

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie Civil

**Spécialité** : Structure

**Par**: LARIBI Hadjer & OTMANI Ismahane

### **Sujet**

Evaluation de l'impact de la température de cure sur les performances  
d'un agro-béton à base de liège

Soutenu le 21 Septembre 2020, devant le jury composé de :

Melle. SAIL L.	Maître de conférences	Univ. Tlemcen	Présidente
M. HOUTI F. B.	Maître-assistant	Univ. Tlemcen	Examineur
M. GHOMARI F.	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur
M. TALEB O.	Maître de conférences	Univ. Tlemcen	Co- Directeur
M. TEDJDITI A.K.	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co-Directeur

"Be brutally honest about the short term and optimistic and confident about the long term"

*Reed Hastings*

"In order to succeed, we must first believe that we can"

*Nikos Kazantzakis*

## Remerciements

Toute notre parfaite gratitude à Allah le tout puissant qui nous a armé de courage, de volonté et de bonne santé pour entamer ce travail et de nous avoir permis d'achever ce mémoire. Nous avons beaucoup apprécié de faire nos premiers pas dans le domaine de la recherche à côté de nos honorables encadreurs. Ils nous ont ainsi grandement orienté et guidé tout au long de ce travail. En premier lieu nous tenons à dédier nos chaleureux remerciements à Monsieur **Ghomari Fouad**, Professeur à la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen pour la pertinence de ses conseils, sa capacité à élargir la réflexion ainsi qu'à ses qualités en matière de communication dont les conseils et les compétences en ce domaine nous ont fourni une aide précieuse.

Nous tenons ensuite à remercier vivement Monsieur **Taleb Omar**, Maître de conférences à la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen et Monsieur **Tedjditi Ahmed Kamel** Doctorant à la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen pour leur soutien moral, encouragements et leur aide pratique. Malgré leurs nombreuses occupations professionnelles, Ils ont toujours su se rendre disponibles pour suivre nos travaux.

Nos sincères remerciements vont également à Mademoiselle **SAIL Latéfa**, Maître de conférences, habilitée à diriger les recherches à la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant la présidence de notre jury de soutenance.

Aussi nous exprimons nos reconnaissances à l'examineur de ce travail Monsieur **HOUTI Farid Brahim** d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires, les remarques très pertinentes et surtout pour la correction attentive et rigoureuse qui va permettre l'amélioration de la qualité de ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudes également à nos parents, nos familles, nos amis qui ont motivé notre désir de poursuivre nos rêves jusqu'au bout. Sans oublier bien sûr d'adresser nos chaleureux remerciements à nos chers enseignant(es) qui sans leur soutien assidu, il est certain que ce travail n'aurait pu voir le jour.

Enfin, merci à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'études.

## Résumé

Face à la demande énergétique sans cesse croissante et la sévérité des nouveaux règlements thermiques qui répondent de plus en plus aux exigences du développement durable, la recherche de nouveaux matériaux de construction, pouvant améliorer le confort des habitants tout en réduisant la facture énergétique et l'impact environnemental du secteur de la construction, s'est multipliée. Parmi les nouveaux composites qui ont fait récemment l'objet de nombreux travaux de recherche, les mortiers et bétons de liège. Ces derniers, malgré l'intérêt qu'ils ont suscité ces dernières années, nécessitent encore plus d'investigations en vue d'une plus grande maîtrise de leurs performances permettant une plus grande diversification de leurs applications. Faisant suite à une recherche bibliographique relativement élargie, ce travail de synthèse tente d'estimer l'effet de la température de cure sur les bétons allégés incorporant dans leur masse les granulats de liège. Cette étude est divisée en deux parties : la première concerne l'investigation des ressources végétales importantes dont dispose notre pays, susceptibles d'être incorporés à la matrice cimentaire pour la fabrication de matériaux de construction répondant aux exigences précitées et la deuxième partie vise à évaluer l'incidence de la température d'une part, sur les propriétés intrinsèques des granulats végétaux et d'autre part, sur les performances des bétons à base de ces granulats. La variation de la température a un effet sur les propriétés des particules végétales (masse volumique, absorption en eau et sorptivité) et par voie de conséquence sur les bétons qui les contiennent. L'effet du taux des granulats de liège, de leur taille, du dosage en ciment, de leur prétraitement ainsi que du temps d'immersion pendant la cure ont aussi été mis en revue dans cette synthèse.

**Mots clés :** Liège, béton léger ,béton végétal, température de cure, propriétés thermiques, Efficacité énergétique, composites de liège.

## ملخص

في خضم الطلب المتزايد على الطاقة وصرامة القوانين الحرارية التي أصبحت مرغمة على احترام توصيات التنمية المستدامة، شهد العالم تطورا ملحوظا في مجال البحث عن مواد البناء الجديدة التي من شأنها أن تحسن مستوى الرفاهية داخل البيت وتقلص في نفس الوقت الفاتورة الطاقوية وأثر مواد البناء على المحيط. من بين المواد الجديدة التي خضعت مؤخرا للكثير من الأبحاث، المركبات التي تحتوي على الفلين. هذه الأخيرة، على الرغم من الاهتمام الذي لقيته في السنوات الأخيرة، تتطلب مزيدا من البحث بهدف زيادة التحكم في أدائها، مما يسمح بتنوع أكبر في تطبيقاتها. بعد بحث مكثف نسبيا في مختلف الأعمال السابقة، يحاول هذا العمل التجميعي تقييم تأثير درجة حرارة الحفظ على الخرسانة خفيفة الوزن التي تتضمن حبيبات الفلين في كتلتها. تنقسم هذه الدراسة إلى قسمين: يتعلق الأول بالتحقيق في الموارد النباتية الهامة المتاحة لبلدنا والتي يمكن دمجها في مصفوفة الأسمنت لتصنيع مواد بناء تلبى المتطلبات المذكورة أعلاه، أما الجزء الثاني فيهدف إلى تقييم تأثير درجة الحرارة من ناحية، على الخصائص الخاصة بالخلانط الإسمنتي النباتية ومن ناحية أخرى على خصائص الخرسانة المكونة من هذه الحبيبات. من خلال الدراسة التي أجريناها، توصلنا إلى أن الاختلاف في درجة الحرارة له تأثير على خصائص الجزيئات النباتية (الكثافة، امتصاص الماء والحساسية لبخار الماء) وبالتالي على الخرسانة التي تحتوي عليها. إن الحوصلة التي قمنا بها، سمحت أيضا بدراسة تأثير نسبة الفلين، حجمه، معايرة الإسمنت في الخليط، معالجة الفلين قبل إدخاله في الخليط ومدة الغمر في الماء على مختلف خصائص خرسانة الفلين.

**الكلمات المفتاحية:** الفلين، الخرسانة الخفيفة، الخرسانة النباتية، درجة الحفظ، الخصائص الحرارية، الفعالية الطاقوية، مركبات الفلين.

## Abstract

Faced with the ever-increasing energy demand and the severity of new thermal codes that increasingly meet the requirements of sustainable development, the search for new building materials, which can improve the comfort of habitants while reducing the energy bill and environmental impact of the construction sector, has multiplied. Among new composites that have recently received large attention, cork mortars and cork concretes. These latter, despite the interest they have aroused in recent years, need more investigation in regard to greater control of their performance, allowing high diversification of their applications. Following a relatively extensive bibliographical research, this literature review attempts to estimate the effect of the curing temperature on lightweight concrete incorporating cork aggregates in their matrix. This study is

divided into two parts: the first concerns an investigation of the important plant resources available to our country, which can be incorporated into the cement matrix for the manufacture of building materials meeting the aforementioned requirements, and the second part assesses the impact of temperature on the one hand on the intrinsic properties of plant aggregates and on the other hand on the performance of concretes based on these aggregates. The variation in temperature affects properties of the plant particles (density, water absorption and sorptivity) and consequently properties of concrete containing them. The effect cork percentage, its size, cement dosage, treatment of cork aggregates as well as the immersion time of cork concrete were also reviewed in this manuscript.

**Keywords:** Cork, Lightweight concrete, Green concrete, Curing temperature, Thermal properties, Energetic efficiency, Cork composites.

## Dédicace

A l'issu du cycle de notre mémoire de graduation de Master, je voudrais dédier ce modeste travail avec une immense joie, un grand honneur et un cœur chaleureux :

- ✓ A mes très chers parents en signe de mes profondes et affectueuses reconnaissances. Quoi que je fasse ou quoi je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit pour votre amour sans limites, votre sacrifice au quotidien, votre soutien permanent et pour tous vos encouragements pour que je puisse atteindre mes objectifs.
- ✓ A mon cher frère **Zakaria** et mes chères sœurs **Sarah** et **Meriem**, merci infiniment pour votre amour et vos prières.
- ✓ A ma binôme **Ismahane**, merci infiniment pour ton soutien et ta sympathie.
  - ✓ A tous ma famille, mes ami(e)s et connaissances.
  - ✓ A tous ma promotion de la spécialité « Structure ».
- ✓ L'ensemble des collègues pour avoir entretenu une ambiance conviviale et studieuse au sein du laboratoire.
- ✓ Enfin à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, on vous dit merci.

Merci à tous de m'avoir permis de vivre ça !

**Laribi Hadjer**

## Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...

Je dédie ce travail :

\*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

\*A mes chères sœurs **Nassima**, **Khouloud** et **Fatima** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

\*A mes chers frères **Hocine** et **Mohammed**, pour leur appui et leur encouragement,

\*A mes nièces et mes neveux, pour leur sourire et leur amour éternel,

\*A toute ma famille, surtout à ma cousine **Fadwa**, pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

\* À la fille la plus chère que j'ai rencontrée dans ma vie, mon compagnon de vie **Hadjer**,

\*A mes chers amis, merci infiniment pour leur encouragement et leur amour.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

**Otmani Ismahane**

## Liste des abréviations

**(C1)** : Béton de contrôle

**(C2)** : Béton contenant 10% de granulats de liège de taille (0.5-1 mm)

**(C3)** : Béton contenant 10% de granulats de liège taille (3-5 mm)

**(C4)** : Béton contenant 10% de granulats de liège comme mélange de sable [3.7% (3–5 mm) + 29.6% (2–3 mm) + 58.2% (0.5-1 mm) + 8.6% (<0.2 mm)]

**(C5)** Béton contenant 10% de granulats de liège de taille (3-8mm)

**(C6)** : Béton contenant 10% de granulats de liège de taille (6-14 mm)

**(C7)** : Béton contenant 10% de granulats de liège comme mélange de pierres [33.7% (6–14 mm) + 62.4% (3–8) mm + 3.9% (2–3 mm)]

**(C8)** : Béton contenant 5 % de granulats de liège comme mélange de sable+ 5% de granulats de liège comme mélange de pierres

**(C9)** : Béton contenant 10% de granulats de liège comme mélange de sable + 10% de granulats de liège comme mélange de pierres

**(CC)** : Résistance à la compression des granulats de liège durci

**(CE)** : Résistance à la compression des billes d'EPS

**(GGBFS)** : Cendres volantes et de scories de haut fourneau.

**(GGBS)** : Laitiers de haut fourneau

**(LS)** : Echantillons de granulats de liège qui présentent de grandes tailles

**(MS)** : Echantillons dont la taille des granulats de liège est moyenne

**(OC)** : Argile expansée

**(OP)** : Pierre ponce

**(OS)** : Schiste expansée

**(SS)** : Spécimens montrant de petites tailles de granulats de liège

**10C-W20** : Mélange contenant 10% de ciment et conservé à l'eau à 20 °C

**10C-W70** : Mélange contenant 10% de ciment et conservé à l'eau à 70 °C

**10S-D70** : Mélange contenant 10% de ciment et conservé au four à 70 °C

**20C-W20** : Mélange contenant 20% de ciment et conservé à l'eau à 20 °C

**20C-W70** : Mélange contenant 20% de ciment et conservé à l'eau à 70 °C



**20S-D70** : Mélange contenant 20% de ciment et conservé au four à 70 °C

**21d-MC** : Cure à 21 jours dans l'eau

**28d-ISC** : Cure à 28 jours à environnement ambiant

**7d-MC** : Cure à 7 jours dans l'eau

**7d-TA** : Cure à 7 jours à température élevée de 50 °C.

**ADEME** : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France)

**APRUE** : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (Algérie)

**C** : Ciments Portland

**Ca(OH)<sub>2</sub>** : Chaux, l'hydroxyde de calcium (portlandite)

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone.

**C-S-H** : Silicate de calcium hydraté

**DIB** : Fibres brutes de Diss

**DOB** : Fibres brutes de Doum

**DPF3** : Fibres fines de palmier dattier (diamètre moyen de 3 mm)

**DPF6** : Fibres larges de palmier dattier (diamètre moyen de 6 mm)

**EOLE** : Eau et Ouvrages dans Leur Environnement.

**EPS** : Billes de polystyrène (thermoplastique polymère)

**FA 50** : Béton contenant 50% de cendres volantes,

**FA10S40** : Béton contenant 10% de cendres volantes et 40% de Laitier,

**FA30S20** : Béton contenant 30% de cendres volantes et 20% de Laitier,

**FA30S30** : Béton contenant 20% de cendres volantes et 30% de Laitier,

**FA40S10** : Béton contenant 40% de cendres volantes et 10% de Laitier,

**GES** : Gaz à Effet de serre.

**G-O** : Gasoil.

**HR** : Humidité relative

**H-W** : Eau chaude.

**IEA** : International Energy Agency.

**M0 et M0-H** : Mélange contenant 0% de GGBS

**MEB** : Microscopie Electronique à Balayage

**MEDDE** : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

**MIT** : Massachusetts Institute of Technology

**MP** : Béton contenant, en volume, des granulats légers traités

**MTep** : Mégatonne équivalent pétrole

**NaOH** : Hydroxyde de sodium (Soude)

**OPS** : Coquilles de palmier à huile

**S** : Géopolymère.

**S3 et S3-H** : Mélange contenant 60% de GGBS

**S50** : Béton contenant 50% de Laitier

**TH** : Traitement thermique

**V-N** : Vernis

**W20** : Cure dans l'eau à température ambiante

**W70** : Cure dans l'eau à 70 °C

**W-O** : Huile usée

## Liste des symboles

$\lambda$  : Conductivité thermique (W/m.°K)

$n$  : Porosité

$t$  : temps (s)

$T$  : température (°C)

$\rho_B$  : Masse volumique apparente en vrac à l'état sec (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_T$  : Masse volumique apparente vraie des particules sèches (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  : Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>)

$\eta_{\text{Tot-Gr}}$ : Porosité totale (%)

$\eta_{\text{Tinter}}$ : Porosité inter-granulaire (%)

$\eta_{\text{Intra-p}}$ : Porosité intra-granulaire des particules isolées (%)

$\eta_{\text{Intra/Tot}}$ : Porosité intra-granulaire par rapport au mélange (%)

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

$\sigma$  : Résistance (MPa)

**F** : Force (N)

**M** : Masse (g)

**V** : Volume (m<sup>3</sup>)

$\mu\text{m}$  : Micro-mètre (mesure des épaisseurs minces ; MEB)

## Résumé

Face à la demande énergétique sans cesse croissante et la sévérité des nouveaux règlements thermiques qui répondent de plus en plus aux exigences du développement durable, la recherche de nouveaux matériaux de construction, pouvant améliorer le confort des habitants tout en réduisant la facture énergétique et l'impact environnemental du secteur de la construction, s'est multipliée. Parmi les nouveaux composites qui ont fait récemment l'objet de nombreux travaux de recherche, les mortiers et bétons de liège. Ces derniers, malgré l'intérêt qu'ils ont suscité ces dernières années, nécessitent encore plus d'investigations en vue d'une plus grande maîtrise de leurs performances permettant une plus grande diversification de leurs applications.

Faisant suite à une recherche bibliographique relativement élargie, ce travail de synthèse tente d'estimer l'effet de la température de cure sur les bétons allégés incorporant dans leur masse les granulats de liège. Cette étude est divisée en deux parties : la première concerne l'investigation des ressources végétales importantes dont dispose notre pays, susceptibles d'être incorporés à la matrice cimentaire pour la fabrication de matériaux de construction répondant aux exigences précitées et la deuxième partie vise à évaluer l'incidence de la température d'une part, sur les propriétés intrinsèques des granulats végétaux et d'autre part, sur les performances des bétons à base de ces granulats.

