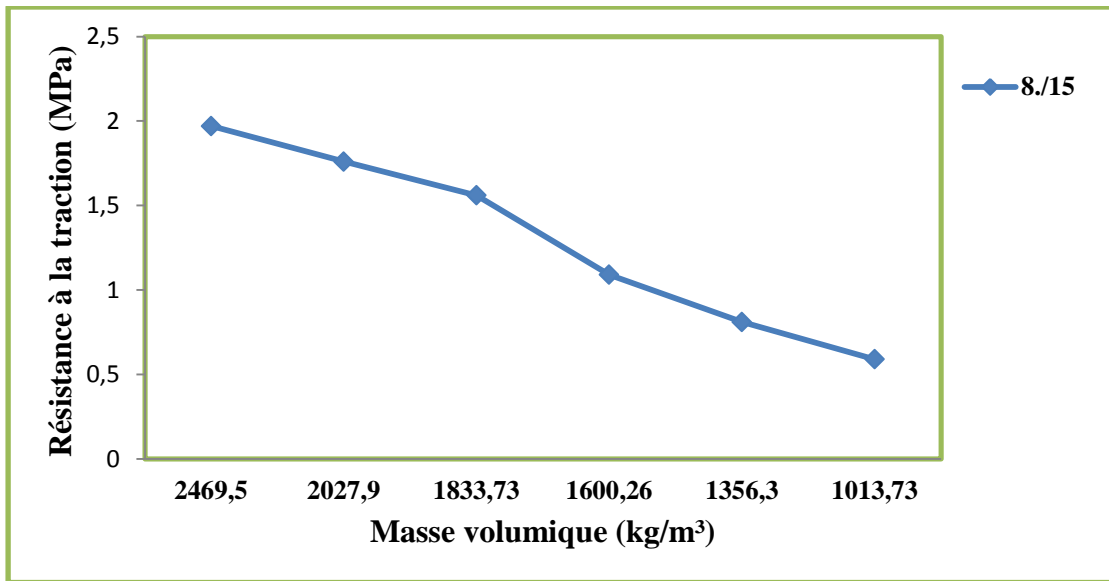
liège	volumique (kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)			
		Age 28 jours			
		Rt <sub>1</sub> (MPa)	Rt <sub>2</sub> (MPa)	Rt <sub>3</sub> (MPa)	
0	2469.50	1.66	1.73	2.53	1.97
20	2093.53	2.22	1.53	1.94	1.89
30	1904.63	1.67	1.80	1.48	1.65
40	1500.80	1.31	0.99	0.92	1.07
50	1474.63	0.95	1.20	0.87	1.00
60	1077.10	0.14	0.24	0.21	0.19



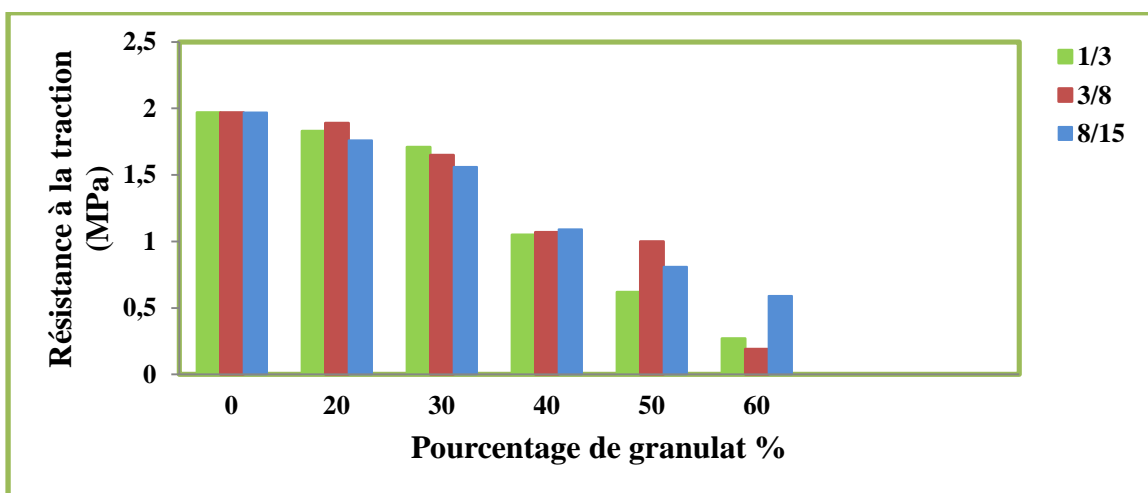
**Figure III.26** Variation de la résistance à la compression à 28 jours du BCLL 3/8 en fonction de la masse volumique

**Tableau III.30** Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction du dosage en granulats

Série % liège	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Resistance à la traction (MPa)			R <sub>t</sub> (MPa)
		Age 28 jours			
		Rt <sub>1</sub> (MPa)	Rt <sub>2</sub> (MPa)	Rt <sub>3</sub> (MPa)	
0	2469.50	1.66	1.73	2.53	1.97
20	2027.90	1.65	2.09	1.54	1.76
30	1833.73	1.68	1.60	1.42	1.56
40	1600.26	1.53	0.81	0.94	1.09
50	1356.30	1.29	0.17	0.95	0.81
60	1013.73	0.59	0.46	0.72	0.59



**Tableau III.27** Variation de la résistance à la traction à 28 jours du BCLL 8/15 en fonction de la masse volumique



**Figure III.28** Histogrammes de comparaisons du traction du BCLL 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction de parentages de liège

D'après les valeurs de la résistance à la flexion on peut conclure que :

- la résistance à la flexion évolue du dosage en granulats de la même manière que celle de la résistance à la compression lorsque Elle atteint une valeur maximale de **1.89MPa** pour le dosage de **20%** et diminue en fur et à mesure que le dosage en granulat augment et atteint une valeur minimale de **0.19MPa** pour le dosage maximum.
- La résistance à la flexion augment lorsque la taille des granulats augmente c'est-à-dire que les BCLL8/15 affiche les meilleurs résultats de résistance à la flexion. Ce phénomène est l'inverse de ce qui a été pour la résistance à la compression.

### III.4.3 Les caractéristiques thermiques

La conductivité thermique est une caractéristique la plus importante des bétons légers allégés par des granulats de liège expansé. Les compositions étudiées sont destinées à être utilisées comme des matériaux de construction isolant-porteurs ou isolants. Dont la tenue mécanique est assurée par la matrice constituée de bétons de sable calcaire et l'isolation par la faible conductivité thermique des granulats de liège expansé.

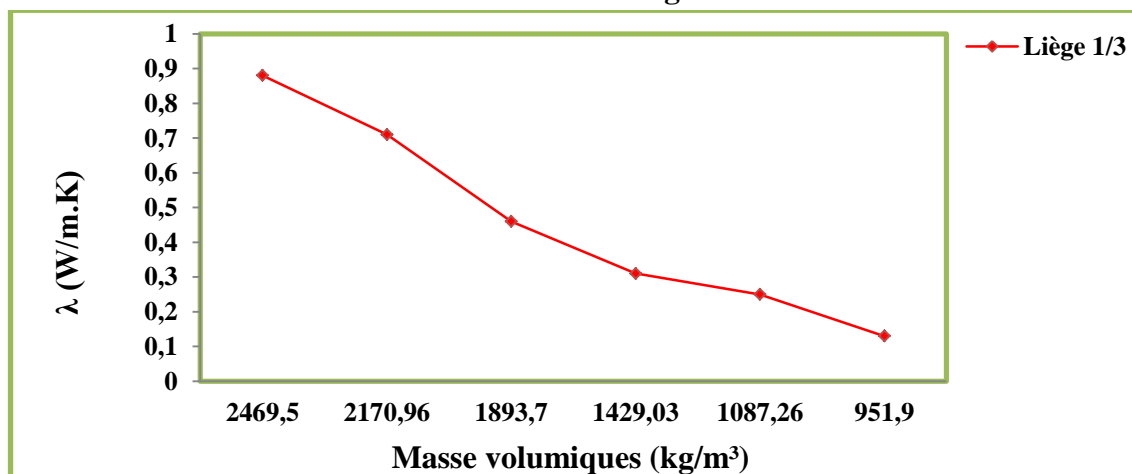
Les résultats de la mesure de la conductivité thermique ( $\lambda$ ) des bétons calcaires légers BCLL 1/3, BCLL 3/8 et BCLL 8/15 sont représentés dans les tableaux et les figures suivantes :

#### III.4.3.1 Conductivité thermiques

**Tableau III.31** Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 1/3.

Pourcentage en liège	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique W/m.K	Diffusivité (m <sup>2</sup> /s)	Capacité calorifique (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
0%	2469.5	0.888732158	0.888732158	0.774895695
20%	2170.96	0.710956308	0.779720077	1.904896536
30%	1893.7	0.463161167	0.667023216	0.798376614
40%	1429.03	0.314437719	0.580128675	0.47140446
50%	1087.26	0.252931205	0.448666888	0.563739405
60%	951.9	0.131822217	0.373225682	0.169063515

➤ **Variation de la conductivité en fonction du dosage.**



**Figure III.29** Variation de la conductivité thermique du BCLL 1/3 en fonction de la Densité

**Tableau III.32** Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 3/8.

Pourcentage en liège	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique	Diffusivité (m <sup>2</sup> /s)	Capacité calorifique
----------------------	--------------------------------------	------------------------	---------------------------------	----------------------

		W/m.K		(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
0%	2469.5	0.888732158	0.888732158	0.774895695
20%	2093.53	0.718453044	0.569789293	1.395984244
30%	1904.63	0.661066398	0.514656987	1.712839807
40%	1500.8	0.308451331	0.466928803	1.764968352
50%	1474.63	0.147442519	0.416452148	0.740664522
60%	1077.1	0.128755333	0.385947591	0.258766743

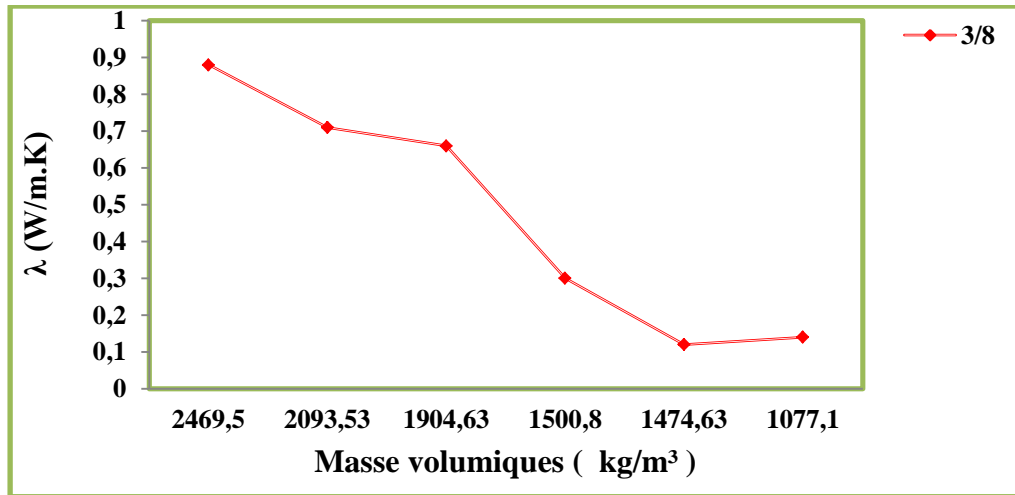


Figure III.30 Variation de la conductivité thermique du BCLL 3/8 en fonction de la densité

Tableau III.33 Conductivité thermique du béton de granulats du liège expansé 8/15.