La variation de la température a un effet sur les propriétés des particules végétales (masse volumique, absorption en eau et sorptivité) et par voie de conséquence sur les bétons qui les contiennent. L'effet du taux des granulats de liège, de leur taille, du dosage en ciment, de leur prétraitement ainsi que du temps d'immersion pendant la cure ont aussi été mis en revue dans cette synthèse.

**Mots clés :** Liège, béton léger, béton végétal, température de cure, propriétés thermiques, Efficacité énergétique, composites de liège.

# Table de matières

Remerciements .....	III
Liste des abréviations .....	VIII
Liste des symboles.....	XI
Résumé.....	XII
Table de matières.....	XIII
Liste de Figures.....	XV
Liste des Tableaux .....	XVIII
Chapitre :01	
Introduction générale.....	1
1. Bétons légers et isolation .....	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Le bâtiment et l'environnement .....	3
1.2.1. Développement durable.....	3
1.3. Efficacité énergétique .....	5
1.3.1. Qu'est-ce l'efficacité énergétique ? .....	5
1.3.2. Consommation énergétique.....	5
1.4. Secteur du bâtiment et l'environnement.....	8
1.5. L'isolation thermique .....	8
1.5.1. Nécessité de l'isolation thermique.....	8
1.5.2. Déperditions thermiques.....	9
1.5.3. Types d'isolation.....	10
1.5.4. Matériaux d'isolation .....	11
1.6. Les bétons légers.....	12
1.6.1. Types de bétons légers.....	12
1.7. Bétons à base des granulats végétaux .....	13
1.7.1. Généralités .....	13
1.7.2. Littérature sur les bétons végétaux.....	14
1.8. Le liège.....	18
1.8.1. Provenance.....	18
1.8.2. Propriétés du liège .....	19
1.8.3. Les différents types de liège.....	23
1.8.4. L'utilisation des granulats de liège .....	23

1.8.5.	Autres applications.....	25
1.8.6.	L'exploitation du liège en Algérie.....	27
1.9.	Conclusion.....	27
Chapitre:02		
2.	Effet de la température de cure sur les bétons légers.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1.	Introduction.....	29
2.2.	Caractéristiques des granulats végétaux et effet de température.....	29
2.2.1.	Masse volumique.....	30
2.2.2.	Absorption.....	33
2.2.3.	Isothermes de sorption.....	35
2.3.	Effet des conditions de cure sur les performances des bétons.....	39
2.3.1.	Résistance à la Compression.....	39
2.3.2.	Absorption.....	41
2.3.3.	Microstructure.....	42
2.3.4.	Propriétés thermiques.....	44
2.3.5.	Capillarité et sorptivité.....	45
2.4.	Propriétés des composites de liège.....	47
2.4.1.	Masse volumique.....	47
2.4.2.	Résistance à la compression.....	49
2.4.3.	Résistance à la flexion.....	51
2.4.4.	Conductivité thermique.....	52
2.4.5.	Microstructure.....	54
2.5.	Récapitulatif des travaux sur les composites de liège.....	54
2.6.	Conclusion.....	56
Conclusion générale.....		57
Références bibliographiques.....		59

## Liste de Figures

<b>Figure I.1.</b> Les trois fondements du développement durable.....	4
<b>Figure I.2.</b> Evolution de la consommation énergétique mondiale (IEA, 2020).....	6
<b>Figure I.3.</b> Consommation énergétique mondiale par secteur (IEA, 2020) .....	6
<b>Figure I.4.</b> Répartition de la consommation énergétique finale par secteur (APRUE, 2017) .....	7
<b>Figure I.5.</b> Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type d'énergie. (APRUE, 2017)	8
<b>Figure I.6.</b> Comparaison entre une maison bien isolée et non isolée .....	9
<b>Figure I.7.</b> A droite, isolation par l'extérieur entourant complètement la structure. A gauche, isolation par l'intérieur : plusieurs ponts thermiques sont inévitables à chaque étage. (Morel et Gnansounou, 2008).....	11
<b>Figure I.8.</b> Isolation intégrée au matériau porteur (Source : site internet conseils-isolation-France.com).....	11
<b>Figure I.9.</b> Représentation schématique des différents types de bétons légers (Shink, 2003) .....	13
<b>Figure I.10.</b> Fibres de chanvre brutes et les particules de chènevotte (Magniont, 2010).....	15
<b>Figure I.11.</b> Tiges de tournesol broyées et moelle de tournesol (Magniont, 2010). .....	15
<b>Figure I.12.</b> Cocotier et fibres de noix de coco (Ali, 2012). .....	16
<b>Figure I.13.</b> Fibres de palmier dattier (Abani, 2015). .....	17
<b>Figure I.14.</b> Plante et fibres découpées de Diss (Achour, 2017). .....	18
<b>Figure I.15.</b> Plante et fibres brutes découpées de Doum (Achour, 2017). .....	18
<b>Figure I.16.</b> Distribution du chêne-liège dans le bassin méditerranéen occidental (Garavaglia et Besacier, 2012).....	19
<b>Figure I.17.</b> Structure et composition du liège (Soutehi, 2010).....	21
<b>Figure I.18.</b> Représentation schématique d'une coupe transversale d'un tronc de chêne- liège (CBL, 2006) (modifié par Arrache, 2018).....	21
<b>Figure I.19.</b> Apparence anatomique du liège de reproduction après dilatation de gaz à 350°C :.....	22
A gauche, Section tangentielle ; A droite, section radiale (Pereira, 2015).....	22
<b>Figure I.20.</b> Schéma explicatif de la structure tridimensionnelle du liège (Pereira, 2007).....	22
<b>Figure I.21.</b> Tronc d'un chêne de liège dans sa troisième récolte (Pereira, 2007) .....	23
<b>Figure I.22.</b> Le liège utilisé comme bouchon de bouteilles (Source : site ecobati.com).....	24
<b>Figure I.23.</b> A droite, les panneaux d'isolation par l'intérieur (Manuel, 2012). A gauche, isolation par l'extérieur et décoration avec des panneaux de liège (Source : site ecobati.com) .....	24
<b>Figure I.24.</b> Mortier cimentaire à base de liège (Boussetoua et coll., 2017) .....	25
<b>Figure I.25.</b> Future tendance, Design et décoration en liège (Source : site iso-cork.com).....	25
<b>Figure I.26.</b> Recyclage des bouchons inexploités en produits utiles (Source : site planeteliège.com). 26	
<b>Figure I.27.</b> Bouchons de liège recyclés en chaises (Source : site freshidees.com).....	26

<b>Figure I.27.</b> Les applications principales du liège dans le bâtiment (source : Amorim, VIVEXPO 2012)	27
<b>Figure II.1.</b> Evolution de la masse de la paille en fonction du traitement (Bederina et coll.,2016).....	31
<b>Figure II.2.</b> Coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales après 24 heures d'immersion (Magniont, 2010).....	33
<b>Figure II.3.</b> Absorption des fibres de Diss et Doum (Achour et coll, 2017) .....	34
<b>Figure II.4.</b> Absorption d'eau du DPF3 et du DPF6 en fonction du temps d'immersion (Benmansour et coll., 2014) .....	34
<b>Figure II.5.</b> Influence de la température sur l'absorption des granulats d'OPS (Traoré et coll., 2018)	35
<b>Figure II.6.</b> Isothermes de sorption/désorption de vapeur d'eau à 20 °C des particules de chènevotte(Cérézo, 2005) .....	36
<b>Figure II.7.</b> Isotherme de sorption/désorption de vapeur d'eau à 25°C de la moelle de tournesol et de la Chènevotte (Magniont, 2010) .....	37
<b>Figure II.8.</b> Isothermes de sorption du coton (HO THI, Thu Nga, 2008).....	38
<b>Figure II.9.</b> Influence de la température sur l'absorption du coton (HO THI, Thu Nga, 2008).....	38
<b>Figure II.10.</b> Développement de la résistance à la compression du composite à base de POFA pour les périodes 7-28, 28-90 et 90-180 et pour différentes températures (Salih et coll,2015).....	39
<b>Figure II.11.</b> Résistance à la compression des mortiers à base de ciment de portland en fonction de la température durant les premiers 7 jours de cure (Boubekeur et coll., 2014) .....	40
<b>Figure II.12.</b> Résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'augmentation des taux de substitution des particules MP à température de cure 20 °, 30 ° et 40 °C (Alqahtani et coll., 2019)...	40
<b>Figure II.13.</b> Résistance à la compression des mortiers de chanvre et balle de riz sous différentes conditions de cure à 28 jours (Chabannes et coll., 2016) .....	41
<b>Figure II-14.</b> Absorption d'eau des mélanges légers après 7 et 28 jours de cure en fonction de la température (Rehman et coll., 2019).....	42
<b>Figure II.15.</b> Images MEB des mortiers à base de laitier (Jiang et coll., 2018).....	43
<b>Figure II.16.</b> Microstructure des composites de chanvre conservés sous température ambiante (a) et température élevée (b) (Chabannes et coll., 2016) .....	44
<b>Figure II.17.</b> Conductivité thermique des bétons légers en fonction de la température (Nguyen et coll., 2017) .....	44
<b>Figure II.18.</b> Chaleur spécifique des bétons légers en fonction de la température (Nguyen et coll., 2017).....	45
<b>Figure II.19.</b> Influence de la température de durcissement sur l'absorption capillaire des bétons (Liu et coll., 2018) .....	46
<b>Figure II.20.</b> L'influence de la température de durcissement sur le coefficient de sorptivité du béton à base des granulats minéraux (Liu et coll., 2018) .....	47
<b>Figure II.21.</b> Evolution de la masse volumique de béton de liège étudié en fonction des taux de liège incorporés (Ziregue et coll., 2016) .....	48



<b>Figure II.22.</b> La masse volumique des échantillons à 84 jours avec son écart type (Boussetoua et coll., 2017).....	48
<b>Figure II.23.</b> Effet des granulats de liège sur la résistance à la compression du composite (Karade, 2015).....	50
<b>Figure II.24.</b> Résistance à la compression des bétons à 28 jours sous différentes conditions de cure (immersion dans l'eau de béton à température d'environ 23°C) (Riouchi et Belguendouzi, 2019).....	51
<b>Figure II.25.</b> Résistance moyenne à la flexion des mortiers de liège (Boussetoua et coll., 2017) .....	51
<b>Figure II.26.</b> Effet de l'ajout des granulats de liège sur la résistance à la flexion de composite (Karade, 2015).....	52
<b>Figure II.27.</b> Conductivité thermique des bétons de liège (Panesar et Shindman, 2012) .....	53
<b>Figure II.28.</b> Conductivité thermique des bétons de liège en fonction du traitement appliqué (Dahmani et Houari, 2019) .....	53
<b>Figure II.29.</b> Image MEB d'un composite contenant 65% de liège (Novais et coll., 2019) .....	54

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Réalisation de logements publics entre 2015-2018 en milieu urbain (Source : Ministère de l'habitat) .....	4
<b>Tableau I.2 :</b> Les résultats d'analyse quantitative de la composition chimique du liège. 20(Silva et coll., 2005).....	20
<b>Tableau II.1.</b> Masses volumiques des granulats de chènevotte (Chabanne, 2016).....	30
<b>Tableau II.2.</b> Masses volumiques des granulats de balle de Riz (Chabanne, 2016).....	30
<b>Tableau II.3.</b> Résultats sur la littérature des masses volumiques apparentes (Niyigena, 2016) .....	31
<b>Tableau II.4.</b> Masses volumiques de chènevotte et de tournesol à l'état sec (Nozahic, 2012).....	31
<b>Tableau II.5.</b> Effet du traitement thermique sur la masse volumique des particules d'OPS (Traoré et coll., 2018) .....	33
<b>Tableau II.6.</b> Résistance à la compression des granulats de liège (CC) durcis ou des billes d'EPS (CE) pour les taux d'incorporation étudiés(Brás et coll., 2013).....	49
<b>Tableau II.7.</b> Résistance à la compression des chapes légères (M) et références (R) (Moreira et coll., 2014).....	49
<b>Tableau II.8.</b> Récapitulatif des travaux récents sur les composites de liège .....	55

# Introduction générale

La production journalière mondiale du béton est en moyenne de 16 393 442 m<sup>3</sup>. Ce matériau est largement utilisé dans la construction et les travaux publics. Le béton doit être formulé pour rester robuste et durable pendant une longue période (**Yermak, 2015**).

Compte tenu des exigences actuelles et devant les besoins croissants des ressources des matières premières notamment dans le secteur du bâtiment, il est devenu nécessaire d'étudier toutes les possibilités liées aux problématiques de protection des ressources naturelles, d'économies d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) particulièrement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dont le secteur de construction est responsable de 25%.

Les analyses de cycle de vie des bâtiments actuels montrent que la majeure partie de leur impact environnemental provient d'une part des matériaux de construction utilisés et d'autre part de l'énergie consommée pour leur chauffage qui lui-même est lié à l'efficacité de leur isolation thermique. Il est donc aujourd'hui important de pouvoir disposer d'éléments ou parties d'ouvrages pour la construction dont le matériau constitutif présente un faible impact sur l'environnement et qui participe à l'isolation thermique dans un bâtiment du fait de sa performance thermique (**JACQUEMOT, 2015**).

Ces dernières années, en plus de la grande attention qui a été accordée à la réduction de la consommation des ressources non-renouvelables, plusieurs études ont été menées sur l'élaboration et le développement de nouveaux matériaux connus sous le nom de bétons légers. Le béton léger à base de déchets industriels ou de particules végétales réduit les coûts de construction, facilite la construction et présente l'avantage d'être un matériau de construction ami de la nature (Eco-friendly concrete).

Etant donné que l'Algérie est aussi mise face aux défis du développement durable et de consommation énergétique élevée dans le secteur de la construction, des politiques sont mises en œuvre afin de trouver une stratégie de développement durable reposant sur différents axes. Parmi ces axes, la recherche de leviers technologiques en faveur de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel. Ces leviers peuvent se concrétiser par l'application d'une isolation thermique des parois constituant l'enveloppe du bâtiment, la bonne orientation de ce dernier ; mais surtout par choix optimal des matériaux de construction. Ainsi, la prospection et l'exploration de toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets, des coproduits industriels et surtout des ressources végétales (puisque ce sont les plus économiques et les plus sains) est devenu nécessaire pour limiter la consommation énergétique et l'impact des matériaux cimentaires sur l'environnement.

Parmi les riches ressources dont jouit notre pays, le liège matériau obtenu à partir de l'écorce de chêne-liège (*Quercus suber*) (**Ziregue et coll., 2016**). Le liège, en plus de sa légèreté, il présente des performances intéressantes : Il est élastique et flexible, imperméable aux gaz et aux liquides, durable et est un bon isolant thermique et phonique. La légèreté du liège est due à sa structure morphologique spécifique qui diffère complètement de celle des granulats minéraux. L'incorporation des granulats de liège dans

des matrices cimentaires a fait l'objet de nombreux travaux de recherche ces dernières années. Cependant, ces travaux n'ont pas permis de faire le tour de l'ensemble des aspects et des paramètres influençant les propriétés de ce type de composites. De plus, les conditions climatiques sont des paramètres qui ont montré leur influence sur les propriétés de plusieurs matériaux dans la nature. En effet, la sensibilité des granulats végétaux vis-à-vis de l'humidité et de la température a été démontrée par la littérature. Ainsi, la maîtrise de la température de cure des bétons qui contiennent des particules végétales est un paramètre clé dans l'optimisation des propriétés du composite béton de liège.

Le manuscrit que nous avons élaboré est la synthèse d'une recherche bibliographique ayant pour objectif majeur l'étude de l'influence de la température de cure sur les performances des composites de liège.

Ce travail est organisé en deux chapitres :

Dans le premier chapitre, les concepts de base liés au contexte général de notre étude sont présentés. Nous discutons dans un premier temps, les notions du développement durable ainsi que l'impact du secteur de construction sur la dégradation de l'environnement et la consommation énergétique. Ensuite, nous présentons une synthèse bibliographique qui met l'accent sur l'utilisation des bétons verts à base de particules végétales. Ce premier chapitre sera clôturé par la présentation des propriétés et des applications de la plante sujet de notre intérêt : le liège.

Le deuxième chapitre est consacré dans sa première partie à un état de l'art qui traite l'influence de la température qui a une importance cruciale dans notre recherche sur les propriétés des particules végétales ainsi que sur le comportement des bétons à base de ces granulats légers. La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à la présentation des propriétés des composites de liège. Nous terminerons par un récapitulatif des travaux réalisés au laboratoire sur l'influence des températures de cure sur le comportement de ce type de composite, ce qui permet d'identifier la réelle nécessité d'un travail expérimental approfondi.

## Chapitre1 : Bétons légers et isolation

### 1. Bétons légers et isolation

#### 1.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, une étude bibliographique relative à l'impact du secteur du bâtiment sur l'environnement. Le problème crucial s'avère être la forte consommation énergétique lié à ce secteur qui n'est pas compatible avec le développement durable. C'est à ce propos que nous nous sommes focalisés sur les solutions qui vont dans le sens de l'efficacité énergétique tout en mettant en exergue les avantages que nous pouvons tirer de l'isolation thermique. Les actions à envisager pour atteindre cet objectif sont multiples ; toutefois nous avons privilégié, dans notre recherche, l'utilisation de matériaux cimentaires à base de granulats biosourcés. A la fin, nous mettrons en avant les mérites du liège, disponible en quantité dans notre région.

#### 1.2. Le bâtiment et l'environnement

##### 1.2.1. Développement durable

Le développement durable est une notion apparue au début des années 1970, par la conjonction du premier choc pétrolier et du rapport « The limits to growth » rédigé par les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) pour le Club de Rome (**Meadows et coll., 1972**)(Vauge, 2013).

Le concept de développement durable tente de réorienter le développement vers un modèle qui crée des liens entre l'économie, la société et l'environnement (**BROCHARD, 2011**).

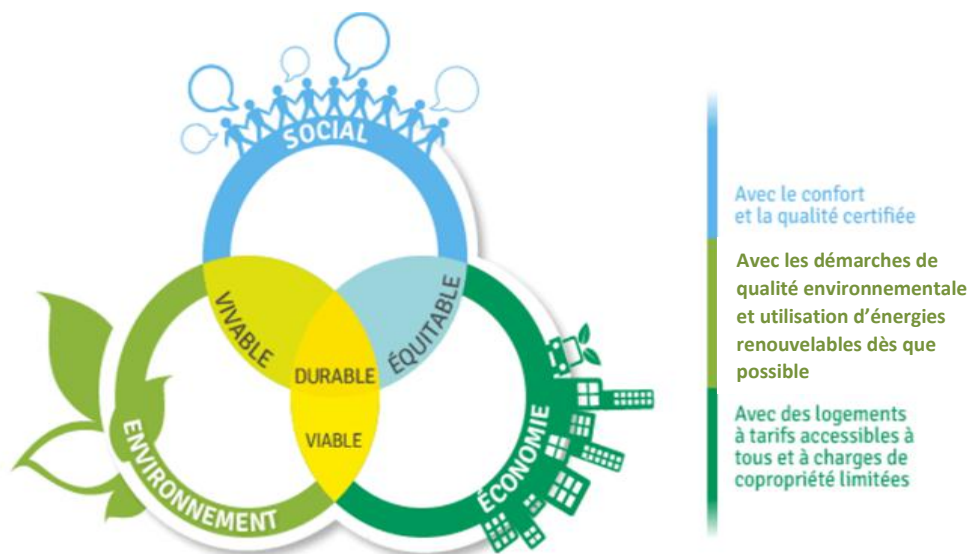
Le développement durable a été défini dans le rapport de la commission Brundtland comme : «Un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes en répartissant équitablement les fruits de la croissance, sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire leurs besoins».G.Brundtland Rapport Notre avenir à tous, 1987 (**Source : site internet 'diplomatie.gouv'**).

Ce dernier s'appuie à la fois sur les domaines écologiques, économique et socio-culturel. C'est-à-dire qu'il s'agit d'un développement à la fois écologiquement soutenable, économiquement efficace et socialement équitable (Fig. I.1)(**Niyigena,2016**).

##### 1.2.1.1. Rapport National Volontaire Algérie 2019 : Les objectifs du développement durable

L'Algérie a fait le choix d'intégrer le développement durable dans sa politique de développement et dans les grands principes de la Nation à travers l'adoption, en 2016, de

dispositions constitutionnelles qui font explicitement référence au concept du développement durable et à ses principes clés.



**Figure I.1.** Les trois fondements du développement durable (Crédit Agricole immobilier)

L'Algérie, comme bien d'autres pays dans le monde, s'attèle à bâtir une économie productive et compétitive dans le cadre d'un développement durable et de la préservation de l'environnement. Aussi l'un des enjeux importants qui se pose avec acuité aux décideurs est celui de pouvoir gérer de manière optimale la demande sans cesse croissante en matière de logement. Le Tableau. I.1 montre que pour le quadriennat 2015-2018, 150.000 à 200.000 logements sont réalisés par an.

A-t-on dans ces programmes suivi les impératifs du développement durable ? La question mérite que lui soit consacrée une étude rétrospective sur les outils réglementaires et moyens utilisés dans l'ensemble des chantiers de réalisation de ces logements en milieu urbain.

**Tableau I.1.** Réalisation de logements publics entre 2015-2018 en milieu urbain (Source : Ministère de l'habitat)

Année	2015	2016	2017	2018	Total
Logements publics locatifs (y compris résorption habitat précaire)	118 472	115 275	95 159	105 934	434 840
Logements promotionnels aidés	27 630	24 871	20 371	18 633	91 505
Logements location-vente	3 204	17 120	49 908	64 048	134 280
Logements promotionnels publics	0	4381	9535	6113	20 029
<b>Total urbain</b>	<b>149 306</b>	<b>161 647</b>	<b>194 728</b>	<b>194 728</b>	<b>680 654</b>

## 1.3. Efficacité énergétique

### 1.3.1. Qu'est-ce l'efficacité énergétique ?

Dans la littérature, Il existe plusieurs définitions de l'efficacité énergétique. Cependant, les plus répandues sont les deux suivantes :

- L'efficacité énergétique est le rapport entre le service délivré au sens large (performance, produit, énergie, confort, service) et l'énergie qui y a été consacrée (**Robillard, 2011**).
- Elle se définit aussi comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu (**De Béthencourt et coll., 2013**).

Ces deux définitions ont un point commun, c'est que l'efficacité énergétique est le rapport entre ce que produit le dispositif ou le système, et ce qu'il consomme comme énergie. Son but s'appuie sur l'utilisation moindre en énergie faisant l'objet de nombreux usages, nous citons:

- **Le chauffage** et/ou le **refroidissement**, pour assurer un climat intérieur confortable,
- **La circulation** de fluides tels que l'air (ventilation) et l'eau (eau chaude, chauffage),
- **Le transport** (ascenseurs),
- **L'éclairage**,
- **La communication** (téléphone, radio, télévision),
- **La production** de biens (fabriques, cuisines, couture, etc.).

### 1.3.2. Consommation énergétique

#### 1.3.2.1. Consommation énergétique mondiale

Avant la révolution industrielle, la consommation énergétique mondiale était de 305 Mtep (énergie commerciale seulement). 97 % de cette énergie étant issue de l'exploitation de la biomasse (en particulier du bois) et 3 % par le charbon, ce combustible devenant hégémonique au début du XX<sup>e</sup> siècle en raison des besoins massifs des machines à vapeur. (**IEA, 2015**)

Le rapport de l'agence internationale de l'énergie (IEA) en 2019, compare l'évolution de la répartition d'énergie finale dans le monde en allant de 1990 à 2017. L'analyse de la figure I.2 montre que la consommation énergétique a augmenté de 55 % dans une période d'un quart de siècle environ.

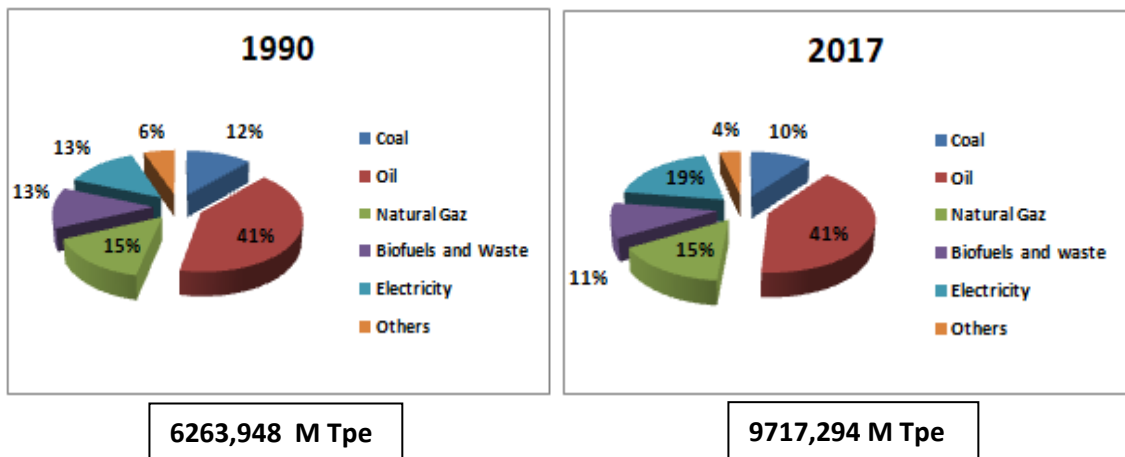


Figure 2. Evolution de la consommation énergétique mondiale (IEA, 2020).

### 1.3.2.2. Consommation énergétique mondiale du secteur du bâtiment

Les secteurs des bâtiments et de la construction de bâtiment combinés sont responsables de plus d'un tiers de la consommation d'énergie finale mondiale et de près de 40 % des émissions totales de CO<sub>2</sub> directes et indirectes. (IEA, 2020)

La demande énergétique des bâtiments continue à augmenter, tirée par un meilleur accès à l'énergie dans les pays en développement, une plus grande propriété et utilisation d'appareils consommateurs d'énergie et une croissance rapide de la surface de plancher des bâtiments dans le monde. Le secteur résidentiel représente à lui seul plus de 22% de la consommation d'énergie mondiale finale en 2017 selon (IEA, 2020) et occupe la troisième place dans le classement des secteurs après le secteur industriel et celui du transport qui représentent 30 et 29% de la consommation totale, respectivement. Comparée avec celle enregistrée en 1990, cette consommation a diminué d'environ 3%, parce que L'IEA travaille avec les décideurs politiques et les parties prenantes pour intensifier l'action sur l'efficacité énergétique afin d'atténuer le changement climatique, d'améliorer la sécurité énergétique et de faire croître les économies tout en apportant des avantages environnementaux et sociaux (Fig. 1.3).

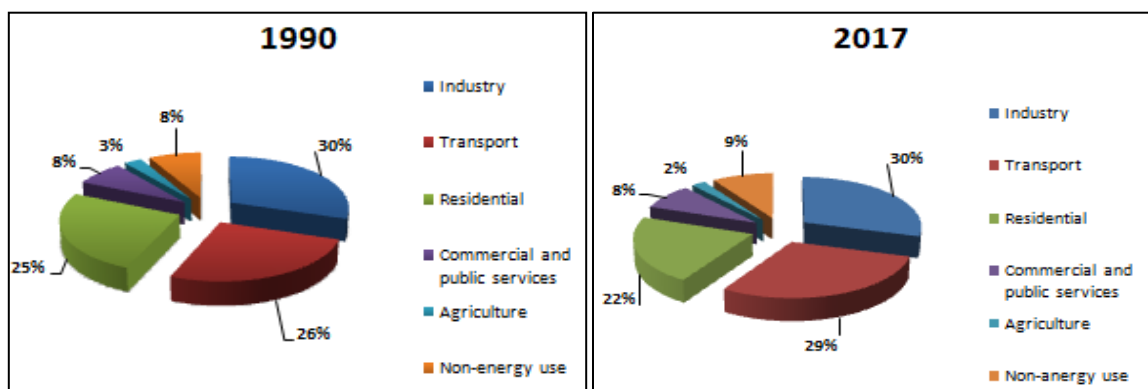


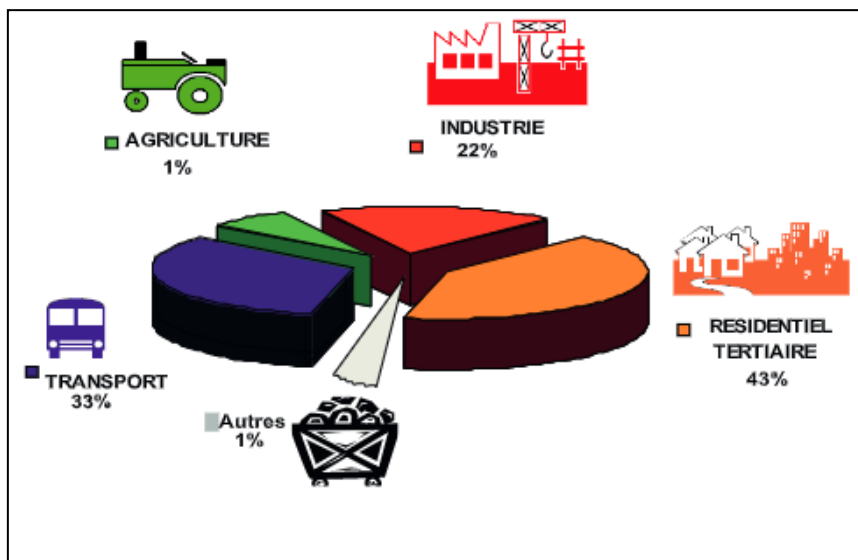
Figure 1.3. Consommation énergétique mondiale par secteur (IEA, 2020)



### 1.3.2.3. Tendance énergétique dans le bâtiment en Algérie

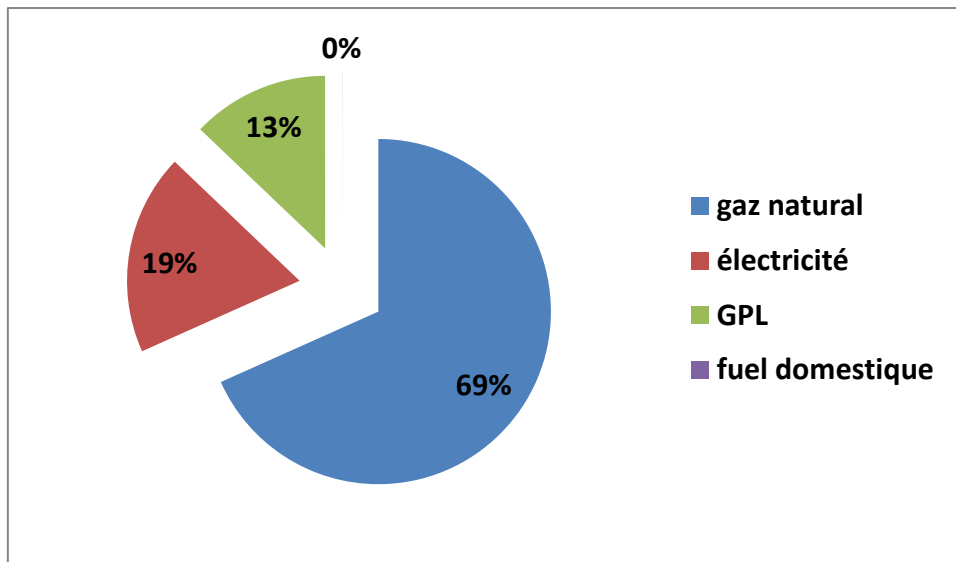
En Algérie, et selon les dernières statistiques de l'APRUE (Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie), le secteur du bâtiment est à l'origine de 43% de la consommation d'énergie finale dans le pays. Les perspectives de développement du parc immobilier engendreront un accroissement certain de la consommation d'énergie. Par ailleurs, avec son climat aride et semi-aride, l'Algérie est très vulnérable aux changements climatiques. En effet, on assiste à des étés caniculaires et des hivers très rudes, d'où la nécessité d'isoler les maisons pour à la fois améliorer le confort et réduire les consommations de chauffage et de rafraîchissement. L'enjeu économique est de taille, et de ce fait la maîtrise de la consommation énergétique dans le bâtiment devient primordiale et constitue un défi pour les prochaines décennies (APRUE, 2019).

Selon le bilan énergétique national, la Fig. I.4 représente la consommation énergétique finale par secteur d'activité.



**Figure I.4.** Répartition de la consommation énergétique finale par secteur (APRUE, 2017)

La consommation électrique du secteur résidentiel représente 19% de la consommation totale de l'électricité et représente 69% de la consommation totale des produits gazeux. Il représente, de ce fait, le premier secteur grand consommateur d'énergie au niveau national. (Figure I.5). La consommation du secteur Résidentiel dans les logements collectifs correspond à 35% de la consommation totale et 65% dans les logements individuels (APRUE, 2017).