Pourcentage en liège	Masse volumique (kg/m³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Diffusivité (m²/s)	Capacité calorifique (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
0%	2469.5	0.888732158	0.888732158	0.774895695
20%	2047.63	0.626660392	0.589370411	1.241819671
30%	1843.6	0.361431809	0.50463075	0.55343385
40%	1605.5	0.317905707	0.327332215	1.267537359
50%	1371.43	0.291053701	0.250805789	0.889169131
60%	1022	0.11401732	0.121083036	0.11748518

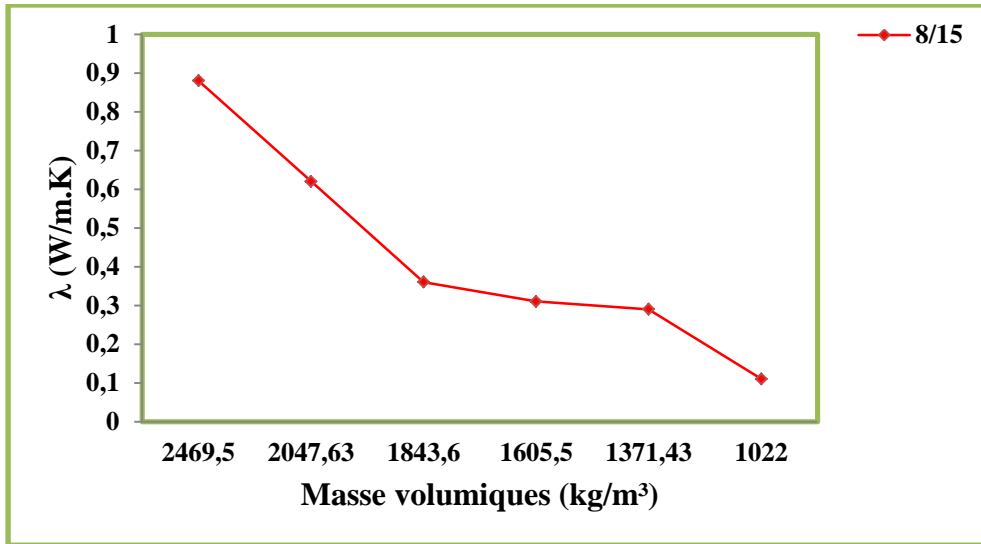


Figure III.31 Variation de la conductivité thermique du BCLL 8/15 en fonction de la densité

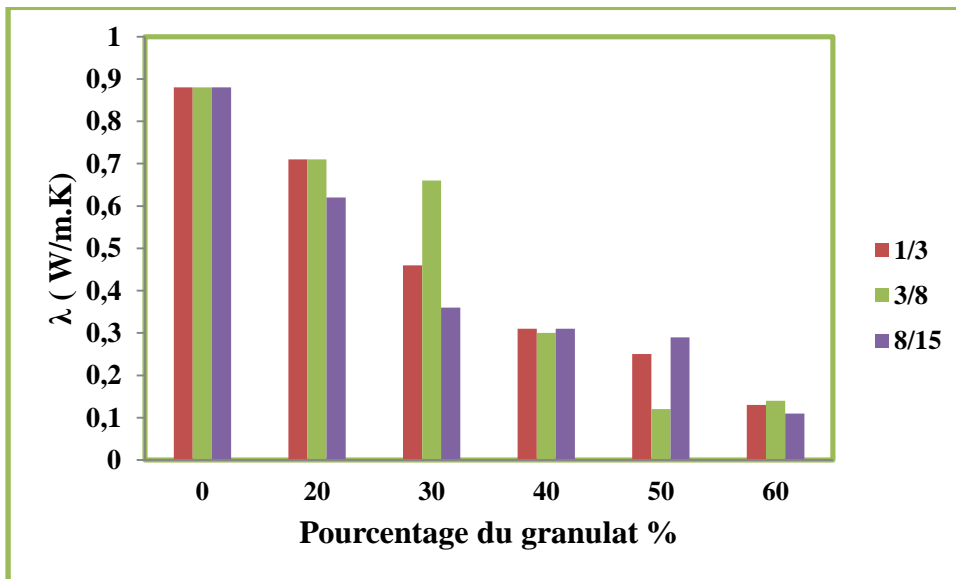
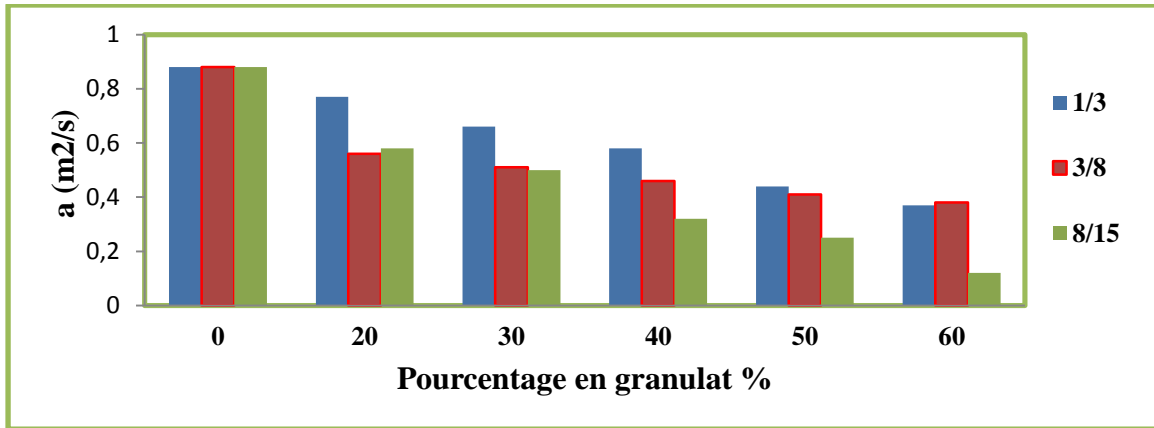


Figure III.32 Histogrammes de comparaisons de la conductivité thermique du BCLL 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction du pourcentage de liège



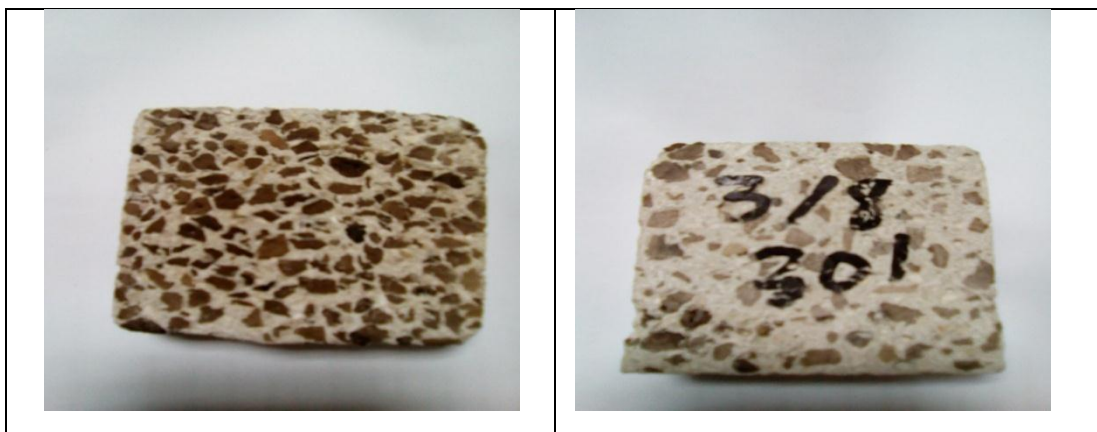
**Figure III.33** Histogrammes de comparaisons de la diffusivité du BCLL 1/3, 3/8 et 8/15 en fonction du pourcentage de liège

D'après les résultats obtenus on remarque que :

- La conductivité thermique du BCLL diminue lorsque la taille des granulats augmente. Elle atteint une valeur maximale de **0.71 W/m.K** pour le dosage de **20%** et diminue en fait et à mesure que le dosage en granulat augmente et atteint une valeur minimale de **0.11 W/m.K** pour le dosage maximum. Cela est dû au fait que plus la taille des granulats augmente et plus la porosité du matériau augmente et par conséquent sa conductivité thermique diminue
- la diffusivité du BCLL diminue lorsque la taille des granulats augmente pour la même raison que celle expliquée pour la conductivité.
- la capacité calorifique du BCLL augmente lorsque la taille des granulats diminue

### III.5 Aspect interne des bétons élaborés

Des coupes d'échantillons de différents dosages pour les bétons. Ont été photographiées et représentés dans la figure II.39 pour le BCLLE 1/3 et dans la figure II.40 3/8 et dans la figure II.41 8/15





**Figure III.34** Photos de coupes d'échantillons de BCLL 1/3. 3/8 et 8/15

Les photos montrent une assez bonne répartition des granulats dans la matrice ceci est le résultat du mode du malaxage et de la mise en moule adoptés.