**Figure I.5.** Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type d'énergie.  
(APRUE, 2017)

## 1.4. Secteur du bâtiment et l'environnement

Dans le but de la préservation de l'environnement en intégrant les exigences du développement durable et face aux besoins croissants des ressources en matériaux, il est plus que nécessaire de repenser les modes de construction actuelles dans le secteur du bâtiment car ce dernier est responsable d'environ un quart des émissions de gaz à effet de serre (GES). De plus, face à la raréfaction des matières premières, il convient de rechercher de nouvelles ressources. En effet, l'usage des produits d'origine végétale comme matière première est une alternative qui connaît un essor considérable, par la substitution des granulats d'origine minérale par les granulats d'origine végétale.

Durant toutes les phases de la vie du bâtiment (construction, exploitation, réhabilitation et destruction), celui-ci affecte fortement l'environnement à travers l'utilisation de ressources naturelles (roches, bois, eau...) et l'énergie (processus de construction, transport, chauffage, éclairage...) (**Chamoïn, 2013**). De plus, si un bâtiment est bien conçu et construit, il peut fournir un confort nettement supérieur. Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides pour raccourcir la saison de chauffage (**Morel et Gnansounou, 2008**).

## 1.5. L'isolation thermique

### 1.5.1. Nécessité de l'isolation thermique

L'enveloppe d'un bâtiment est en interaction constante avec l'environnement extérieur et l'air intérieur qu'on souhaite maintenir sur une plage restreinte de température et

d'hygrométrie. La majorité des matériaux utilisés dans le domaine du bâtiment étant des milieux poreux, les parois sont le siège de transferts de chaleur et de vapeur d'eau (**Lelièvre, 2015**).

Alors que deux éléments en contact se mettent à des températures différentes, un échange de chaleur se produit entre eux jusqu'à ce que leurs températures s'équilibrent. Dans ce cas, le rôle de l'isolation est de freiner cet échange thermique, et garder aussi la température des parois la plus proche possible de celle de l'air intérieur. La Fig. I.6 montre l'importance de l'isolation des bâtiments.

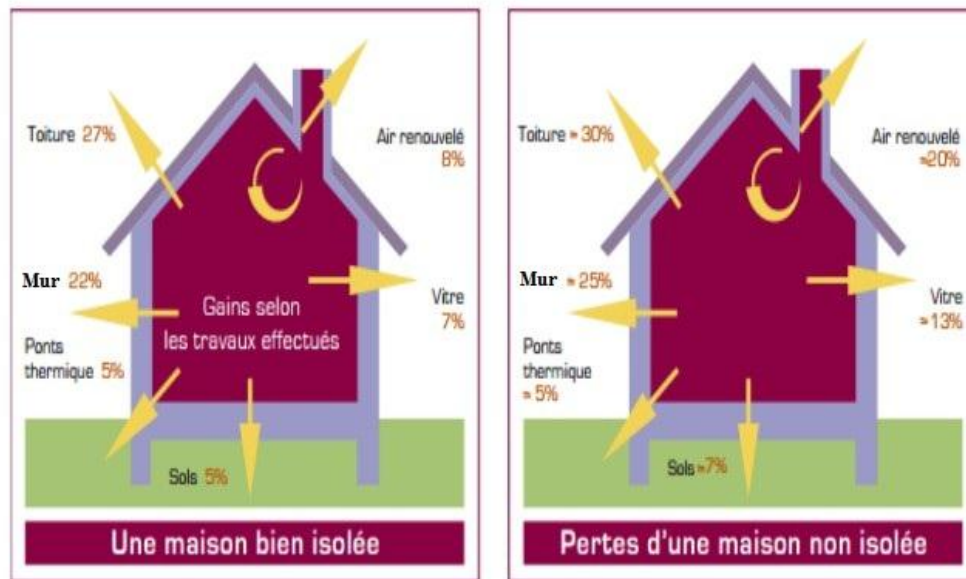


Figure I.6. Comparaison entre une maison bien isolée et non isolée (ADEME)

### 1.5.2. Déperditions thermiques

Les pertes d'énergie d'un bâtiment sont en majorité dues à une enveloppe inadaptée. L'enveloppe comprend les murs, les sols, le toit, les portes et les fenêtres. Des majorations doivent être appliquées aux déperditions. Ces majorations sont dues :

- A l'orientation : les parois orientées vers le nord ou vers l'est sont soumises à des déperditions plus importantes
- Aux vents : les parois exposées aux vents sont soumises à des déperditions plus importantes.

L'impact des ponts thermiques sur les déperditions thermiques globales du logement sera fonction de leur nombre et de leur importance (matériaux, longueur et épaisseur). Les ponts thermiques sont les déperditions provoquées par des liaisons d'éléments constructifs entre eux (dalle, mur, menuiserie, poutres...). Ces pertes de chaleur (ou de fraîcheur en été) s'ajoutent aux déperditions dites surfaciques (**Rieser, 2012**).

La répartition des déperditions dans une habitation non isolée est illustrée par la Fig. I.6. On compte approximativement des valeurs de déperditions thermiques de l'ordre de :

- Toits : 30 %,
- Murs : 25 %,
- Renouvellement d'air : 20 %,
- Les vitres (Portes fenêtres) : 13 %,
- Sols : 7 %,
- Ponts thermiques : 5 %

Il est clair qu'une grande partie des déperditions de chaleur (>50%) se fait par les toits et les murs, par conséquent une bonne isolation thermique des parois permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60%.

### 1.5.3. Types d'isolation

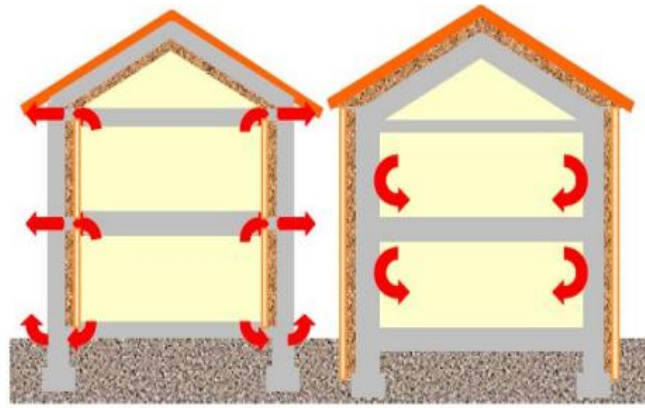
Il existe trois types d'isolation des parois :

#### 1.5.3.1. Isolation par l'intérieur

Ce type d'isolation est le plus répandu, il est facile à mettre en œuvre, et nécessite des travaux directement dans l'espace intérieur du logement en mettant l'isolant sur la face intérieure du mur. L'isolation intérieure laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire. En revanche, elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter (**Soutehi, 2010**).

#### 1.5.3.2. Isolation par l'extérieur

Contrairement à l'isolation par l'intérieur, cette isolation consiste à installer l'isolant sur la surface extérieure du mur. C'est souvent la solution la plus coûteuse ; mais aussi la plus performante. Elle constitue la meilleure isolation pour le confort d'été et d'hiver, car elle permet de conserver l'inertie thermique forte des murs intérieurs et supprime les ponts thermiques. La Fig. 1.7 illustre clairement les deux modes d'isolation précités (**BEN HMID et coll., 2010**).



**Figure I.7.** A droite, isolation par l'extérieur entourant complètement la structure. A gauche, isolation par l'intérieur : plusieurs ponts thermiques sont inévitables à chaque étage. (Morel et Gnansounou, 2008)

### 1.5.3.3. Isolation intégrée au matériau porteur

Cette solution (Fig. I.8) utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure : béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est généralement utilisée en construction neuve. Elle est performante et durable. La recherche des conditions de confort de l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois (Soutehi, 2010).



**Figure I.8.** Isolation intégrée au matériau porteur (Source : site internet conseils-isolation-France.com)

### 1.5.4. Matériaux d'isolation

Comme indiqué dans les paragraphes précédents, l'isolation thermique du bâtiment peut réduire énormément sa consommation énergétique. Cette isolation peut se faire, en

utilisant différentes techniques et en incorporant des isolants de différentes natures. Ces isolants peuvent être **(Soutehi, 2010), (Bocquet, 2013)** :

- **répartis** : tels que la brique de terre cuite ou le béton cellulaire,
- **d'origine minérale** : laine de verre, laine de roche,
- **d'origine pétro chimique** : Tel que le polystyrène et polyuréthane,
- **Isolants réflecteurs** : Isolants minces,
- **Isolants d'origine animale** : laine de mouton, plumes de canard,
- **Isolants d'origine végétale** : sont les plus employés en construction écologique : laine et fibre de bois, laine de chanvre, de coton, de coco, de lin, ouate de cellulose, bottes de paille, liège... etc. Ces isolants largement utilisés ont un faible impact environnemental et semblent répondre à ces exigences grâce à leurs qualités thermiques. Ils peuvent être aussi performants que les matériaux industrialisés, pour des applications aussi bien au niveau de l'isolation aux bruits aériens, de l'isolation aux bruits de chocs et de l'absorption acoustique.

## 1.6. Les bétons légers

Le béton en général est un mélange composé de ciment, sable, granulats minéraux rigides et d'eau. Cette formulation de base peut être agrémentée d'adjuvants pour améliorer certaines propriétés particulières. Ce matériau appelé béton ordinaire présente des propriétés structurales intéressantes et une bonne durabilité. Il a une masse volumique élevée qui varie de 2200 à 2600 Kg/m<sup>3</sup>. Cependant, il présente une performance moins intéressante sur le plan de l'isolation thermique **(Cerezo,2005)**.

A cause de la faible performance thermique du béton ordinaire, et dans le but de répondre aux critères de l'efficacité énergétique, un autre type de béton a été fabriqué pour l'utilisation dans la construction ; il s'agit des bétons légers qui se caractérisent couramment par une masse volumique plus faible que celle des bétons ordinaires, variant entre 300 à 1900 kg/m<sup>3</sup> ainsi qu'une résistance à la compression à 28 jours inférieure à 17 MPa. Ces bétons légers se caractérisent principalement par une meilleure isolation thermique, une résistance à la chaleur et au feu, résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction **(Shink M., 2003)**.

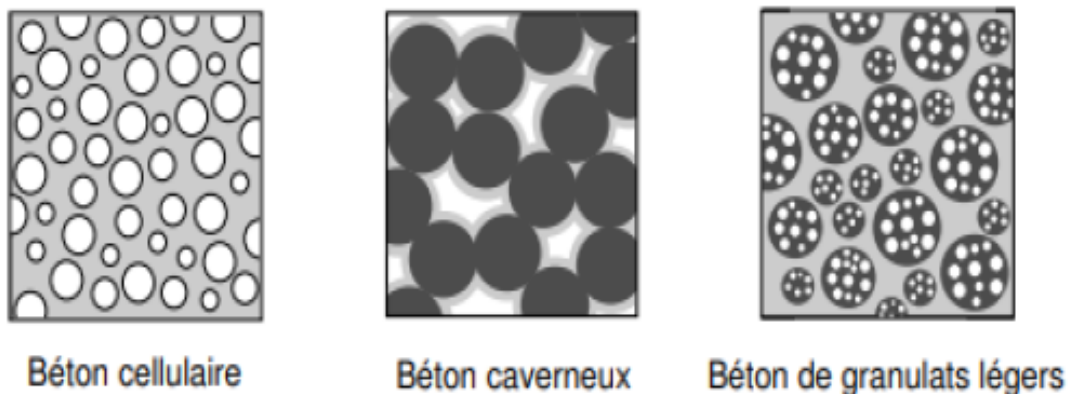
A côtés de ses propriétés d'isolation thermique ils possèdent aussi des propriétés phoniques et acoustiques intéressantes. Ce matériau présente aussi un faible impact sur l'environnement.

### 1.6.1. Types de bétons légers

La masse volumique dans ce type de béton va diminuer à cause de l'augmentation de la quantité d'air entre les granulats. Les endroits possibles pour incorporer de l'air donnent trois types de béton légers (Fig. I.9), en l'occurrence :

- dans la matrice ou dans la forme générale : le béton cellulaire,
- entre les gros granulats : béton caverneux,

- dans les granulats : béton de granulats légers,



**Figure 9.** Représentation schématique des différents types de bétons légers (Shink, 2003)

En fonction de leur nature, on peut distinguer deux types de granulats légers qui peuvent être incorporés dans le béton :

- Les granulats minéraux naturellement poreux qui se trouvent dans les ponces ou les roches sédimentaires comme les calcaires,
- Les autres granulats naturellement poreux sont d'origine végétale. Il s'agit pour la plupart de déchets organiques comme le bois, la tige de maïs, la coque de noix de coco, le bambou, etc. (Cerezo, 2005).

## 1.7. Bétons à base des granulats végétaux

### 1.7.1. Généralités

Historiquement, le renforcement des matériaux de construction par des particules naturelles fut très tôt utilisé par nos aïeux. L'utilisation de la paille pour renforcer les blocs de terre crue et le crin de cheval ajoutés aux enduits en sont des exemples remontant à plusieurs milliers d'années.

Actuellement les granulats minéraux représentent après l'eau, le produit naturel le plus consommé dans le monde. En plus de sa consommation excessive et de sa demande croissante, son extraction joue un rôle principal dans la pollution de l'environnement à la fois par la nuisance pour le voisinage des carrières exploitées et surtout par l'augmentation des gaz à effet de serre générés. D'autre part, le secteur de la construction exige de nouvelles réglementations qui nécessitent l'utilisation de nouveaux matériaux qui ont un faible impact sur l'environnement au cours de leur vie. C'est la raison pour laquelle l'utilisation des bétons végétaux s'intensifie dans ce secteur afin de construire de manière

durable et écologique. Il est à rappeler que ces matériaux ont également de bonnes caractéristiques thermiques, acoustiques et hygrométriques (**Niyigena, 2016**).

Contrairement à la matière minérale, l'incorporation des particules végétales offre au béton fabriqué deux avantages (**Magniont, 2010**) :

- Premièrement ces granulats sont disponibles dans la nature avec un faible coût économique, leur consommation énergétique faible et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles,
- Deuxièmement, la valorisation des particules végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, neutres vis-à-vis des émissions de CO<sub>2</sub> et demandant peu d'énergie pour être produites.

Les faibles propriétés mécaniques des bétons végétaux limitent leur utilisation à des structures non porteuses. En revanche, leur comportement thermo-acoustique et leur légèreté permettent d'utiliser ce type de granulat dans les structures autoporteuses par exemple : dans les murs non porteurs, les cloisons, les dallages sur terre-plein, les planchers d'étage et le remplissage des parois d'une ossature en bois. (**Akkaoui, 2014**).

L'Algérie est un pays qui compte une richesse végétale diversifiée dans presque toutes ses régions, à savoir dans les régions montagneuses, les hauts Plateaux et les régions sahariennes. Les espèces les plus répandues sont : le liège, l'alfa, le diss, le doum, le palmier dattier, le Pin, le coton, le lin, etc. Donc, il paraît intéressant de connaître les possibilités offertes par ces végétaux en vue de fabriquer des bétons légers. Dans la partie qui suit, nous citons les résultats de quelques travaux de recherche relativement récents sur la question.

### 1.7.2. Littérature sur les bétons végétaux

Après avoir donné la définition des bétons légers ainsi qu'un bref historique sur la nature des différentes particules végétales utilisées, nous présentons, dans ce qui suit et de manière chronologique, les résultats de certains travaux de recherche réalisés sur ces matériaux de construction :

#### **(Magniont, 2010) :**

L'objectif de cette étude était de développer un mélange léger par l'utilisation d'une matrice alternative sans ciment, renforcée par des granulats végétaux de chènevotte du chanvre et la moelle de tournesol (Fig. I.10 et I.11). Lors de cette étude, deux objectifs ont été visés : le premier est l'incorporation des fibres végétales dans des plaques de parement ou la préparation d'un enduit de projection, le second, est la fabrication de blocs autoporteurs à isolation répartie incluant des granulats végétaux. Les résultats obtenus avec les mélanges à base de moelle de tournesol étaient prometteurs grâce à leur très faible densité (10 fois plus faible que celle de la chènevotte). Pour un dosage volumique équivalent en termes de dosage massique, les particules de tournesol sont très réduites comparant avec les



particules de chènevotte, ceci limite par la suite la quantité d'eau absorbée par les particules végétales et permet aussi d'améliorer les performances mécaniques de la pâte.