## CONCLUSION

La production du béton léger à base de déchets de la carrière des granulats concassés et les déchets issus de la fabrication des panneaux de liège expansé joue un rôle très important dans la protection de l'environnement. et permet aussi de réaliser des gains d'énergie considérables à cause de faible conductivité thermique de liège expansé.

L'objectif de ce travail consiste à étudier le comportement mécanique et physique des bétons légers confectionnés à partir de sable de concassage et allégés avec les trois fractions de liège expansé granulats 1/3, 3/8 et 8/15.

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

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

Les gammes de masse volumique dans lesquelles varient ces bétons de liège sont : **2170.96 à 951.9 kg/m<sup>3</sup>** pour le BL 1/3. **2047.63 à 1022 kg/m<sup>3</sup>** pour le BL 8/15 et de **2093.53 à 1077.10 kg/m<sup>3</sup>** pour le **BL 3/8**.

- Par sa Porosité importante le béton allégé avec les granulats de liège expansé 8/15 est le plus léger.
- Les résistances mécaniques est inversement proportionnelle à l'augmentation du pourcentage de liège
- Le béton léger à base de granulats de liège expansé 1/3 est plus résistant que ceux à base de granulats 3/8 et. 8/15
- L'allègement du béton calcaire par l'ajout de liège expansé diminue considérablement la conductivité thermique c'est-à-dire améliore l'isolation thermique
- Pour le béton BCLL 8/15. BCLL 1/3 et BCLL 3/8 la conductivité thermique pour le dosage maximum en granulats est **0.79. 0.76 et 0.75 W/m.k** respectivement qui représente le **1/3** et **1/4** de celle du béton témoin. Celle d'un béton ordinaire est d'environ **1.44 W/m<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>**. donc l'allègement du liège permet de diminuer de presque **69 %** et **75 %** la conductivité thermique par rapport un béton normal.
- La conductivité thermique du béton élaboré est proportionnelle avec la masse volumique apparente.

En perspectives nous proposons d'étudier les axes suivants :

- La durabilité des bétons à base de granulats de liège en particulier la résistance au feu.
- L'étude du transfert hydrique dans les bétons de granulats de liège
- La modélisation des comportements mécaniques et thermiques

## Références bibliographiques

---

- **A.C.I. Commitee 213** « Guide for structural light-weight aggregate concrete : Guide pour le béton de structure à base de granulats légers. Traduction du CATED. Edité par la société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics », 1970.
- **Adam.M.Neville**, propriétés des bétons, traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris, 2000.p 470
- **Alrim. K , Cheikh –Kassem. N AL , Queneudec. M, EDecamps. E .A.** ,construire en matériaux locaux :tradition et modernité de l’habitat,approches culturelles,réalités économique, colloque franco–maghrebin,Marseille Oct 91.
- **Aziz,M.A., MURPHY, C.K. and RAMASWAMY , S.D.**, « Lightweight concrete using cork granules.». International Journal of Lightweight Concrete , I(1), 1979, pp 29-33
- **Abderrahman El Bakkouri, Hassan Ezbakhe, Taïb Ajzoul, Abdelmajid El Bouardi**, « ETUDE THERMOMECHANIQUE DU BETON ALLEGE AVEC DU LIEGE ET DU BETON ALLEGE AVEC DES GRIGNONS D’OLIVE ». 12èmes Journées Internationales de Thermique, pp 307-310,Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- **Amen-Chen C., Pakdel H., Roy C.**, « Production of monomeric phenols by thermochemical conversion of biomass: a review», Bioresource Technology, 79, 277–299, (2001).
- Abdelkarim. B. O. U. N. O. U. A. (2012)**. SUBSTITUTION DU SABLE ALLUVIONNAIRE PAR DU SABLE CALCAIRE DE CONCASSAGE DANS LES MORTIERS-CARACTÉRISATION PHYSICO-MÉCANIQUE ET DURABILITÉ (Doctoral dissertation. Université Amar Telidji de Laghouat).
- Arnould, M., Virlogeux, M.** Granulats et bétons légers ; Bilan de 10 ans de recherche ; Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris (1986).
- **Bederina. M** , « Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables a base de déchets de bois ». Thèse de doctorat, ENP 2007.
- **Baptista A.P.M., Vaz M.D.C.**, «Comparative wear testing of flooring materials» Wear, 162-164, pp: 990–995, (1993).
- **Benabed B, Kadri EH, Azzouz L, Kenai S.** Properties of self-compacting mortar made with various types of sand, Cement and Concrete Composites, 2012; V 34, pp:1167–1173.
- **Benachour A.** « Etude des caractéristiques physico- mécaniques des bétons à granulats pouzzolaniques » Mémoire de magister, Université d'Oran, Algérie 2002
- **Benamirouche S., Chouial M.**, « Cartographie et description des peuplements portegraines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien) », Station régionale de recherche forestière de Jijel Oued kissir El Aouana- Jijel – Algérie Tél/fax (213) 34 51 32

## Références bibliographiques

---

- **Bonavetti VL, Irassar EF.** The effect of stone dust content in sand. *Cement and Concrete Composites*, 1994; V 24, pp: 580-590.
- **Bonavetti VL, Rahhal V, Viviana F, Irassar EF.** Studies on the carboaluminate formation in limestone filler blended cements. *Cement and Concrete Research*, 2001; V 31, pp: 853-859.
- **Borges M., Cunha C.,** «Boletim da Junta Nacional de Cortiça», 565, 678–679, (1985).
- **Boudaoud, N.** Potentialités d'utilisation du nez électronique à spectromètre de masse pour la caractérisation de la fraction volatile du liège oenologique ; thèse de doctorat, l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon (2006).
- **Béton armé : Règles BAEL, Bétons de granulats légers artificiels, par Jean PERCHAT.**
- Bouguerra,** Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux: comportement hygrothermiques des matériaux élaborés, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1997.
- **Corman. P,** Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, Paris, 1961.
- **Chi C, Wu Y, Riefler C.** The use of crushed dust production of self consolidating concrete (SCC), *Recycling Concrete and other materials for sustainable development.ACI*, 2004; V 219, pp: 115-130.
- **Chloup-Bondant M.** Etude des mécanismes réactionnels dans l'hydratation des silicates et aluminates tricalciques en présence d'un filler calcaire. Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincare, Nancy I, 1996; 156p.
- **Christian B.,** 'Shoe sole', EP1314370, European Patent Office, Munich, (2003).
- **Cordeiro, N., Belgacem, M.N. Silvestre, A.J.D., Pascoal Neto, C. et Gandini, A.** Cork suberin as a new source of chemicals: 1. Isolation and chemical characterization of its composition; *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 22(2), pp. 71- 801 (1998).
- **Denisselle A., Doubrovsky G.,** «Material in the form of a plate capable of forming a heat-insulating barrier, fire-protection wall including this material, and casing including such a wall», FR2672961, Institut National de la Propriete Industrielle, Paris, (1992).
- **Diaz-Parralejo A., Diaz-Diez M. A., Macias-Garcia A., Rosa- Blanco P., Serrano V. G.,** «Bending strength of black and composite agglomerates of cork», *Materials Letters*, 57, 4004–4008, (2003).
- **Donza H, Gonzalez M, Cabrera O.** Influence of fine aggregate mineralogy on mechanical properties in high strength concrete. Second international conference on high performance concrete, Gramado (Brazil), 1999; pp:4-6.
- **Dreux.G et Festa.J** «Nouveau guide du béton et ses constitutions » huitième édition, Paris,1998 troisième tirage 2007.pp364-346-131-132-332 à 343-162
- **dupain. R, Lanchon. R, Saint Arroman. J.C,** *Granulats, sols, ciments et bétons*, édition Casteilla, Paris, 1995.

## Références bibliographiques

---

- **De Gennar R, Cappelletti P., Cerri G., De'Gennaro M., Dondi M., Langella A.**, Napolitan Yellow Tuff as raw material for lightweight aggregates in lightweight structural concrete production, *Applied Clay science*, 28, P309-319,2005.
- **Demirdag S., Gunduz L.**, Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units, *Constriction and Building Materials*, 2006.
- **Documents de l'usine de la fabrication de Liège Aggloméré Noir Expansé Pur et Bandes d'étanchéité, Jijel.**
- **Document technique réglementaire , (D.T.R C 3-2), Alger 1997**
- **Eires. R, Camões. A & Jalali. S**, « Eco-friendly construction materials using gypsum and industrial wastes.». Rotterdam, Netherlands.2008
- **Eires. R, Nunes. J. P, Fangueiro R, Jalali. S, Camões. A**, « NEW ECO-FRIENDLY HYBRID COMPOSITE MATERIALS FOR CIVIL CONSTRUCTION.». ».
- **Esping O.** Effect of limestone filler BET(H<sub>2</sub>O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 2008; V 38, pp:938-944.
- **Estellé P, Lanos C, Perrot A.** Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2008; V 154, pp:31-38.
- **Fernando G. Branco, António Tadeu, Maria de Lurdes Belgas C. Reis** « CAN CORK BE USED AS A CONCRETE AGGREGATE? ». *International Journal for Housing Sciences*, Vol. 31, N.1, 2007, pp.1-11.
- **Fernando G. Branco, António Tadeu, Maria de Lurdes Belgas C. Reis**, «EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE DURABILITY OF CORK CONCRETE.»
- **Ferreira E., Pereira H.**, «Cortiça», 576, 274–279, (1986).
- **Fiche “Béton – Mortier – Granulats” NBN EN 12350-6** Essais Pour Béton Frais Partie 6: Masse Volumique
- **Fortes M.A., Nogueira M.T.**, «The Poisson effect in cork», *Materials Science and Engineering A* 122: 227-232, (1989). <http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093>.
- **Fernando G. Branco, António Tadeu, Maria de Lurdes Belgas C. Reis** « CAN CORK BE USED AS A CONCRETE AGGREGATE? ». *International Journal for Housing Sciences*, Vol. 31, N.1, 2007, pp.1-11. K Dhir,Thomas D Dyer,Judith E Halliday.Printed par Thomas Telford.pp 253-262.
- **Gesoglu M.,Ozturan T., Guneyisie.**, Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates, *Construction and Building Materials*, 2006.

## Références bibliographiques

---

- Gustafsson. S.E.**, Transient plane source technique for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials, Review Scientific Instruments, Vol 62, n°3pp797-804,1991.
- **Gotteicha Messaouda**, « Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités », Mémoire de Magister 2005 ,U.A.T Laghouat.
- **Gil L., Moiteiro C.**, « Cork », In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology, 6th ed.; Wiley-VCH: Verlag, Germany, (2003).
- **Gibson L. J., Ashby M. F.** «Cellular solids: structure and properties», 2nd edn, 453–467, Cambridge, Cambridge University Press, (1997).
- **Gibson L.J., Easterling K. E., Ashby M. F.**, «The structure and mechanics of cork». Proceeding of the Royal Society of London A, 377: 99-117, (1981).
- **Gil L.**, « Cortiça: produção, tecnologia e aplicação », Lisbon, INETI, (1998).
- **Gil L.**, «Cork powder waste: An overview». Biomass and Bioenergy, 13: 59-61, (1997).
- **Goual. M. S.**, Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux .Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Caractérisation et comportement thermo hydrique, Thèse de doctorat d'état de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 2001.
- **Hernandez-Olivares,F.Bollati,M.R,Del RIO, M.and PERGA-LANDA B.**, « Development cork-gypsum composites for building applications, Construction & Building Materials »,13,1999, pp 179-186.
- **Hiroaki A.**, «Gasket material layer including cork, fibers, rubber, and a rubber chemical», US5615897, United States Department of Commerce: Patent and Trademark Office, Arlington, VA, (1997).
- Jo B. W., Park S.K., Park J.B.**, Properties of concrete made with alkali- activated fly ash lightweight aggregate (AFLA), Cement composites, 2006.
- **Karade. S R, Caldiera. F , Irle M, Maher. K (2002)**, « Cork granules as lightweight aggregate ». Sustainable concrete construction: proceedings of the international conference. University of Dundee, Scotland, UK, September 2002. Edited by : Ravindra K Dhir,Thomas D Dyer,Judith E Halliday.Printed par Thomas Telford.pp 253-262.
- **Kedjour. N.E**, propriétés et pathologie du béton, réimpression 1993
- **Kenai S, Benna Y, Menadi B.** The effect of fines in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete. Proceedings of the International Conference on Infrastructure regeneration and rehabilitation, Sheffield. 1999; pp:253-261.

## Références bibliographiques

---

- Laukaitis A., Zurauskas R., Keriene J.**, The effect of foam polystyrene granules on Cement composites properties, *Cement and Concrete composites*, 27, P41-47,2005.
- **Ledhem. A.**, « Construction à l'étude d'un béton de bois, mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois », Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, 1997.
  - **Laurent. J.P.** : Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires, thèse de doctorat de L'INP.Grenoble, 1986.
  - **Le Chêne liège par Josiane Ubaud**, (S.H.H.N.H.)La Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault <http://www.shhnh.com>.
  - **Lopes, M.H., Barros, A.S, PASCoal Neto, C., Rutledge, D., Delgadillo, I. et Gil, A.M.** Variability of cork from portugese *Quercus suber* studied by solid-state; <sup>13</sup>C-NMR and FTIR spectroscopies. *Biopolymers (biospectroscopy)*, Vol. 62, pp. 268- 277, (2001).
  - **Merabti Salem**, 'Matériaux composites isolants à base des déchets de liège', Mémoire de Magister 2005 , université de Blida
  - **Molinias M., Verdaguer D.** «Lignotuber ontogeny in the cork-oak». II. Germination and young seedling. *American Journal of Botany*, 80: 182-191, (1993).  
*Materials, Bull. Eng. Geol. Environ.*, Vol. 67, pp. 513- 519, (2008).
  - **Miled K., Le Roy R., Sab K., Boulay C.**, Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete : size effects and failure mode, *Mechanics of Materials*, 36, P1031-1046, 2004.
  - **Nanthagopalan P, Santhanam M**, Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 2009; V 23, pp:3443-3449.
  - **Pereira H.**, « Cork oak and Cork ». European Conference. Centro de Estudos Florestais, Lisboa, 2(XI), 46–50, (1998).
  - **Pereira H.**, «Density and moisture relations. Dans: Cork». 1ère Ed., Elsevier Science B.V., Amsterdam. 187-205, (2007e).
  - **Pereira H.**, «The thermochemical degradation of cork», *Wood Science and Technology* 26: 259-269, (1992). <http://dx.doi.org/10.1007/BF00200161>.
  - **Pereira H., Ferreira E.** «Scanning electron microscopy observations of insulation cork agglomerates», *Materials Science Engineering*, A111, 217–225, (1989).
  - **Pereira H., Graca J., Baptista C.**, «The effect of growth rate on the structure and compressive properties of cork». *IAWA Bull.*, 13(4), 389–396, (1992).
  - **Persoz B.** Introduction à l'étude de la rhéologie. Paris, Dunod, 1960; 271p.

## Références bibliographiques

---

- **Pinto R., Melo B.**, «Cork: properties, capabilities and applications» Boletim da Junta Nacional de Cortiça, 602: 322-328, (1988).
- **Ramirez JL, Barcena JM, Urreta JJ.** Proposal for limitation and control of fines in calcareous sands based upon their influences in some concrete properties, Materials and Structures, 1990; V 23, pp:277-288.
- **Relvas M.C.**, «Cork boiling system consists of controlled water feed not impairing the physical and organoleptic properties of the product», PT102334, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, Lisbon, (2002).
- **Riboulet, J.M., Alegoet, C.** Aspects pratiques du bouchage des vins ; Collection avenir oenologie, (1986).
- **Rilem :** Commission des bétons légers, Terminologie et définition. Matériaux et construction, N°13, 1970.
- **Rocha, S., Goodfellow, B.J, Neto, C.P., Gill, A.** Enzymatic isolation and structural characterization of polymeric suberin of cork from Quercus suber; International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 28, pp. 107- 119, (2001).
- **Romano A., Martins-Loução M.A.**, «In vitro cold storage of cork oak shoot cultures». Plant Cell Tissue Organ Cult, 59:155–157, (1999).
- **Rosa M.E., Fortes M.A.** «Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork». Journal of Materials Science; 23(3):879–85, (1988).
- **Rosa M.E., Fortes M.A., Nunez R.V.**, Proc. 1st International Materials Symposium, Advanced Materials Forum I, April 2001, Coimbra, Portugal, Key Engineering Materials, 230–232, 295–299, (2002).
- **Rosa M.E., Pereira H, Fortes M.A.** «Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork». Wood and Fiber Science; 22(2):149–64; (1990).
- **Rosa ME., Fortes MA.**, «Deformation and fracture of cork in tension ». Journal of Materials Science; 26(2):341–8, (1991).
- **Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N.** Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete; Ed. CANMET, Ottawa, Canada (1998).
- **Steiger. R. W, Hurd. M.K**, Lightweight insulating concrete for floors and roof decks, The Aberdeen Group Michigan 1978.
- **Shink. M**, « Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des Bétons de granulats légers », Thèse de doctorat de l'université de Laval Avril 2003.
- **Silva S.P., Sabino M.A., Fernandes E.M., Correlo V. M., Boesel L.F., Reis R.L.** «Cork: Properties, capabilities and applications». International Materials Reviews, 50: 345-365, (2005).

## Références bibliographiques

---

- **Simon Amboise , Aurélie Peyrichou**, « Concours génération développement durable Comment économiser l'énergie à la maison ? Technique d'isolation par liège et tapisserie. ». Mars 2007.
- **Saradhi Babu D ,Ganesh Babu K, Wee T.H**, Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash , cement and concrete Research,35,P1218-1223,2005.
- Shink, M.** Compatibilité, élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers ; thèse de doctorat (Ph.D.), Université Laval Québec (2003).
- **Tadeu A., Santos P.**, «Assessing the effect of a barrier between two rooms subjected to low frequency sound using the boundary element method», Applied Acoustics, 64, 287–310, (2003).
- **Takayuki M., Nobuhiro T., Akio K., Minoru S.**, «Water pressure resisting sound insulator», JP9198050, Japan Patent Office, Tokyo, (1997).
- **Tsivilis S, Chaniotakis E, Kakali G, Batis G.** An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete. Cement and Concrete Composites, 2002; V 24, pp: 371-378.
- **Teo D.C .L,Mannan M A , Kurian V.J ,Ganapathy C**, lightweight Concrete made from oil palm shell(POS) : structural bond and durability Properties ,Building and Environment,2006
- Teychenne. D.C** « Lightweight aggregates: their properties and use in concrete in the United Kingdom ». (Les granulats légers : leurs propriétés et leurs utilisations à la fabrication du béton dans le Royaume Uni.) Congrès I.C.L.C Londres Session mai1968.
- **Unal O,Uygunoglu T ,Yildiz A ,Yildiz A**, Investigation of Properties of lowstrength lightweight Concrete for thermal insulation , Building and Environment 42,P584-590,2007.
- **Wang H.Y,Tsai K.C**, Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt ,cement and concrete composites ,28,P481-485,2006.
- **Wasserman R ,Bentur A** , Interfacial interaction in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength ,Cement and Concrete Compsites ,18,P67-76,1996.
- Yasar, E., Erdogan, Y.E.** Strength and thermal conductivity in lightweight building Materials, Bull. Eng. Geol. Environ., Vol. 67, pp. 513- 519, (2008).
- **Yamasaki. J, Nimura. S, Naka. I.Jima**, developpment of special light weight concrete.
- **Ye G, Liu X, De Schutter G, Poppe AM, Taerwe L.** Influence of Limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. Cement and Concrete Composites, 2007; V 29, pp:94-102.