**Figure I.10.**Fibres de chanvre brutes et les particules de chènevotte(**Magniont, 2010**).



**Figure I.11.**Tiges de tournesol broyées et moelle de tournesol(**Magniont, 2010**).

**(Tran Le, 2010) :**

Cet auteur a montré que le béton de chanvre à base d'amidon possède des caractéristiques hygrothermiques intéressantes. La conductivité thermique des composites fabriqués qui est de l'ordre de  $0,055 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  est relativement faible comparée à  $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , valeur obtenue pour le béton de chanvre à base de chaux. L'étude réalisée a aussi montré que le local en béton de chanvre-amidon permet de réduire la consommation énergétique de 22,16 % par rapport au béton de chanvre-chaux sous les conditions hivernales.

**(Ali, 2012) :**

L'auteur a réalisé des expériences pour étudier les propriétés mécaniques et thermiques d'un béton renforcé de fibres de noix de coco (Fig I.12) avec une variation de la teneur et de la longueur des fibres. Les essais ont montré que l'incorporation des fibres de noix de coco dans le béton améliore considérablement sa résistance à la compression et à la flexion. En revanche, le module d'élasticité statique et dynamique et la densité diminuent avec l'augmentation de la teneur ou de la longueur des fibres.

**(Glé, 2013) :**

Glé a utilisé la laine de chanvre et les chènevottes dans le béton sous forme de plaques. Il a effectué des essais thermiques, acoustiques et de porosité (par trois échelles de porosité différentes). Ces essais ont montré que les chènevottes et les laines végétales sont caractérisées par des porosités supérieures à 80%, ce qui leur confère une absorption acoustique élevée (50%). Les propriétés des bétons de chanvre sont plus modérées en absorption, mais significativement meilleures en isolation. L'auteur a aussi rapporté que la concentration en liant gouverne la résistance de ces matériaux et les propriétés qui en découlent.



**Figure I.12.**Cocotier et fibres de noix de coco(Ali, 2012).

**(Abani, 2015) :**

Abani quant à lui, a choisi de produire des mortiers de plâtre renforcés par des fibres de palmier dattier pour construire une maison modèle dans le Sahara algérien. L'auteur a trouvé que l'ajout des fibres de palmier dattier dans le plâtre améliore d'une part sa résistance à la chaleur et a conclu d'autre part, que la conductivité thermique des fibres renforcées de plâtre diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres, ce qui montre

encore une fois l'intérêt de l'utilisation des particules végétales dans les composites cimentaires (Fig I.13).



**Figure I.13.**Fibres de palmier dattier(Abani, 2015).

**(Achour, 2017) :**

A utilisé des fibres végétales naturelles de Diss et de Doum (Fig. I.14 et I.15) afin de produire des mortiers verts. Dans son travail il a identifié d'une part, les propriétés chimiques et morphologiques de ces fibres après traitement par la soude(NaOH) et a étudié d'autre part, les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des mortiers renforcés par ces fibres.

Les résultats obtenus ont montré que le traitement par le NaOH à 1% pour le Doum et 3% pour le Diss, améliore l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire. De plus, l'ajout de fibres de Diss et Doum dans les mortiers cimentaires diminue leur masse volumique et leur résistance à la compression. En revanche, il améliore la résistance à la flexion et augmente l'absorption d'eau ainsi que la porosité, ce qui réduit la conductivité thermique des échantillons. Cette conductivité thermique variant entre 0,7 et 1.1 W/m.°K permet d'utiliser ce type de composites pour construire les tuiles de toiture, panneaux de ciment, briques imbriquées, tuyaux de ciment pour égout pluvial, etc.



Figure I.14. Plante et fibres découpées de Diss (Achour, 2017).



Figure I.15. Plante et fibres brutes découpées de Doum (Achour, 2017).

## 1.8. Le liège

### 1.8.1. Provenance

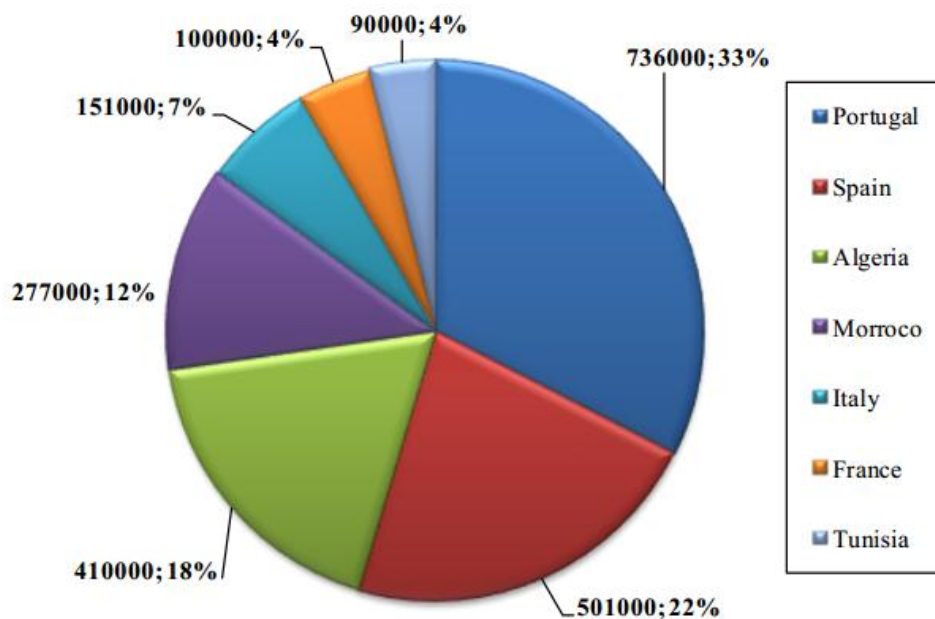
Le liège est un matériau obtenu à partir de l'écorce de chêne-liège (*Quercus suber*), qui se trouve principalement au Portugal, en Espagne et en Algérie, où les conditions météorologiques y sont favorables : été sec et humide. Dans une moindre mesure, les chênes-lièges sont également cultivés au Maroc, en Tunisie, en Italie et aussi en France (Panesar et Shindman, 2012).

Statistiquement parlant en termes de matière première, l'Algérie occupe la 3<sup>ème</sup> place après le Portugal et l'Espagne (Fig. I.16) avec un pourcentage de 18%. Néanmoins, elle occupe l'avant dernière place en termes d'exploitation de cette ressource. Les principales subéraies algériennes sont situées essentiellement en zone sub-humide au Nord autour du bassin méditerranéen (Garavaglia et Besacier, 2012).

### 1.8.2. Propriétés du liège

Nous présentons, dans ce qui suit, les principales propriétés et quelques applications de ce matériau, le liège. Les propriétés de ce matériau noble peuvent être résumées dans les points suivants (Ziregue et coll., 2016), (Penazar et Shindman, 2012), (Soutehi, 2010), (karade, 2015):

- **Légèreté**: sa faible densité est variable avec la qualité du liège. Elle est due à l'air contenu dans ses cellules,
- **Renouvelable et respectueux de l'environnement** (Eco-friendly),



**Figure I.16.** Distribution du chêne-liège dans le bassin méditerranéen occidental (Garavaglia et Besacier, 2012)

- **Mauvaise combustibilité** car il lui faut beaucoup d'oxygène pour brûler. De plus, il se carbonise en surface et cette couche empêche la propagation du feu,
- **Réduit** les émissions de  $\text{CO}_2$ ,
- **Recyclable**,
- **Imperméable** aux gaz et aux liquides : due non seulement à la contre-pression exercée par le gaz de ses cellules constitutives; mais aussi par la présence dans ses membranes d'une forte proportion de substances grasses (subérine, lignine, ...). De plus, le liège absorbe moins de 18 à 20 % d'eau si son volume augmente au bouillage, résultant essentiellement de la dilatation des gaz contenus dans ses cellules,

- **Durabilité** : du fait de sa faible perméabilité, il résiste aux agents extérieurs,
- **Élastique et flexible** : Il est comprimé rapidement dans sa limite élastique, et reprend presque instantanément 85 % de son volume initial,
- **Résistance à la biodégradation,**
- **Absorption élevée des chocs,**
- **Faible conductivité phonique et thermique** : due au fait que l'air reste enfermé dans ses cellules (minuscules compartiment étanches), il est isolé par une matière non hygroscopique et de faible poids spécifique. La conductibilité thermique interne du liège en planche est de  $0.2963 \text{ W/m}^1 \cdot \text{K}^{-1}$ , c'est la raison pour laquelle le tissu subéreux du chêne-liège est parmi les substances douées de la plus haute capacité isolante. De plus, en réduisant par compression sa taille de moitié, la pression de l'air emprisonné à l'intérieur des cellules ferme les capillarités.
- **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. Voici le tableau qui représente les résultats de quelques recherches (**Silva et coll., 2005**).

**Tableau I.2** : Les résultats d'analyse quantitative de la composition chimique du liège (**Silva et coll., 2005**)

Component (%)	Virgin cork		Reproduction cork (amadia)					
	Caldas	Pereira	Gil	Caldas	Pereira	Parameswaran	Holloway	Carvalho
Suberin	45	45	42	48	33.5	33	37	50
Lignin	27	21	21.5	29	26	13	14.8	19
Polysaccharides (cellulose and hemicellulose)	12	13	16	12	25	6	15.8	13
Extractables	10	19	13	8.5	13	24		15
Ash	5	1.2		2.1	2.5	...		3
Others	...	0.8		...	...	6	...	...

La composition du liège présentée au tableau I.2, présente des proportions qui varient selon l'âge et la nature du chêne-liège. Les principaux constituants chimiques du liège sont : la subérine, la lignine, l'hémicellulose, la cellulose et les extractibles.

- La subérine : un polymère très complexe, responsable de l'élasticité et l'imperméabilité du liège,
- La lignine: responsable de la rigidité et la résistance à la compression,
- Polysaccharides (hémicellulose, cellulose) : composent les parois des cellules, et contribuent à la définition de sa texture (**Penazer et Shindman, 2012**).

### 1.8.2.1. Structure et formation du liège

Le liège a une composition unique de sa structure cellulaire. L'assise génératrice cambiale du chêne-liège donne naissance vers l'intérieur à un bois très dur, riche en larges rayons

ligneux, pauvre en zone poreuse et en vaisseaux, et vers l'extérieur, à un liber mince et riche en tanin. Entre le liber et le liège, on trouve une seconde assise génératrice externe, la subéro-phellodermique, donnant vers l'extérieur, un tissu élastique mort, assurant le rôle de protection (Fig. I.17 et I.18) (Canat, 2005).

### 1.8.2.2. Microstructure du liège

Anatomiquement, le liège apparaît comme un tissu végétal homogène composé, constitué par des micro-cellules dont les membranes sont à parois minces, régulièrement disposées sans espaces intercellulaires. Le liège révèle une structure alvéolaire, analogue à celle d'un nid d'abeille (Fig. I.19), ayant en général une forme polyhydrique. Si on l'examine au microscope, nous avons l'impression de regarder un gâteau de miel.

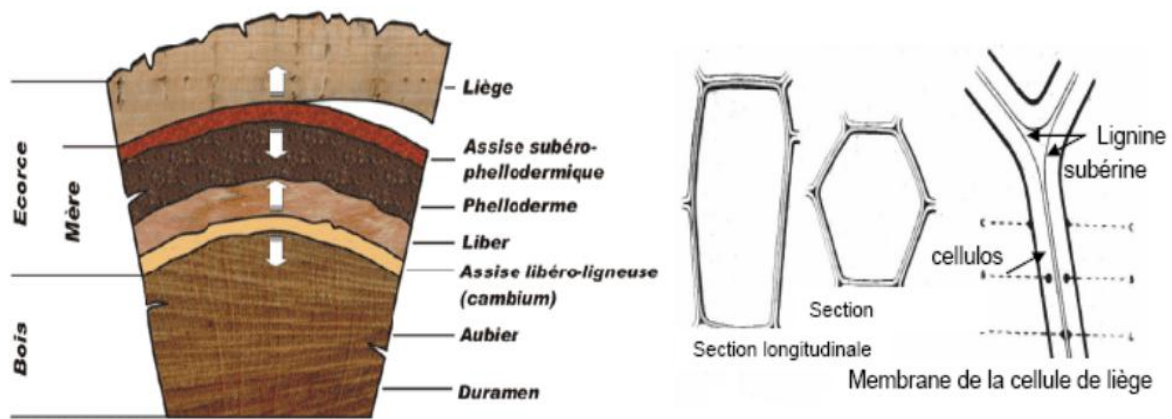


Figure I.17. Structure et composition du liège (Soutehi, 2010)

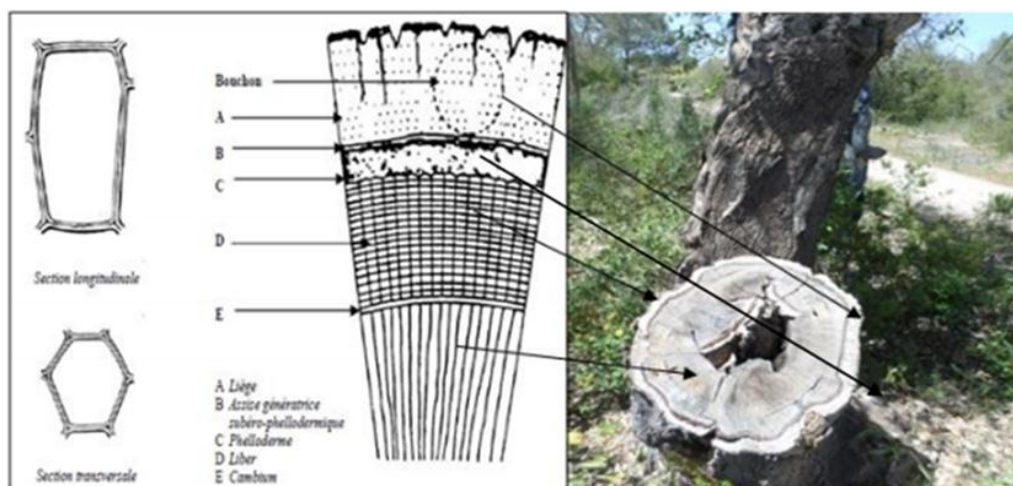
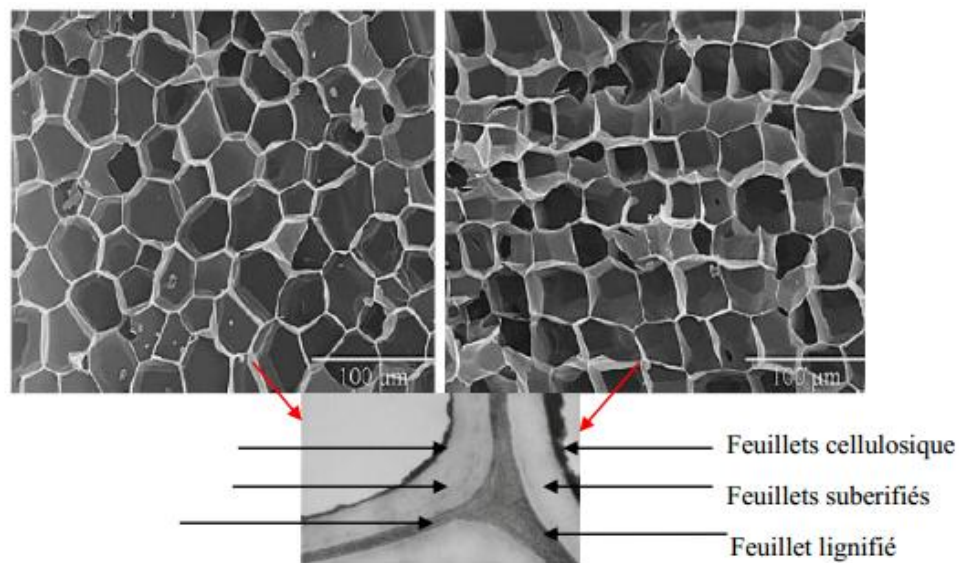


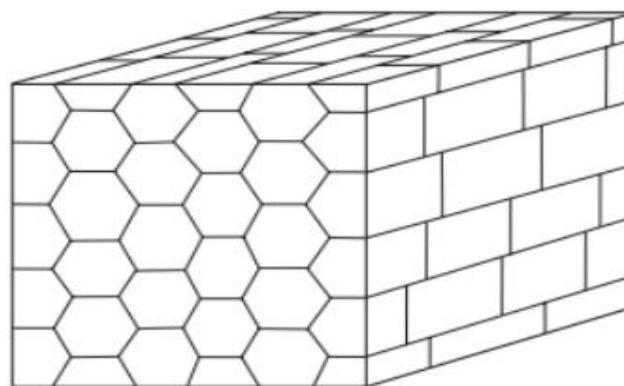
Figure I.18. Représentation schématique d'une coupe transversale d'un tronc de chêne-liège (CBL, 2006) (modifié par Arrache, 2018)

Il a été rapporté qu'il y a environ 30 à 42 millions de cellules dans un centimètre cube de liège qui est disposées en rangées régulières. La microstructure de liège a des caractéristiques différentes de celles trouvées dans d'autres matériaux lignocellulosiques. Les cellules de liège sont à peu près hexagonales sur la face tangentielle et rectangulaire sur les faces radiales et axiales de l'écorce (Fig. 1.18). Les microcellules du liège sont généralement faites de Polyèdres à 14 faces, rainant l'un contre l'autre et rempli de gaz. Les gaz n'ont pas été analysés, mais sont susceptibles d'être similaires à l'air (Karade et coll., 2015).