## Références bibliographiques

---

- **Zhu W, Gibbs JC.** Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. Cement and concrete research, 2005; V 35, pp: 1457-1462.
- **Ziregue Ahmed**, « Valorisation de coproduits industriels : influence de différents facteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment », **Magister,2005**, Université Amar Telidji, Laghouat.
  - **Zhang M. H , Gjorv O.E** , Mechanical properties of high-strength lightweight concrete , ACI Materials Journal ,88,P240-247,1991.
- **NORME AFNOR**
  - \* **NF P 15-433** Méthodes d'essais des ciments, détermination du retrait et du gonflement. février 1994.
  - \* **NF EN 12390-3** Février 2003. Essai pour béton durci, Partie3: Résistance à la compression des éprouvettes
  - \* **NF P 10-502** , « Béton -capillaire », Paris 1989.
  - \* **NF P 18 – 305**, Béton prêt à l'emploi. Décembre 94
  - \* **NF P 18 -303** Norme française de l'eau de gâchage pour béton.
  - \* **NF P 18- 560, (Sept. 1990)** : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage
  - \* **NF P 18 -598, (Oct. 1991)** : Granulats – Equivalent de sable.
  - \* **NF P 18-451**, Essai d'affaissement. Décembre 81.
  - \***NF EN 12390-5**, Essai pour béton durci Partie5: Résistance à la flexion sur éprouvettes Octobre 2001.
  - \***NF EN 12390-7**, Essai pour béton durci Partie7: Masse volumique du béton. Septembre 2001
  - \***NF P 18-555 (decembre1990)** :mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau
  - \***NF P.18-400**- Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, Décembre 81  
26: 259-269, (1992). <http://dx.doi.org/10.1007/BF00200161>.
  - \* **NF P15-301**, Ciment courant : Composition, spécification, et critère de conformité, AFNOR, Paris, 1994 ; 25p.
  - \* **NF EN 206-1** : BETON, Partie 1: Spécification, performances, production et conformité.
  - \* **NF EN 13055-1** ;Granulats légers, Partie1: Granulats légers pour bétons et mortiers,2002.
  - \* **EN 196-3**, Méthodes d'essais des ciments-partie 3 prise du ciment.
  - \* **EN 196-6** , Méthodes d'essais des ciments-partie 6 détermination de la finesse.
  - \* **EN 1008** : Norme européenne de l'eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

## Références bibliographiques

---

\* **EN 196-1**, Méthodes d'essais des ciments-partie 1, détermination des résistances mécaniques

*Annexes*

## Annexes

### Résultats par échantillon de la masse volumique

**Tableau III.1** Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège expansé

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 0

environnement :air

Pourcentage de liège : 0%

date de confection : 26/04/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	2540.0	2597.3	2610.1	2582.46	1.851	1.893	1.902	1.882
3	2531.6	2584.1	2595.3	2570.33	1.845	1.883	1.891	1.873
5	2527.9	2563.2	2583.5	2558.2	1.842	1.868	1.883	1.864
7	2515.1	2556.7	2571.1	2547.63	1.833	1.863	1.873	1.856
9	2503.3	2549.9	2566.8	2540.00	1.824	1.858	1.807	1.829
11	2495.2	2536.5	2553.5	2528.4	1.818	1.848	1.861	1.842
14	2480.5	2529.0	2545.5	2518.3	1.807	1.843	1.855	1.835
16	2476.0	2511.0	2524.3	2503.7	1.805	1.830	1.839	1.824
18	2461.5	2504.9	2519.2	2495.2	1.794	1.825	1.836	1.818
21	2456.2	2497.2	2510.5	2487.9	1.790	1.820	1.829	1.813
25	2443.2	2481.3	2505.9	2476.8	1.780	1.808	1.826	1.804
28	2437.8	2477.7	2493.1	2469.5	1.776	1.805	1.817	1.799

**Tableau III.2** Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège expansé l'échantillon 1/3

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 1/3

environnement :air

Pourcentage de liège : 20 %

date de confection : 27/03/20

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	2334.0	2367.5	2335.5	2345.66	1.701	1.725	1.702	1.709
3	2291.2	2286.5	2321.5	2299.74	1.669	1.666	1.692	1.675
5	2283.3	2255.7	2293.6	2277.53	1.664	1.644	1.671	1.659
7	2274.2	2247.6	2233.7	2251.83	1.656	1.638	1.628	1.640
9	2243.1	2240.8	2232.1	2238.66	1.635	1.633	1.626	1.631
11	2242.4	2227.3	2220.7	2230.13	1.634	1.623	1.618	1.625
14	2234.9	2218.8	2215.0	2222.9	1.628	1.617	1.614	1.619
16	2214.9	2203.1	2211.6	2209.86	1.614	1.605	1.611	1.160
18	2179.7	2194.5	2204.9	2191.3	1.588	1.599	1.607	1.598
21	2177.0	2182.1	2201.0	2186.7	1.586	1.590	1.604	1.593
25	2173.2	2170.5	2198.6	2180.76	1.584	1.582	1.602	1.589
28	2169.0	2165.4	2178.5	2170.96	1.581	1.578	1.587	1.582

## Annexes

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 1/3

environnement : air

Pourcentage de liège : 30 %

date de confection : 29/03/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	2023.8	2006.8	1995.0	2008.53	1.475	1.462	1.451	1.462
3	1979.8	1983.9	1975.0	1979.56	1.443	1.445	1.439	1.442
5	1964.0	1977.6	1969.4	1970.33	1.431	1.441	1.435	1.435
7	1961.0	1969.1	1953.2	1961.1	1.429	1.435	1.423	1.429
9	1957.4	1954.4	1949.3	1953.7	1.426	1.424	1.421	1.424
11	1951.1	1932.9	1945.0	1943	1.422	1.408	1.417	1.415
14	1943.5	1930.5	1940.5	1938.16	1.416	1.407	1.414	1.412
16	1935.8	1928.2	1934.5	1932.83	1.410	1.405	1.410	1.408
18	1933.5	1923.0	1928.1	1928.2	1.409	1.401	1.405	1.405
21	1921.0	1899.5	1917.4	1912.63	1.400	1.384	1.397	1.393
25	1915.0	1883.4	1915.3	1904.56	1.395	1.372	1.395	1.387
28	1913.8	1855.8	1911.5	1893.7	1.395	1.352	1.393	1.380

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 1/3

environnement : air

Pourcentage de liège : 40 %

date de confection : 31/03/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	1497.3	1583.4	1679.5	1586.73	1.091	1.151	1.224	1.155
3	1447.2	1576.8	1591.4	1538.46	1.054	1.149	1.159	1.120
5	1436.3	1565.5	1587.3	1529.70	1.046	1.141	1.156	1.114
7	1424.7	1561.5	1578.3	1521.50	1.038	1.138	1.150	1.108
9	1406.5	1553.0	1560.5	1506.66	1.025	1.131	1.137	1.097
11	1404.3	1541.3	1551.5	1499.03	1.023	1.123	1.131	1.092
14	1378.5	1525.6	1548.4	1484.16	1.005	1.112	1.128	1.081
16	1373.5	1497.1	1531.2	1467.26	1.001	1.091	1.116	1.069
18	1361.7	1481.5	1520.2	1454.80	0.992	1.079	1.108	1.059
21	1353.2	1479.7	1510.1	1447.66	0.986	1.078	1.100	1.054
25	1341.3	1465.0	1504.0	1436.76	0.977	1.067	1.096	1.046
28	1339.4	1459.8	1487.9	1429.03	0.976	1.063	1.084	1.041

## Annexes

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 1/3

environnement : air

Pourcentage de liège : 50 %

date de confection : 07/04/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	1244.6	1227.1	1317.5	1263.06	0.907	0.894	0.960	0.920
3	1234.5	1215.1	1301.7	1250.43	0.899	0.885	0.948	0.911
5	1168.9	1161.6	1217.3	1182.60	0.852	0.846	0.887	0.861
7	1153.1	1149.7	1208.4	1170.40	0.840	0.837	0.881	0.852
9	1149.3	1140.9	1195.8	1162.00	0.837	0.831	0.871	0.846
11	1125.9	1136.3	1181.5	1147.90	0.821	0.828	0.861	0.836
14	1117.5	1123.0	1176.3	1138.93	0.814	0.818	0.857	0.829
16	1109.2	1121.0	1161.8	1130.33	0.808	0.817	0.847	0.824
18	1059.5	1115.7	1153.5	1109.56	0.772	0.813	0.841	0.810
21	1041.3	1043.0	1147.2	1077.16	0.758	0.760	0.836	0.784
25	1054.0	1027.4	1136.2	1072.53	0.768	0.748	0.828	0.781
28	1027.6	1108.4	1125.8	1087.26	0.748	0.807	0.820	0.792

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 1/3

environnement : air

Pourcentage de liège : 60 %

date de confection : 07/04/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	1067.9	1098.1	1067.7	1077.90	0.778	0.800	0.778	0.785
3	1051.3	1083.7	1059.4	1064.80	0.766	0.789	0.772	0.775
5	1046.9	1072.4	1043.3	1054.20	0.763	0.782	0.760	0.768
7	1033.2	1069.1	1037.8	1046.70	0.754	0.779	0.756	0.763
9	1025.7	1051.5	1031.9	1036.36	0.747	0.766	0.752	0.755
11	1006.9	1038.7	1029.8	1025.13	0.733	0.757	0.750	0.746
14	991.7	1024.4	1013.5	1009.86	0.722	0.746	0.738	0.735
16	985.6	1009.8	999.1	998.16	0.718	0.736	0.728	0.727
18	972.2	991.5	983.6	982.43	0.708	0.722	0.716	0.715
21	967.8	987.6	977.8	977.73	0.705	0.719	0.713	0.712
25	952.4	971.0	961.4	961.6	0.694	0.707	0.701	0.701
28	939.9	963.6	952.2	951.90	0.685	0.702	0.694	0.693

## Annexes

**Tableau III.3** Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège expansé l'échantillon 3/8

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 3/8

environnement : air

Pourcentage de liège : 20 %

date de confection : 02/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	2194.9	2187.2	2222	2201.36	1.599	1.594	1.619	1.604
3	2183.7	2178.8	2207.9	2190.13	1.592	1.588	1.610	1.596
5	2172.6	2176.3	2198.3	2182.40	1.583	1.586	1.602	1.590
7	2165.9	2158.1	2173.2	2165.73	1.578	1.572	1.583	1.577
9	2132.2	2155.2	2160.5	2149.30	1.554	1.571	1.574	1.566
11	2121.5	2153.8	2152.9	2142.73	1.546	1.569	1.569	1.561
14	2118.3	2141.9	2145.5	2135.23	1.544	1.561	1.563	1.556
16	2109.6	2136.5	2139.9	2128.66	1.537	1.557	1.559	1.551
18	2101.7	2129.8	2125.6	2119.03	1.532	1.552	1.550	1.544
21	2095.2	2117.1	2118.8	2110.36	1.527	1.543	1.544	1.538
25	2083.4	2110.9	2111.3	2101.86	1.525	1.538	1.538	1.534
28	2076.3	2097.6	2106.7	2093.53	1.513	1.528	1.535	1.525

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 3/8

environnement : air

Pourcentage de liège : 30 %

date de confection : 02/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	2016.2	2035.8	1992.4	2014.80	1.469	1.484	1.452	1.468
3	1997.1	2022.2	1987.5	2002.26	1.455	1.474	1.448	1.455
5	1984.7	1982.5	1972.5	1979.90	1.446	1.445	1.437	1.442
7	1977.7	1974.7	1966.7	1973.03	1.441	1.439	1.433	1.437
9	1972.0	1961.0	1953.3	1962.10	1.437	1.429	1.424	1.430
11	1961.6	1959.2	1945.9	1955.56	1.429	1.427	1.419	1.425
14	1957.3	1946.9	1938.1	1947.43	1.426	1.419	1.413	1.086
16	1941.9	1934.3	1928.2	1934.80	1.415	1.410	1.405	1.410
18	1933.0	1925.8	1923.0	1927.26	1.410	1.404	1.402	1.405
21	1929.4	1919.0	1917.6	1922.00	1.406	1.398	1.397	1.400
25	1913.4	1914.1	1910.3	1912.60	1.394	1.395	1.392	1.394
28	1903.3	1908.8	1901.8	1904.63	1.387	1.391	1.385	1.387

## Annexes

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 3/8  
 Pourcentage de liège : 40 %

environnement : air  
 date de confection : 04/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ1(kg/m3)	Masse vol ρ2(kg/m3)	Masse vol ρ3(kg/m)	Masse vol moy ρm
1	1609.4	1614.7	1601.9	1608.66	1.173	1.176	1.167	1.172
3	1591.7	1596.7	1592.1	1593.5	1.160	1.163	1.160	1.161
5	1580.0	1586.4	1581.8	1582.73	1.152	1.156	1.152	1.153
7	1572.0	1582.9	1576.7	1577.2	1.146	1.153	1.149	1.149
9	1561.3	1573.6	1564.3	1566.4	1.137	1.147	1.140	1.141
11	1544.2	1568.2	1558.5	1556.96	1.125	1.143	1.136	1.134
14	1535.9	1547.1	1546.1	1543.03	1.119	1.127	1.126	1.124
16	1527.3	1531.0	1533.1	1530.46	1.113	1.115	1.117	1.115
18	1520.5	1525.2	1523.9	1523.2	1.108	1.111	1.110	1.109
21	1513.9	1518.5	1517.8	1516.73	1.103	1.106	1.106	1.105
25	1512.2	1510.7	1509.3	1510.73	1.102	1.101	1.100	1.101
28	1499.3	1506.3	1496.8	1500.8	1.092	1.097	1.090	1.093

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 3/8  
 Pourcentage de liège : 50 %

environnement : air  
 date de confection : 04/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ1(kg/m3)	Masse vol ρ2(kg/m3)	Masse vol ρ3(kg/m)	Masse vol moy ρm
1	1591.7	1599.4	1574.3	1588.46	1.160	1.165	1.147	1.157
3	1589.3	1583.7	1565.9	1579.63	1.158	1.154	1.141	1.151
5	1581.7	1568.1	1551.6	1567.13	1.152	1.143	1.131	1.142
7	1576.2	1563.3	1542.7	1560.73	1.148	1.139	1.124	1.137
9	1564.4	1553.4	1537.8	1551.86	1.140	1.132	1.121	1.131
11	1550.5	1544.6	1531.9	1542.33	1.130	1.125	1.116	1.123
14	1546.2	1534.9	1523.2	1534.76	1.126	1.118	1.110	1.118
16	1530.1	1521.8	1512.4	1521.43	1.115	1.110	1.102	1.109
18	1527.3	1510.9	1507.9	1505.36	1.113	1.101	1.099	1.104
21	1512.1	1502.5	1481.1	1498.56	1.102	1.095	1.079	1.092
25	1497.3	1495.6	1473.9	1488.93	1.091	1.090	1.074	1.085
28	1481.1	1479.8	1463.0	1474.63	1.079	1.078	1.066	1.074

## Annexes

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 3/8

environnement : air

Pourcentage de liège : 60 %

date de confection : 06/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse Vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	1160.1	1206.6	1194.6	1187.1	0.845	0.879	0.871	0.865
3	1141.7	1192.9	1182.6	1172.4	0.823	0.869	0.862	0.851
5	1132.3	1181.7	1177.9	1163.96	0.825	0.861	0.858	0.848
7	1124.9	1176.4	1165.3	1155.53	0.819	0.857	0.849	0.842
9	1116.7	1163.6	1158.9	1146.4	0.813	0.848	0.844	0.835
11	1102.7	1155.9	1145.6	1134.73	0.803	0.842	0.834	0.826
14	1095.2	1141.9	1139.7	1125.6	0.798	0.832	0.831	0.820
16	1073.4	1137.9	1127.5	1112.93	0.782	0.829	0.821	0.811
18	1069.4	1120.7	1118.4	1102.83	0.779	0.816	0.815	0.803
21	1043.1	1114.4	1110.9	1089.46	0.760	0.812	0.810	0.810
25	1039.3	1109.5	1104.9	1084.56	0.757	0.810	0.805	0.791
28	1027.4	1103.7	1100.2	1077.1	0.748	0.804	0.801	0.784

**Tableau III.4** Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège expansé l'échantillon 3/8

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 8/15

environnement : air

Pourcentage de liège : 20 %

date de confection : 30/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse Vol ρ <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρ <sub>m</sub>
1	2212.3	2155.3	2113.9	2160.5	1.612	1.571	1.541	1.575
3	2197.2	2143.5	2142.5	2161.06	1.601	1.562	1.561	1.575
5	2181.3	2136.5	2137.1	2151.63	1.589	1.557	1.557	1.567
7	2173.9	2131.3	2131.9	2145.7	1.584	1.553	1.554	1.564
9	2160.4	2105.7	2126.3	2130.8	1.575	1.535	1.549	1.553
11	2156.9	2100.5	2124.7	2127.36	1.572	1.531	1.548	1.550
14	2147.5	2095.2	2119.1	2120.6	1.565	1.527	1.544	1.545
16	2135.3	2088.0	2097.4	2106.9	1.556	1.521	1.528	1.535
18	2124.6	2077.8	2083.5	2095.3	1.548	1.514	1.518	1.526
21	2122.4	2071.3	2072.0	2088.56	1.546	1.509	1.510	1.522
25	2016.5	2065.2	2061.2	2047.63	1.469	1.505	1.502	1.492
28	2008.3	2033.4	2042.0	2027.90	0.814	1.482	1.488	1.261

## Annexes

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 8/15

environnement : air

Pourcentage de liège : 30 %

date de confection : 30/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol ρ1(kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ2(kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ3(kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρm
1	1938.6	1987.4	1940.5	1955.5	1.413	1.448	1.414	1.425
3	1895.1	1978.4	1924.4	1932.63	1.381	1.442	1.403	1.410
5	1883.4	1963.7	1910.1	1919.06	1.372	1.431	1.392	1.398
7	1879.8	1865.0	1901.3	1882.03	1.370	1.359	1.386	1.372
9	1873.5	1944.9	1899.7	1906.03	1.365	1.417	1.385	1.389
11	1861.5	1931.7	1881.6	1891.6	1.356	1.410	1.371	1.379
14	1859.1	1923.3	1873.9	1885.43	1.355	1.402	1.366	1.374
16	1846.3	1911.8	1859.7	1872.6	1.346	1.393	1.355	1.364
18	1832.1	1904.4	1846.8	1861.1	1.335	1.388	1.346	1.356
21	1828.7	1895.9	1832.8	1852.46	1.333	1.355	1.335	1.341
25	1815.9	1887.5	1827.4	1843.6	1.323	1.375	1.332	1.343
28	1807.2	1875.1	1818.9	1833.73	1.317	1.366	1.325	1.336

N<sup>o</sup> de l'échantillon : 8/15

environnement : air

Pourcentage de liège : 40 %

date de confection : 31/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse Vol ρ1(kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ2(kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol ρ3(kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol moy ρm
1	1713.5	1721.8	1709.2	1714.83	1.248	1.255	1.246	1.250
3	1709.7	1691.2	1692.6	1697.83	1.246	1.233	1.234	1.238
5	1690.3	1677.6	1681.9	1683.26	1.232	1.223	1.226	1.227
7	1665.5	1656.9	1673.4	1665.26	1.214	1.207	1.220	1.214
9	1648.9	1647.3	1662.7	1652.96	1.202	1.201	1.212	1.205
11	1630.5	1639.1	1658.1	1642.56	1.188	1.195	1.208	1.197
14	1625.7	1630.2	1645.0	1633.63	1.185	1.188	1.198	1.190
16	1619.1	1622.4	1635.6	1625.7	1.180	1.182	1.192	1.185
18	1610.7	1613.5	1622.0	1615.4	1.174	1.176	1.182	1.177
21	1608.3	1609.5	1615.3	1611.03	1.172	1.173	1.177	1.174
25	1602.9	1603.9	1609.7	1605.5	1.168	1.169	1.173	1.170
28	1597.9	1601.0	1601.9	1600.26	1.165	1.166	1.167	1.166

## Annexes

N=° de l'échantillon : 8/15

environnement : air

Pourcentage de liège : 50 %

date de confection : 31/05/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse vol $\rho_1(\text{kg/m}^3)$	Masse vol $\rho_2(\text{kg/m}^3)$	Mass vol $\rho_3(\text{kg/m}^3)$	Masse vol moy $\rho_m$
1	1488.5	1466.9	1471.9	1475.76	1.085	1.069	1.073	1.075
3	1475.9	1453.5	1463.8	1464.4	1.075	1.059	1.066	1.066
5	1462.7	1447.8	1454.6	1455.03	1.066	1.055	1.060	1.060
7	1454.4	1432.6	1439.7	1442.23	1.060	1.044	1.093	1.065
9	1439.7	1426.5	1426.7	1430.96	1.049	1.044	1.039	1.044
11	1427.9	1416.8	1415.9	1420.2	1.040	1.033	1.032	1.035
14	1416.8	1405.8	1409.7	1410.76	1.033	1.025	1.027	1.028
16	1410.3	1393.6	1396.7	1400.2	1.027	1.016	1.018	1.020
18	1406.7	1381.4	1383.5	1390.53	1.025	1.006	1.008	1.013
21	1398.6	1377.2	1376.5	1384.1	1.019	1.004	1.003	1.009
25	1387.5	1365.4	1361.4	1371.43	1.110	0.995	0.992	0.999
28	1371.1	1344.9	1352.9	1356.3	0.999	0.980	0.986	0.988