Pour résumer, les cellules peuvent être décrites dans un modèle simple, comme des prismes rectangulaires, emballés à base de colonnes parallèles à la radiale (Fig.1.20) (Pereira, 2007).



**Figure 1.19.** Apparence anatomique du liège de reproduction après dilatation de gaz à 350°C : A gauche, Section tangentielle ; A droite, section radiale (Pereira, 2015)



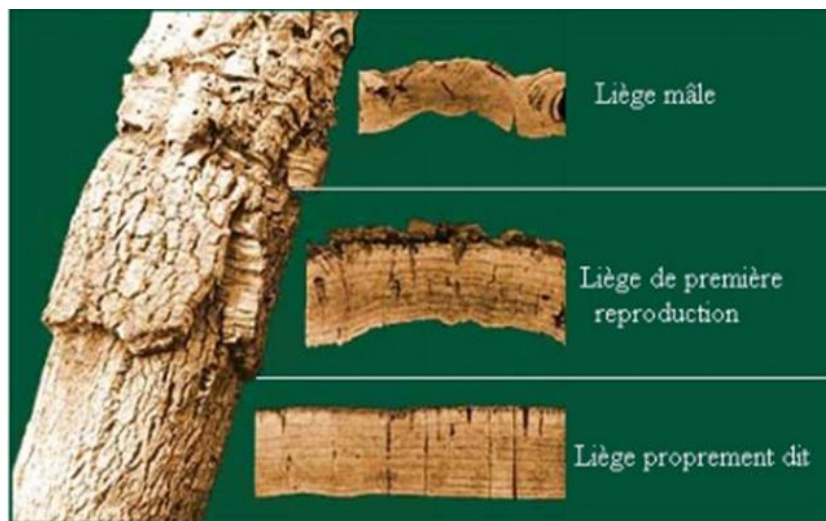
**Figure 1.20.** Schéma explicatif de la structure tridimensionnelle du liège (Pereira, 2007)



### 1.8.3. Les différents types de liège

Le liège est un matériau vivant et naturel, provenant à partir de l'écorce des chênes-lièges (*Quercus suber*). Ces arbres ont une durée de vie de 170 à 200 ans. Après l'âge de 20 à 25 ans, l'écorce de ces arbres est soigneusement enlevée tous les 9 à 12 ans (**Jové et coll., 2011**).

Le liège récupéré de la première récolte est appelé : le liège mâle. Il y a une différence significative entre la première récolte, la deuxième et les récoltes qui suivent (Fig. I.21) (**Silva et coll., 2005**).



**Figure I.21.** Tronc d'un chêne de liège dans sa troisième récolte (**Pereira, 2007**)

Le liège mâle a une structure, une épaisseur et une masse volumique irrégulières. Il est dur, rugueux et friable et peut-être utilisé seulement pour les panneaux de liège, les joints d'étanchéité et les semelles de chaussures. Le liège de la première reproduction est plus régulier (**Pereira, 2007**) ; mais toujours de qualité insuffisante pour produire les bouchons de liège. Seul le liège de la deuxième reproduction est utilisé pour la production de bouchon en liège, tandis que tous les types de liège peuvent être utilisés pour produire des granulats de liège (**Silva et coll., 2005**).

### 1.8.4. L'utilisation des granulats de liège

Grâce à toutes ses propriétés physico-chimiques et mécaniques, le liège peut être utilisé dans de nombreuses applications. Parmi les plus importantes, on peut citer :

- Les bouchons de bouteilles (Fig. I.22), les planchers, les systèmes antibruit, les systèmes aéronautiques et les bouchons recyclés,



**Figure I.22.** Le liège utilisé comme bouchon de bouteilles (Source : site ecobati.com)

- Pour obtenir les bouchons de bouteille, les plaques de liège sont perforées, ce qui laisse des trous dans les bandes. Ce résidu de matériau qui est estimé à plus de 75 % du liège récolté est broyé en petits morceaux granulés. Il est ensuite aggloméré et utilisé pour faire des panneaux d'isolation (Fig. I.23). Toutefois, une grande quantité (20 à 40 % en poids) de la matière ayant une faible densité reste inutilisée car les petits granulats ont besoin de plus de liant pour faire un produit fini (Karade et coll., 2016).



**Figure I.23.** A droite, les panneaux d'isolation par l'intérieur (Manuel, 2012). A gauche, isolation par l'extérieur et décoration avec des panneaux de liège (Source : site ecobati.com)

- Le liège possède des propriétés spécifiques qui lui confèrent un grand potentiel pour de nouvelles applications, par exemple :

La partie inutilisée des petits granulats peut être aussi valorisée dans de nouvelles applications tel que : i) l'incorporation dans des matrices cimentaires pour produire des composites de construction (Fig. I.24), ii) ou bien dans le domaine du design et de la décoration en liège (Fig. 1.25).



Figure I.24. Mortier cimentaire à base de liège (Boussetoua et coll., 2017)

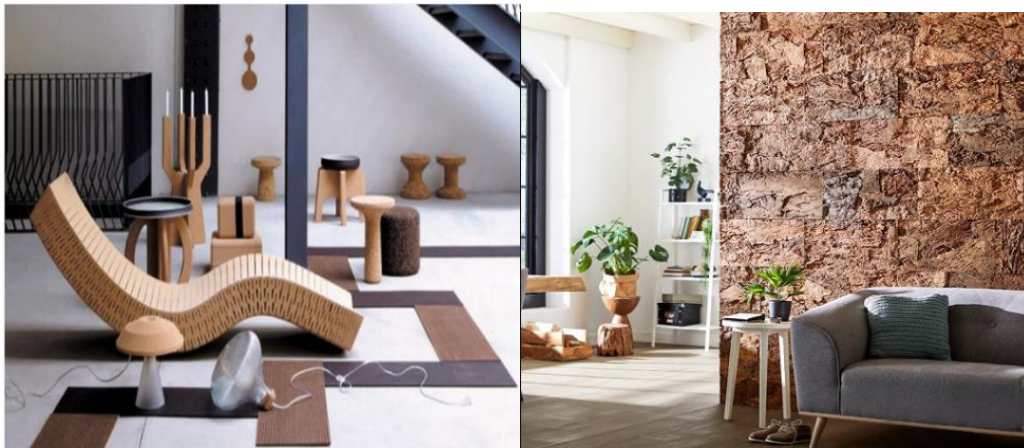
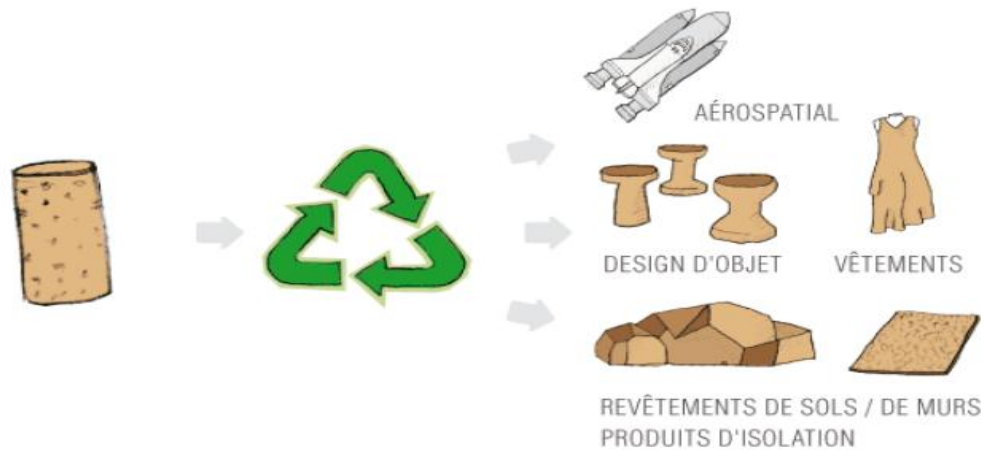


Figure I.25. Future tendance, Design et décoration en liège (Source : site iso-cork.com)

### 1.8.5. Autres applications

A l'heure actuelle, c'est le Portugal qui est à la pointe du recyclage des bouchons de liège. En 2009, il a inauguré la première usine de recyclage ayant la capacité de traiter jusqu'à 30 millions de bouchons par an. Au cours de leur production, une grande quantité de liège n'est pas utilisée car elle ne convient pas ou est éliminée au cours de la production. Ce matériau donc, est broyé en plusieurs étapes afin d'obtenir plusieurs tailles, puis entame une nouvelle vie en se transformant en isolant, utilisé dans une variété d'applications tel que les revêtements de sol ou la production de composites de liège/caoutchouc à usage général aggloméré et agglomérats de paroi et revêtements de sol (Fig. I.26 et I.27)



**Figure I.26.**Recyclage des bouchons inexploités en produits utiles (Source : site [planeteliege.com](http://planeteliege.com))



**Figure I.27.** Bouchons de liège recyclés en chaises (Source : site [freshidees.com](http://freshidees.com))

Dans le bâtiment, le liège peut être utilisé dans plusieurs endroits afin à la fois d'améliorer l'efficacité énergétique et d'augmenter le confort au sein de l'habitation. Les différents endroits où le liège peut être utilisé sont résumés dans la Fig. I.27.



**Figure 1.27.** Les applications principales du liège dans le bâtiment (source : Amorim,VIVEXPO 2012)

### 1.8.6. L'exploitation du liège en Algérie

L'Algérie est parmi les pays qui disposent d'extraordinaires ressources végétales (de palmier, Alfa Abaca, Chanvre, Coton, etc.). Cependant, très rares sont celles valorisées dans le domaine des matériaux de construction. La campagne d'exploitation du liège dans les 18 wilayas productrices s'est soldée par une récolte de 86.373,6 quintaux au titre de l'année 2018, a indiqué à Alger l'Inspecteur général des forêts, Abdelmalek Abdelfettah (Source : site [ecostat-algeria.com](http://ecostat-algeria.com)). Cette statistique est relativement très faible vu que l'Algérie occupe la troisième place en termes de ressources comme nous l'avons précisé plus haut. Donc, la recherche de nouvelles applications potentielles est une étape très recommandée.

## 1.9. Conclusion

Ce chapitre, met en exergue les ressources alternatives propres susceptibles d'être exploitées dans le secteur de la construction, en particulier, le béton vert. Ce dernier présente des caractéristiques thermiques et acoustiques qui le qualifient pour l'isolation des bâtiments. C'est ce que montre les travaux de recherche réalisés sur les bétons légers à base de particules végétales, que nous avons synthétisé.

Nous avons aussi mis en évidence le matériau sujet de notre étude « le liège » à travers la présentation de sa provenance, ses types, ses propriétés et ses applications. Nous avons à la fin,

clôturé ce premier chapitre en parlant de la quasi-inexploitation de cette importante ressource naturelle en Algérie et de l'impérieuse nécessité de lui trouver de nouvelles applications, particulièrement dans le domaine des matériaux de construction.

Dans le chapitre qui suit, nous nous intéressons à l'effet de la température de cure sur l'évolution des propriétés des bétons à base de granulats légers et particulièrement sur les composites de liège.

## Chapitre 2 : Effet de la température de cure sur les bétons légers

### 2. Effet de la température de cure sur les bétons légers

#### 2.1. Introduction

Après la mise en place du béton dans son coffrage bétonnage, celui-ci évolue aux conditions de son environnement immédiat, on parle de cure. Ces conditions de cure changent d'une région à une autre, ce qui peut donc, pour une même formulation de béton, donner des comportements différents. Parmi ces conditions environnementales, on retrouve la température. Ce paramètre est connu par sa capacité à influencer les réactions chimiques, les changements volumiques, etc. A l'opposé, l'influence de ce paramètre peut aussi varier d'un matériau à un autre, et pour une même variation de température, on peut avoir deux comportements pour deux matériaux différents. Dans ce chapitre, on va dans une première partie regrouper quelques propriétés des particules végétales en mettant en exergue l'impact du paramètre « température » sur ces dernières. Le deuxième volet de ce chapitre sera consacré à une étude bibliographique de l'influence de la température de cure sur le développement des performances des bétons légers y compris ceux à base de particules végétales, sujet de notre intérêt. Etant donné que notre étude concerne les composites de liège, la dernière partie de ce chapitre est dédiée à l'étude de ses différentes propriétés à travers les travaux de recherche élaborés récemment. Pour terminer ce chapitre, un tableau récapitulatif des travaux recensés est élaboré et la possibilité d'étudier le comportement des bétons de liège sous températures variées est discutée.

#### 2.2. Caractéristiques des granulats végétaux et effet de température

Les particules végétales ont reçu une attention considérable de la part des chercheurs dans les années passées. Leur ajout dans la matrice cimentaire peut améliorer les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites cimentaires. Cependant, cette incorporation des particules végétales reste un défi pour tous les chercheurs à cause des problèmes suivants :

- Mauvaise adhérence entre les particules et la matrice,
- Dégradation des particules dans un milieu alcalin (matrice cimentaire) ce qui peut engendrer une faible durabilité,
- Apparition de fissures et augmentation de la porosité en raison de leur forte capacité d'absorption en eau (**Umirigirwa, 2014**),
- Impact sur les propriétés physico-mécaniques des mélanges, notamment le retrait à cause de leur sensibilité à la température,

Dans cette partie, on va présenter les principales caractéristiques des particules végétales les plus utilisées dans la littérature, en mettant en relief leur sensibilité à la température.

## 2.2.1. Masse volumique

### 2.2.1.1. Masse volumique des végétaux

La masse volumique est considérée comme une caractéristique principale des matériaux tels que les fibres végétales utilisées dans le béton (**Bederina et coll., 2016**). Elle a une grande influence sur les différentes caractéristiques des particules végétales. Les masses volumiques ont été mesurées dans plusieurs travaux de recherche, y compris ceux de (**Chabanne, 2016**). Cet auteur, ayant étudié sur les agro-bétons à base de deux types de granulats: le chanvre et la balle de riz, a évalué le comportement mécanique et hygrothermique de ces bétons. Parmi les paramètres qu'il a pris en considération dans sa recherche : la masse volumique des deux types de granulats utilisés. Les résultats de la masse volumique d'un granulats de chènevotte pure provenant de la chanvrière de l'Aube sont regroupés dans le Tableau II.1 et Les valeurs trouvées de la masse volumique et la porosité des particules d'une balle de riz sont listées dans le Tableau II.2.

Pour rappel, la masse volumique apparente a été mesurée à partir d'une section de tige de chanvre défibrée et la masse volumique absolue est le résultat de l'essai au pycnomètre.

**Tableau II.1.** Masses volumiques des granulats de chènevotte (**Chabanne, 2016**)

$\rho_B$ : Masse volumique apparente en vrac à l'état sec (Kg/m <sup>3</sup> )	103
$\rho_T$ : Masse volumique apparente (vraie) des particules sèches (Kg/m <sup>3</sup> )	256
$\rho_S$ : Masse volumique absolue (Kg/m <sup>3</sup> )	1465
Porosité totale (%) : $n_{TOT-Gr} = 1 - \rho_B / \rho_S$	93
Porosité intergranulaire(%) : $n_{Inter-P} = 1 - \rho_B / \rho_T$	60

**Tableau II.2.** Masses volumiques des granulats de balle de Riz (**Chabanne, 2016**)

$\rho_B$ : Masse volumique apparente en vrac à l'état sec (Kg/m <sup>3</sup> )	98-108
$\rho_T$ : Masse volumique apparente (vraie) des particules sèches (Kg/m <sup>3</sup> )	453
$\rho_S$ : Masse volumique absolue (Kg/m <sup>3</sup> )	780
Porosité totale (%) : $n_{TOT-Gr} = 1 - \rho_B / \rho_S$	87
Porosité intergranulaire(%) : $n_{Intra-P} = 1 - \rho_B / \rho_T$	78

D'après l'étude menée par (**Jha et Sing, 2007**), la masse volumique en vrac de balles de riz non tassées est d'environ 100 Kg/m<sup>3</sup>. C'est une valeur presque identique à celle du granulats de chènevotte. Toutefois, la masse volumique apparente est plus élevée que celle des granulats de chènevotte.