N=° de l'échantillon : 8/15

environnement : air

Pourcentage de liège :60 %

date de confection : 02/06/2016

âge	Poids P1	Poids P2	Poids P3	Poids moy ΔP	Masse Vol $\rho_1(\text{kg/m}^3)$	Masse vol $\rho_2(\text{kg/m}^3)$	Masse vol $\rho_3(\text{kg/m}^3)$	Masse Vol moy $\rho_m$
1	1150.5	1120.7	1118.5	1129.9	0.838	0.817	0.815	0.823
3	1146.7	1116.8	1106.8	1123.43	0.835	0.814	0.810	0.820
5	1138.8	1104.8	1093.7	1112.43	0.830	0.805	0.797	0.811
7	1126.9	1094.5	1074.9	1098.76	0.821	0.797	0.783	0.800
9	1118.7	1077.3	1053.7	1083.23	0.815	0.785	0.768	0.789
11	1109.3	1081.9	1041.3	1077.5	0.810	0.788	0.758	0.785
14	1093.6	1073.6	1032.8	1066.66	0.797	0.782	0.752	0.777
16	1081.5	1065.4	1019.8	1055.56	0.788	0.776	0.743	0.769
18	1076.4	1051.5	1005.7	1044.53	0.784	0.766	0.733	0.761
21	1059.3	1042.8	994.8	1032.3	0.772	0.760	0.727	0.753
25	1042.7	1037.4	985.9	1022	0.759	0.756	0.718	0.744
28	1035.9	1026.9	978.4	1013.73	0.755	0.748	0.713	0.738

## Annexes

- Variation du retrait des bétons de liège expansé en fonction de l'âge**

**Tableau III.5** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 0 )

N<sup>o</sup> d'échantillon :

Pourcentage de liège : 0 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
<b>Environnement en salle</b>	26/04/16	1	0.291	0.227	0.742	0.420	2.625
	28/04/16	3	0.814	0.500	0.881	0.731	4.567
	30/04/16	5	1.194	0.661	1.107	0.987	6.168
	02/05/16	7	1.318	0.862	1.248	1.143	7.143
	04/05/16	9	1.421	1.097	1.464	1.327	8.294
	06/05/16	11	1.633	1.162	1.631	1.475	9.218
	08/05/16	14	1.835	1.299	1.891	1.675	10.468
	10/05/16	16	1.990	1.321	1.975	1.762	11.012
	12/05/16	18	2.438	2.583	2.207	2.410	15.062
	14/05/16	21	2.652	2.638	2.341	2.543	15.893
	16/05/16	25	2.743	2.868	2.534	2.715	16.968
	18/05/16	28	2.850	2.948	2.767	2.855	17.843

## Annexes

**Tableau III.27** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton ( pourcentage de liège 20% )

de liège 1/3

N<sup>o</sup> d'échantillon : 1/3

date de confection :

Pourcentage de liège : 20 %

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
<b>Environnement en salle</b>	07/05/16	1	0.832	1.034	1.689	1.185	7.40
	09/05/16	3	1.317	1.632	2.195	1.715	10.718
	11/05/16	5	1.593	1.638	2.249	1.826	11.412
	13/05/16	7	1.805	1.711	2.312	1.943	12.143
	15/05/16	9	1.884	1.834	2.328	2.016	12.600
	17/05/16	11	1.905	1.913	2.356	2.058	11.862
	19/05/16	14	1.907	1.915	2.382	2.068	12.925
	21/05/16	16	1.908	1.975	2.394	2.092	13.075
	23/05/16	18	2.066	2.332	2.425	2.274	14.212
	25/05/16	21	2.325	2.371	2.465	2.387	14.918
	27/05/16	25	2.360	2.412	2.522	2.431	15.193
	29/05/16	28	2.848	2.869	2.871	2.862	17.881

## Annexes

**Tableau III.6** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton ( pourcentage de liège 30% )

N<sup>o</sup> d'échantillon : 1/3

Pourcentage de liège : 30 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
<b>Enonement en salle</b>	10/05/16	1	1.746	1.142	1.154	1.014	6.337
	12/05/16	3	1.132	1.437	2.050	1.540	9.625
	14/05/16	5	1.153	1.984	2.435	1.857	11.606
	16/05/16	7	1.346	2.719	2.622	2.242	14.012
	18/05/16	9	1.489	2.900	2.851	2.413	15.081
	20/05/16	11	1.500	2.901	2.908	2.436	15.225
	22/05/16	14	1.516	2.930	3.024	2.490	15.562
	24/05/16	16	1.525	3.026	3.144	2.565	16.031
	26/05/16	18	1.641	3.112	3.152	2.635	16.468
	28/05/16	21	1.955	3.148	3.161	2.755	17.218
	30/05/16	25	2.031	3.361	3.389	2.927	18.293
	01/05/16	28	2.125	3.385	3.410	2.973	18.581

## Annexes

**Tableau III.7** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton ( pourcentage de liège 40% )  
**N=° d'échantillon : 1/3** **Pourcentage de liège : 40 %**  
**date de confection :** **Granulométrie**

	Date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
<b>Environnement en salle</b>	12/05/16	1	1.763	1.781	1.783	1.542	9.637
	14/05/16	3	1.732	1.914	2.822	2.156	13.475
	16/05/16	5	1.763	2.801	3.288	2.677	16.731
	18/05/16	7	1.829	3.410	3.419	2.886	18.037
	20/05/16	9	1.879	3.496	3.637	3.004	18.775
	21/05/16	11	1.968	3.532	3.714	3.071	19.193
	23/05/16	14	2.167	3.568	3.728	3.154	19.712
	25/05/16	16	2.187	3.611	3.743	3.180	19.875
	27/05/16	18	2.244	3.649	3.754	3.216	20.100
	29/05/16	21	2.247	3.663	3.765	3.223	20.143
	31/05/16	25	2.790	3.688	3.992	3.467	21.668
	02/06/16	28	2.803	3.700	4.801	3.768	23.550

**Tableau III.8** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton ( pourcentage de liège 50% )  
**N=° d'échantillon : 1/3** **Pourcentage de liège : 50 %**  
**date de confection :** **Granulométrie**

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
<b>Environnement en salle</b>	14/05/16	1	1.299	1.721	2.094	1.705	10.656
	16/05/16	3	1.606	2.915	2.918	2.480	15.500
	18/05/16	5	1.675	3.108	3.615	2.766	17.287
	20/05/16	7	2.511	3.181	3.681	3.124	19.525
	22/05/16	9	2.828	3.467	3.979	3.425	21.406
	24/05/16	11	3.420	3.674	3.999	3.688	23.050
	26/05/16	14	3.911	3.797	4.107	3.938	24.612
	28/05/16	16	4.107	4.404	4.627	4.379	27.368
	30/05/16	18	4.331	4.425	4.643	4.466	27.912
	01/06/16	21	4.391	4.493	4.638	4.507	28.168
	03/06/16	25	4.0461	4.508	4.693	4.554	28.462
	05/06/16	28	4.485	5.084	5.085	4.885	30.531

## Annexes

**Tableau III.9** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton ( pourcentage de liège 60% )

N<sup>o</sup> d'échantillon : 1/3

Pourcentage de liège : 60%

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	14/05/16	1	1.099	1.961	1.942	1.667	10.418
	16/05/16	3	2.820	2.886	2.925	2.876	17.975
	18/05/16	5	3.900	3.077	3.134	3.370	21.062
	20/05/16	7	3.937	3.890	4.212	4.013	25.081
	22/05/16	9	3.985	4.339	4.629	4.317	26.981
	24/05/16	11	4.003	4.696	5.320	4.673	29.206
	26/05/16	14	4.147	4.723	5.767	4.879	30.493
	28/05/16	16	4.213	4.811	5.782	4.935	30.843
	30/05/16	18	4.281	4.829	5.813	4.974	31.087
	01/06/16	21	4.333	4.837	5.854	5.008	31.300
	03/06/16	25	4.468	4.885	5.869	5.074	31.712
	05/06/16	28	5.085	5.238	5.956	5.426	33.912

**Tableau III.10** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 0%)

N<sup>o</sup> d'échantillon :

Pourcentage de liège : 0 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	26/04/16	1	0.291	0.227	0.742	0.420	2.625
	28/04/16	3	0.814	0.500	0.881	0.731	4.567
	30/04/16	5	1.194	0.661	1.107	0.987	6.168
	02/05/16	7	1.318	0.862	1.248	1.143	7.143
	04/05/16	9	1.421	1.097	1.464	1.327	8.294
	06/05/16	11	1.633	1.162	1.631	1.475	9.218
	08/05/16	14	1.835	1.299	1.891	1.675	10.468
	10/05/16	16	1.990	1.321	1.975	1.762	11.012
	12/05/16	18	2.438	2.583	2.207	2.410	15.062
	14/05/16	21	2.652	2.638	2.341	2.543	15.893
	16/05/16	25	2.743	2.868	2.534	2.715	16.968
	18/05/16	28	2.850	2.948	2.767	2.855	17.843

## Annexes

**Tableau III.11** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 20%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 3/8

Pourcentage de liège : 20 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	17/05/16	1	0.241	1.144	1.523	0.969	6.056
	19/05/16	3	0.384	1.365	2.245	1.331	8.318
	21/05/16	5	0.953	1.410	2.343	1.568	9.800
	23/05/16	7	1.138	1.444	2.513	1.698	10.612
	25/05/16	9	1.276	1.471	2.686	1.811	11.318
	27/05/16	11	1.397	1.495	2.783	1.892	11.825
	29/05/16	14	1.405	1.505	2.843	1.918	11.987
	31/05/16	16	1.451	2.014	2.873	2.113	13.206
	02/05/16	18	1.488	2.120	2.932	2.180	13.625
	04/05/16	21	1.667	2.190	2.948	2.268	14.175
	06/05/16	25	2.204	2.491	3.071	2.589	16.181
	08/05/16	28	2.885	2.813	3.103	2.936	18.350