Dans sa synthèse bibliographique, **(Niyigena, 2016)** a résumé les résultats de plusieurs chercheurs ayant mesuré les masses volumiques du chanvre. Le fruit de ce travail est renseigné dans le Tableau II.3.

**Tableau II.3.** Résultats sur la littérature des masses volumiques apparentes **(Niyigena, 2016)**

Nom de l'auteur	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )
DIHN T.M.	110,9
Gourlay E.	110
Nozahic V.	114,2
Arnaud L.	112-119
Verdier T.	148,3
Magniont C.	110-140
Nguyen T.T.	102,83
Evrard A.	100-120
De Buijn P. et coll.	98
Cérezio V.	130
Cordier C.	110-155

Les résultats du tableau II.3 sont disparates et varient de 98 à 155 kg/m<sup>3</sup>. Cette variabilité peut être liée à la technique ou à la méthode de mesure.

Dans les travaux réalisés par **(Nozahic, 2012)**, en plus des masses volumiques des granulats de chènevotte, la masse volumique des granulats de tournesol a aussi été évaluée. La masse volumique apparente de ce type de granulat est estimée à 97 kg/m<sup>3</sup> (voir Tableau II.4). Le granulat de tournesol s'avère ainsi plus léger d'environ 15% que le granulat de chènevotte. Cela est majoritairement dû à la grande porosité intra-particulaire des granulats « n<sub>IA-P</sub> ».

**Tableau II.4.** Masses volumiques de chènevotte et de tournesol à l'état sec (Nozahic, 2012)

Grandeur	Granulat de chènevotte	Granulat de tournesol	Unité
$\rho_{A0G}$	114,2 ± 2,3*	97,2 ± 1	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$n_{TOTG}$	92,4 ± 0,15	93,7 ± 0,03	[m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ]
$n_{IEP}$ ⊠	55,1 ± 6,7⊠	50,8⊠	[m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ] <sup>⊠</sup>
$n_{IA-P}$ ⊠	37,2 ± 0,1⊠	43⊠	[m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ] <sup>⊠</sup>

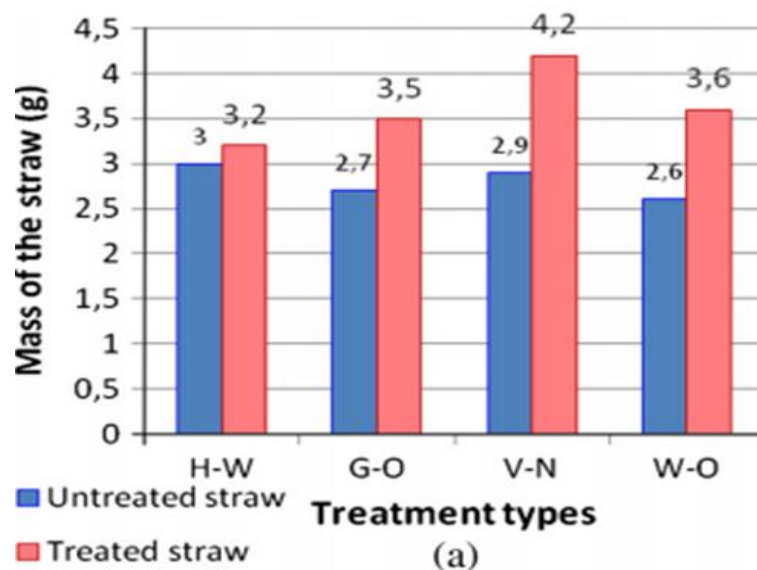
⊠ Intervalle de confiance 2σ (95%)⊠

A partir des résultats des masses volumiques des granulats végétaux cités auparavant, on peut mettre en évidence la différence remarquable entre leurs masses volumiques et celles des granulats minéraux conventionnels (environ 1 pour 15). Ces différences vont expliquer par conséquent, la légèreté des composites en bétons verts ainsi que leur comportement spécifique.

### 2.2.1.2. Effet de la température sur la masse volumique des matériaux cimentaires verts

L'effet de la température sur les propriétés des particules végétales revêt une importance considérable. Une synthèse des travaux de recherche qui se sont intéressés à cette question est présentée dans le paragraphe suivant :

L'étude expérimentale de **(Bederina et coll., 2016)** a testé le comportement de béton sableux contenant des pailles d'orge. Dans son travail, il a appliqué différents procédés de traitement à savoir : l'eau chaude (H-W), le gasoil (G-O), le vernis (V-N) et l'huile usée (W-O). Au terme de sa recherche expérimentale, l'auteur a rapporté que la totalité des traitements appliqués ont conduit à une augmentation de la masse de la paille d'orge (Fig. II.1). La hausse enregistrée dans le cas du traitement thermique était de 6,7%, ce qui montre l'influence de la température sur la masse volumique de la paille.



**Figure II.1.** Evolution de la masse de la paille en fonction du traitement **(Bederina et coll.,2016)**.

**(Traoré et coll., 2018)** ont étudié l'influence de la température sur le béton à base de granulats de coquilles de palmier à huile (OPS). Les auteurs ont mesuré la masse volumique apparente des agrégats d'OPS avant (OPS brutes) et après le traitement thermique (TH), puis ils ont calculé le rapport entre ses deux valeurs. Ce dernier est de l'ordre de 0.948. Ce résultat, bien qu'il représente une faible diminution, il dénote encore une fois l'incidence de la température sur la masse volumique d'OPS (Tableau II .5).

**Tableau II.5.** Effet du traitement thermique sur la masse volumique des particules d'OPS  
(Traoré et coll., 2018)

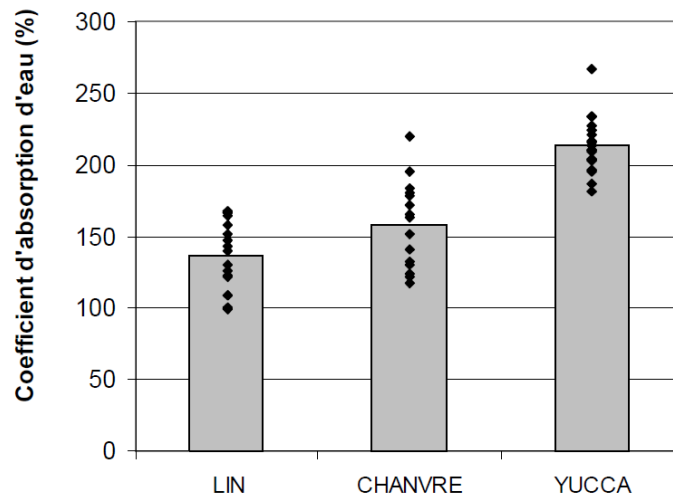
Code du mélange	Traitement d'OPS	Rapport de $M_{VA}$ avant et après traitement
TH	Traitement thermique	0.948

## 2.2.2. Absorption

### 2.2.2.1. Absorption des végétaux

Pour les bétons légers à base de granulats végétaux, l'eau absorbée par les granulats est également un facteur affectant fortement leurs propriétés mécaniques et thermiques; c'est la raison pour laquelle de nombreux chercheurs ont mesuré l'absorption en eau (sous la forme liquide et de vapeur) de ces bétons en vue d'identifier leur comportement vis-à-vis de l'eau.

(Magniont, 2010) a fabriqué trois bétons végétaux à base de chanvre, lin et yucca. A travers cette étude, l'absorption des végétaux utilisés a été évaluée. Les valeurs obtenues après 24 heures d'immersion ainsi que leur écart type, sont présentées dans la Fig. II-2.



**Figure II.2.** Coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales après 24 heures d'immersion  
(Magniont, 2010)

Les fibres de chanvre se saturent de manière rapide et leur absorption atteint 158% après seulement 5 minutes d'immersion. Pour les fibres de lin, la saturation n'intervient qu'après 30 minutes d'immersion et atteint 136%. En revanche, le yucca représente l'absorption la plus élevée avec un taux de 203%.

A l'université de Tlemcen, les travaux de (Achour et coll., 2017) ont également montré que les granulats végétaux étudiés « Diss et Doum » ont un grand pouvoir absorbant. Les coefficients d'absorption obtenues pour les deux fibres brutes de Diss (DIB) et de Doum (DOB) ont atteint respectivement 112 et 171% après 24h d'immersion dans l'eau (Fig. II.3).

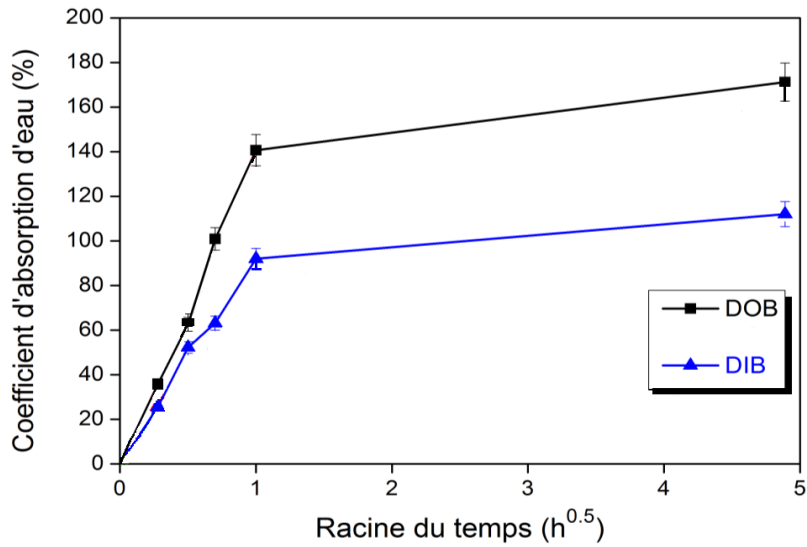


Figure II.3. Absorption des fibres de Diss et Doum (Ahour et coll, 2017)

(Benmansour et coll., 2014) ont confectionné des bétons à base de deux fibres de palmier dattier, à savoir : des fibres fines (DPF3) avec un diamètre moyen de 3 mm et des fibres larges (DPF6) avec un diamètre moyen de 6 mm. Pendant la caractérisation des matières premières, les auteurs ont évalué l'absorption d'eau des fibres de palmier dattier en fonction du temps d'immersion. Les résultats obtenus montrent que les fibres fines (DPF3) présentent une absorption d'eau plus importante comparée avec celle des fibres de taille relativement supérieure (DPF6). A la saturation, l'absorption des DPF3 a atteint 421% après 40 min tandis que celle des DPF6 a franchi 176% après 150 min (Fig. II-4).

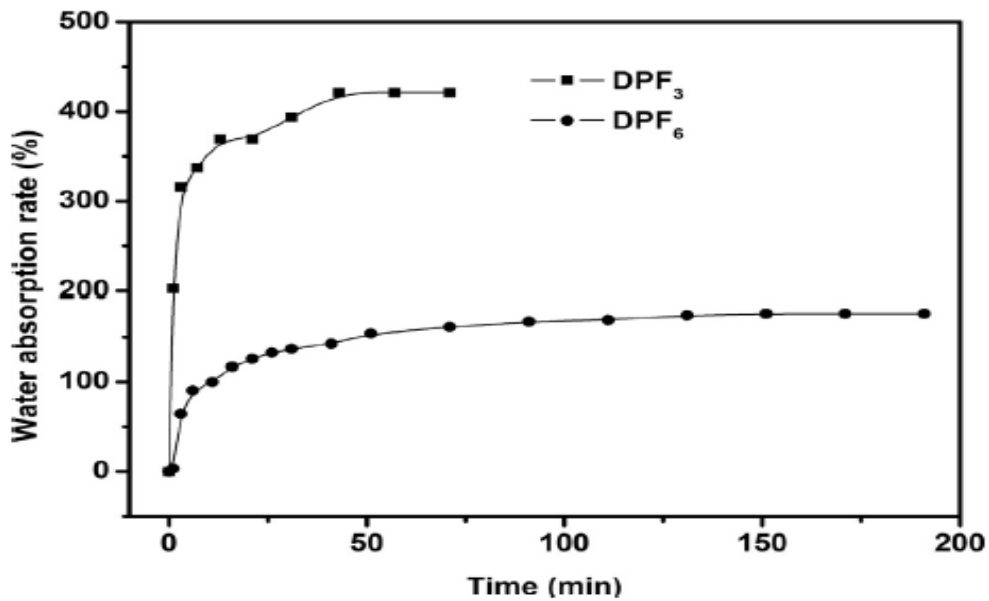
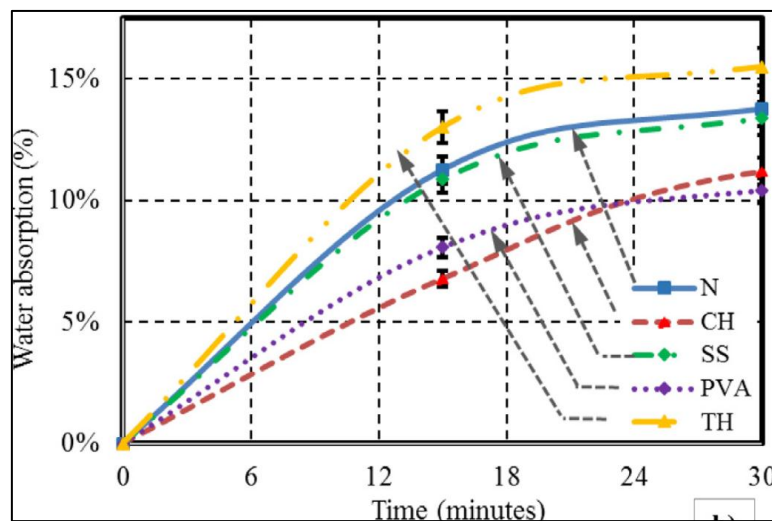


Figure II.4. Absorption d'eau du DPF3 et du DPF6 en fonction du temps d'immersion (Benmansour et coll., 2014)

### 2.2.2.2. Effet de la température sur l'absorption

Etant donné que les granulats végétaux présentent des coefficients d'absorption en eau élevés, cela va impacter directement les propriétés des mélanges qui les contiennent. Cette propriété peut encore être affectée par la température de l'environnement (**Nozahic, 2012**). Dans ce contexte, les travaux réalisés par (**Traoré et coll., 2018**) sur le traitement des particules de l'OPS ont montré l'influence de la température sur la capacité absorbante de ces derniers. Comme montré dans la Fig. II.5, le traitement thermique a conduit à une augmentation d'environ 15% par rapport aux OPS non traités. En effet, les particules d'OPS présentent un taux d'absorption en eau de 13.2% sans traitement thermique. En revanche, après traitement thermique, leur absorption a augmenté de 2%.



**Figure II.5.** Influence de la température sur l'absorption des granulats d'OPS (**Traoré et coll., 2018**)

Dans une autre étude réalisée par (**Nozahic, 2012**), la structure de la moelle de tournesol a été considérablement modifiée au-dessus de 60°C, ceci a été traduit notamment par un changement de coloration des particules. Sachant que la structure des particules végétales est le paramètre qui est responsable de leur absorption, (**Nozahic, 2012**) a confirmé encore une fois que l'absorption des végétaux est influencée par la température.