**Tableau III.12** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 30%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 3/8

Pourcentage de liège : 30 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	17/05/16	1	1.096	1.253	1.536	1.295	8.093
	19/05/16	3	1.297	1.582	1.975	1.618	10.112
	21/05/16	5	1.306	1.697	1.981	1.661	10.381
	23/05/16	7	1.338	1.859	2.431	1.876	11.725
	25/05/16	9	1.448	1.977	2.541	1.987	12.418
	27/05/16	11	1.656	2.105	2.850	2.204	13.775
	29/05/16	14	1.785	2.150	2.981	2.305	14.406
	31/05/16	16	1.895	2.215	2.989	2.336	14.600
	02/06/16	18	1.998	2.419	3.081	2.499	15.618
	04/06/16	21	2.110	2.495	3.106	2.570	16.062
	06/06/16	25	2.231	2.0576	3.120	2.642	16.512
	08/06/16	28	2.443	2.734	3.694	2.957	18.481

## Annexes

**Tableau III.13** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 40%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 3/8

Pourcentage de liège : 40 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	19/05/16	1	1.159	1.457	2.365	1.660	10.375
	21/05/16	3	1.373	1.875	2.429	1.892	11.825
	23/05/16	5	1.478	1.973	2.579	2.010	12.562
	25/05/16	7	1.809	1.984	2.613	2.135	13.343
	27/05/16	9	1.914	1.992	2.654	2.187	13.668
	29/05/16	11	1.961	2.084	2.915	2.320	14.500
	31/05/16	14	2.031	2.194	2.976	2.400	15.000
	02/06/16	16	2.107	2.233	2.991	2.444	15.275
	04/06/16	18	2.261	2.617	3.101	2.659	16.618
	06/06/16	21	2.313	2.721	3.127	2.720	17.000
	08/06/16	25	2.425	2.767	3.205	2.799	17.493
10/06/16	28	2.653	2.834	3.694	3.057	19.106	

**Tableau III.14** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 50%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 3/8

Pourcentage de liège : 50 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	21/05/16	1	1.202	1.527	2.387	1.705	10.656
	23/05/16	3	1.391	1.887	2.435	1.904	11.900
	25/05/16	5	1.513	1.985	2.581	2.026	12.662
	27/05/16	7	1.827	1.996	2.637	2.153	13.456
	29/05/16	9	1.938	2.112	2.718	2.256	14.100
	31/05/16	11	1.983	2.125	2.933	2.347	14.668
	02/06/16	14	2.105	2.228	2.945	2.426	15.162
	04/06/16	16	2.121	2.297	2.953	2.457	15.356
	06/06/16	18	2.279	2.628	3.113	2.673	16.706
	08/06/16	21	2.351	2.735	3.135	2.741	17.131
	10/06/16	25	2.487	2.772	3.213	2.824	17.650
12/06/16	28	2.886	2.981	3.337	3.068	19.175	

## Annexes

**Tableau III.15** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 60%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 3/8

Pourcentage de liège : 60 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	21/05/16	1	1.238	1.571	2.401	1.736	10.850
	23/05/16	3	1.411	1.899	2.447	1.919	11.993
	25/05/16	5	1.525	1.989	2.617	2.044	12.775
	27/05/16	7	1.835	2.090	2.654	2.193	13.706
	29/05/16	9	1.951	2.127	2.727	2.268	14.175
	31/05/16	11	1.994	2.143	2.941	2.359	14.743
	02/06/16	14	2.110	2.307	2.956	2.457	15.356
	04/06/16	16	2.138	2.325	2.962	2.475	15.468
	06/06/16	18	2.283	2.631	3.120	2.678	16.737
	08/06/16	21	2.357	2.737	3.148	2.746	17.162
	10/06/16	25	2.492	2.811	3.253	2.852	17.825
	12/06/16	28	2.895	2.995	3.481	3.123	19.582

**Tableau III.16** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 0%)

N<sup>o</sup> d'échantillon :

Pourcentage de liège : 0 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	26/04/16	1	0.291	0.227	0.742	0.420	2.625
	28/04/16	3	0.814	0.500	0.881	0.731	4.567
	30/04/16	5	1.194	0.661	1.107	0.987	6.168
	02/05/16	7	1.318	0.862	1.248	1.143	7.143
	04/05/16	9	1.421	1.097	1.464	1.327	8.294
	06/05/16	11	1.633	1.162	1.631	1.475	9.218
	08/05/16	14	1.835	1.299	1.891	1.675	10.468
	10/05/16	16	1.990	1.321	1.975	1.762	11.012
	12/05/16	18	2.438	2.583	2.207	2.410	15.062
	14/05/16	21	2.652	2.638	2.341	2.543	15.893
	16/05/16	25	2.743	2.868	2.534	2.715	16.968
	18/05/16	28	2.850	2.948	2.767	2.855	17.843

## Annexes

**Tableau III.17** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 20%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 8/15

Pourcentage de liège : 20 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	25/05/16	1	0.491	1.201	2.121	1.271	7.944
	27/05/16	3	0.627	1.886	2.197	1.570	9.812
	29/05/16	5	1.617	1.891	2.212	1.907	11.917
	31/05/16	7	1.628	1.913	2.231	1.924	12.025
	02/06/16	9	1.641	1.953	2.272	1.955	12.218
	04/06/16	11	1.683	1.991	2.289	1.987	12.418
	06/06/16	14	1.710	2.035	2.307	2.017	12.606
	08/06/16	16	1.729	2.109	2.329	2.056	12.850
	10/06/16	18	1.806	2.125	2.346	2.092	13.075
	12/06/16	21	1.823	2.138	2.362	2.110	13.187
	14/06/16	25	1.851	2.162	2.385	2.133	13.331
	16/06/16	28	2.815	2.885	2.897	2.865	17.906

**Tableau III.18** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 30%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 8/15

Pourcentage de liège : 30 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	25/05/16	1	0.511	1.225	2.237	1.324	8.27
	27/05/16	3	0.755	1.901	2.213	1.623	10.143
	29/05/16	5	1.682	1.993	2.227	1.967	12.293
	31/05/16	7	1.714	2.100	2.289	2.034	12.712
	02/06/16	9	1.731	2.127	2.292	2.050	12.812
	04/06/16	11	1.733	2.320	2.310	2.100	13.125
	06/06/16	14	1.757	2.333	2.337	2.143	13.393
	08/06/16	16	1.816	2.371	2.369	2.185	13.656
	10/06/16	18	1.845	2.402	2.385	2.200	13.750
	12/06/16	21	1.867	2.425	2.387	2.226	13.912
	14/06/16	25	1.985	2.437	2.411	2.241	14.006
	16/06/16	28	2.699	2.985	2.985	2.888	18.050

## Annexes

**Tableau III.19** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 40%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 8/15

Pourcentage de liège : 40 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	28/05/16	1	0.717	1.237	2.239	1.397	8.731
	30/05/16	3	0.855	1.985	2.225	1.688	10.550
	01/06/16	5	1.691	1.999	2.237	1.976	12.350
	03/06/16	7	1.725	2.215	2.285	2.075	12.968
	05/06/16	9	1.747	2.293	2.305	2.115	13.218
	07/06/16	11	1.762	2.325	2.337	2.141	13.381
	09/06/16	14	1.789	2.345	2.351	2.162	13.512
	11/06/16	16	1.835	2.384	2.393	2.204	13.775
	13/06/16	18	1.851	2.410	2.432	2.231	13.943
	15/06/16	21	2.077	2.437	2.447	2.320	14.500
	17/06/16	25	2.110	2.483	2.493	2.362	14.762
19/06/16	28	2.709	2.835	3.220	2.920	18.250	

**Tableau III.20** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 50%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 8/15

Pourcentage de liège : 50 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
Environnement en salle	28/05/16	1	1.270	1.401	2.245	1.665	10.406
	30/05/16	3	1.337	1.997	2.276	1.870	11.687
	01/06/16	5	1.731	2.071	2.289	2.030	12.687
	02/06/16	7	1.745	2.223	2.311	2.093	13.081
	03/06/16	9	1.783	2.246	2.327	2.119	13.243
	05/06/16	11	1.797	2.337	2.340	2.158	13.487
	07/06/16	14	1.825	2.358	2.376	2.186	13.662
	09/06/16	16	1.847	2.391	2.395	2.211	13.818
	11/06/16	18	1.863	2.422	2.443	2.243	14.018
	13/06/16	21	2.102	2.441	2.474	2.339	14.618
	15/06/16	25	2.131	2.488	2.521	2.367	14.793
	17/06/16	28	2.642	2.851	3.331	2.941	18.381

## Annexes

**Tableau III.21** Evolution du retrait du BCLLE en fonction de l'âge du béton (pourcentage de liège 60%)

N<sup>o</sup> d'échantillon : 8/15

Pourcentage de liège : 60 %

date de confection :

Granulométrie

	date	âge	Lecture retractomètre			Retrait Δl (mm)	Retrait rel Δl/l (mm/m)
			Lecture L1	Lecture L2	Lecture L3		
<b>Environnement en salle</b>	30/05/16	1	1.293	1.49	2.251	1.677	10.481
	01/06/16	3	1.345	2.015	2.267	1.876	11.725
	02/06/16	5	1.753	2.087	2.297	2.046	12.787
	03/06/16	7	1.767	2.232	2.331	2.110	13.187
	05/06/16	9	1.799	2.349	2.345	2.164	13.525
	07/06/16	11	1.805	2.367	2.357	2.176	13.600
	09/06/16	14	1.831	2.374	2.382	2.195	13.718
	11/06/16	16	1.855	2.398	2.412	2.222	13.887
	13/06/16	18	1.872	2.427	2.473	2.257	14.106
	15/06/16	21	2.133	2.452	2.486	2.357	14.731
	17/06/16	25	2.148	2.490	2.533	2.390	14.937
19/06/16	28	2.767	3.013	3.225	3.001	18.756	