### 2.2.3. Isothermes de sorption

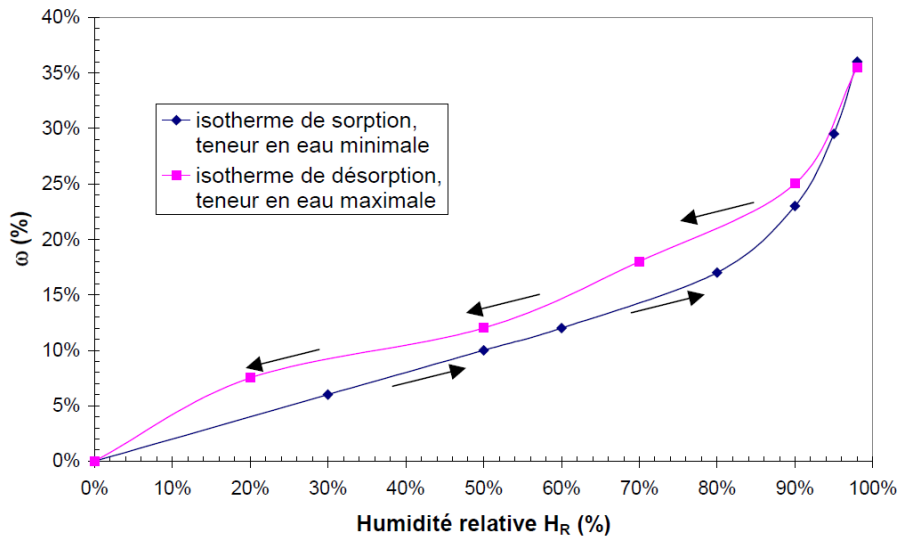
#### 2.2.3.1. Isothermes des particules végétales

Les granulats végétaux se caractérisent, en général, par une porosité élevée. En raison de cette grande porosité, ces granulats sont connus pour leur grande sensibilité vis-à-vis de l'eau. Ceci explique leur capacité à échanger l'humidité avec le milieu environnant. Le paramètre utilisé pour caractériser cette humidité est la teneur en eau, de sorte que l'augmentation de l'humidité relative de l'air conduit à une augmentation de la teneur en eau. On parle alors de deux phénomènes appelés : adsorption (lors d'une augmentation de

la teneur en eau) et désorption (caractérisée par une diminution de la teneur en eau). Ces deux phénomènes sont en général représentés sous forme de courbe de variation de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative de l'air, nommés isothermes d'adsorption/désorption (**Akkaoui, 2014**).

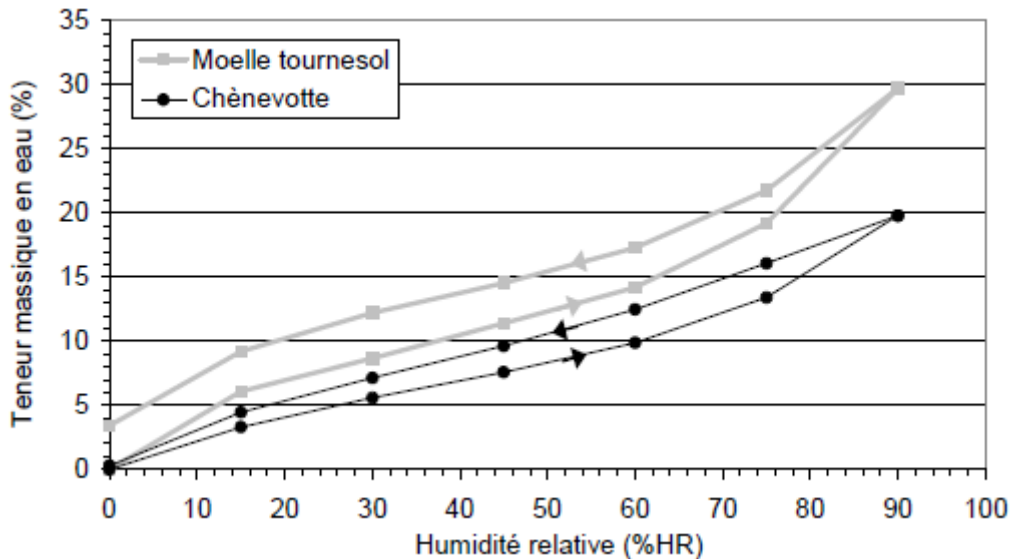
Les isothermes des particules végétales ayant fait l'objet de travaux publiés que nous avons pu consulter, concernent seulement les particules de chanvre et de tournesol.

Dans son travail, (**Cérézo, 2005**) a tracé les isothermes d'adsorption/désorption relatives aux particules de chanvre. Les résultats obtenus montrent la grande sensibilité de ces particules à la vapeur d'eau. Lorsque les échantillons de la chènevotte étaient conservés à 20°C et 50% d'humidité, la teneur en eau était de l'ordre de 10%. En revanche, la teneur en eau est passée à plus de 35% pour la même température ; mais dans une ambiance saturée (Fig. II.6).



**Figure II.6.** Isothermes de sorption/désorption de vapeur d'eau à 20°C des particules de chènevotte (**Cérézo, 2005**)

(**Magniont, 2010**), a pris pour corpus d'étude les particules de chanvre et de tournesol. Les résultats obtenus montrent qu'à 50% d'humidité et 25 °C, la teneur en eau de la chènevotte avoisine les 8%. En revanche, celle de la moelle de tournesol dépasse les 12%. A la saturation, ces valeurs font un saut important où la teneur en eau du tournesol franchit les 30%, par contre la chènevotte monte à 20% comme le montre la Fig. II.7.



**Figure II.7.** Isotherme de sorption/désorption de vapeur d'eau à 25°C de la moelle de tournesol et de la Chênevotte (**Magniont, 2010**)

### 2.2.3.2. Sensibilité des isothermes de sorption à la température

Il faut savoir que les isothermes dépendent de la température. Une haute température va diminuer l'énergie liante entre les molécules. À cause de l'état d'excitation des molécules, leurs distances mutuelles augmentent, tandis que les forces attractives intermoléculaires diminuent. Les molécules deviennent donc moins stables et se détachent des sites de liaison avec l'eau des matériaux. Par conséquent, une augmentation de température entraîne une réduction de la teneur en humidité à l'équilibre à une valeur d'humidité relative spécifique (**HO THI, Thu Nga, 2008**).

La Fig.II.8 présente un exemple de l'influence de la température sur les isothermes de sorption du coton. D'après cette figure, on constate que plus la température augmente, plus la teneur en humidité absorbée diminue dans l'intervalle allant de 10 à 90% d'humidité relative.

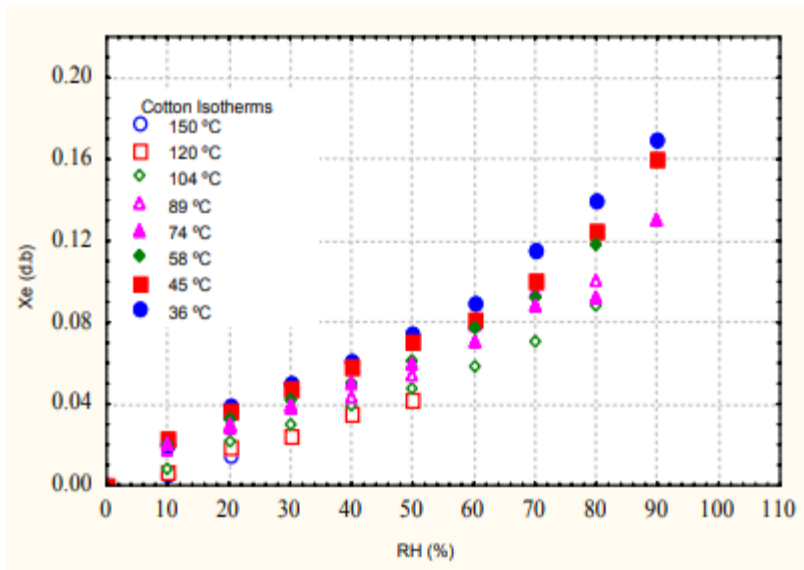


Figure II.8. Isothermes de sorption du coton (HO THI, Thu Nga, 2008)

Par contre, à des hautes températures et humidités dépassant les 90%, l'influence de la température sur la sorption en eau peut être inversée (Fig. II.9). Plus la température augmente, plus la teneur en eau absorbée augmente. Dans ce cas-là, quand la fibre est immergée complètement dans l'eau, l'eau libre est remplie et retenue dans les lumens, les vides ou les micropores de la fibre par les forces de tension superficielle et les forces capillaires. Par conséquent, l'augmentation de la température accélère le processus de diffusion de l'eau dans la fibre et ainsi la teneur en eau absorbée augmente.

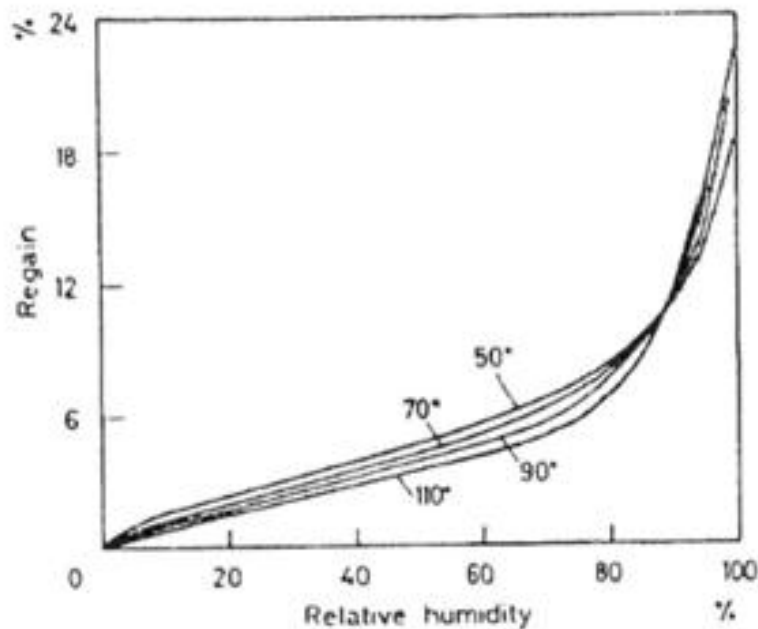


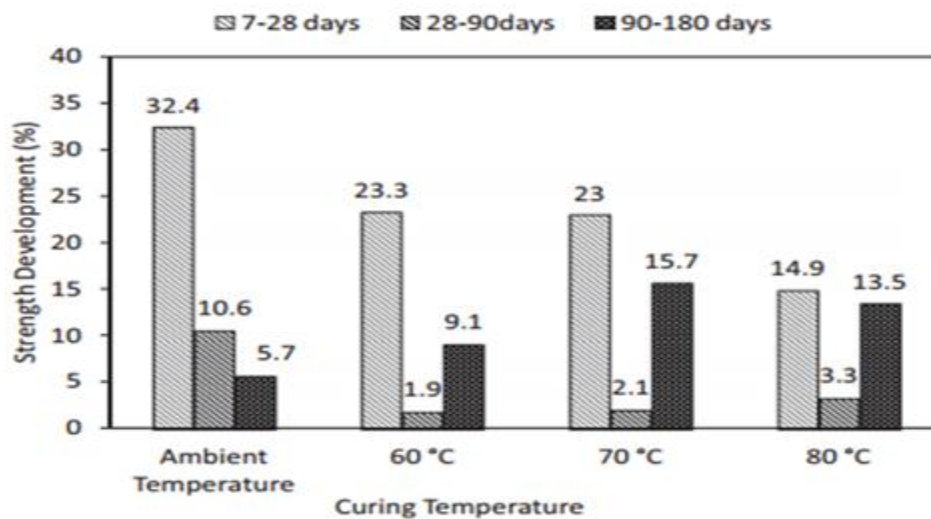
Figure II.9. Influence de la température sur l'absorption du coton (HO THI, Thu Nga, 2008)



## 2.3. Effet des conditions de cure sur les performances des bétons

### 2.3.1. Résistance à la Compression

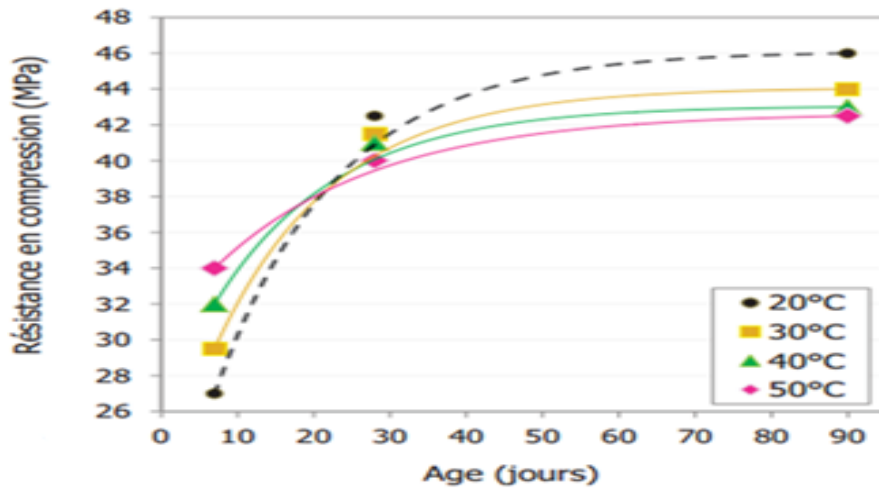
(Salih et coll., 2015) ont étudié l'influence de la température de cure sur les performances des éco-bétons incorporant du POFA (Cendres de carburant d'huile de palme) avec un mélange de silicate de sodium et de sodium hydroxyde. Les bétons testés ont été soumis à quatre températures de durcissement, en l'occurrence : 0, 60, 70 et 80 °C. Les résultats de l'influence de la température de cure sur le développement de la résistance à la compression de ces bétons sont présentés par la Fig. II-10.



**Figure II.10.** Développement de la résistance à la compression du composite à base de POFA pour les périodes 7-28, 28-90 et 90-180 et pour différentes températures (Salih et coll., 2015)

Comme l'illustre la Figure II.10, l'évolution de la résistance à la compression à température ambiante à l'âge de 7 à 90 jours était plus élevée en comparaison avec les échantillons séchés au four. Cependant, au-delà des 90 jours, l'augmentation de la température de durcissement de 60 à 80°C n'a pas une grande influence sur la résistance à la compression. Aussi, les échantillons ayant durci à la température ambiante ne montrent pas un gain en résistance notable par rapport aux échantillons durcis à des températures élevées.

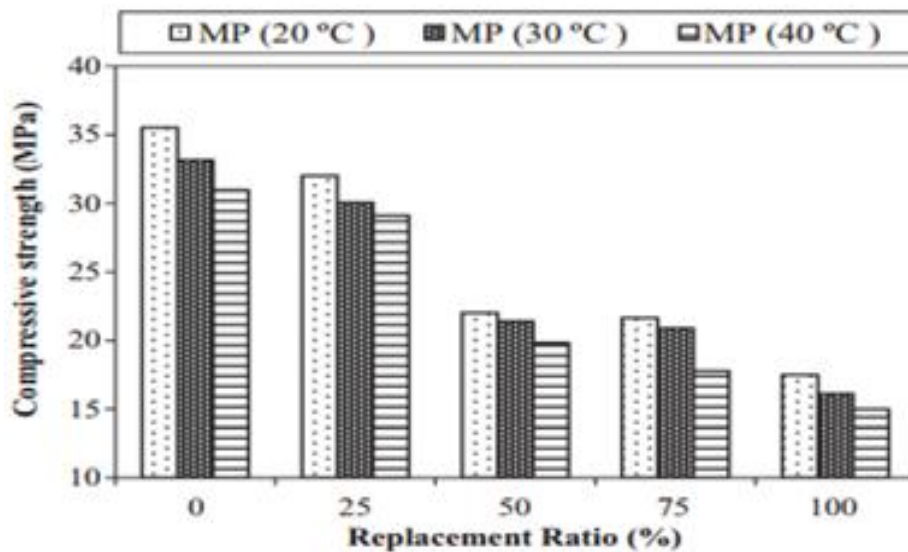
(Boubekeur et coll., 2014) a examiné l'incidence de la température de cure sur les mortiers à base de ciment Portland. Cette étude a montré que les résistances à la compression des mortiers après 7 jours de cure sont maximales lorsque les mortiers sont conservés à des températures variant de 30 à 50°C. En outre, lorsque les essais de résistance à la compression sont effectués après 28 jours (Fig. II.11), ce sont les mortiers conservés à 20°C (température ambiante) qui présentent la résistance la plus élevée. Selon les auteurs, ce constat est attribué aux changements microstructuraux engendrés par le traitement à température élevée.



**Figure II.11.** Résistance à la compression des mortiers à base de ciment de portland en fonction de la température durant les premiers 7 jours de cure (Boubekeur et coll., 2014)

Les travaux dirigés par (Alqahtani et coll., 2019) ont permis d'étudier l'influence de la température de cure sur un béton à base d'agrégats issus des déchets en plastique recyclés. Les auteurs ont remarqué que le béton confectionné peut durcir à des températures allant jusqu'à 30°C, sans affecter significativement la résistance à la compression.

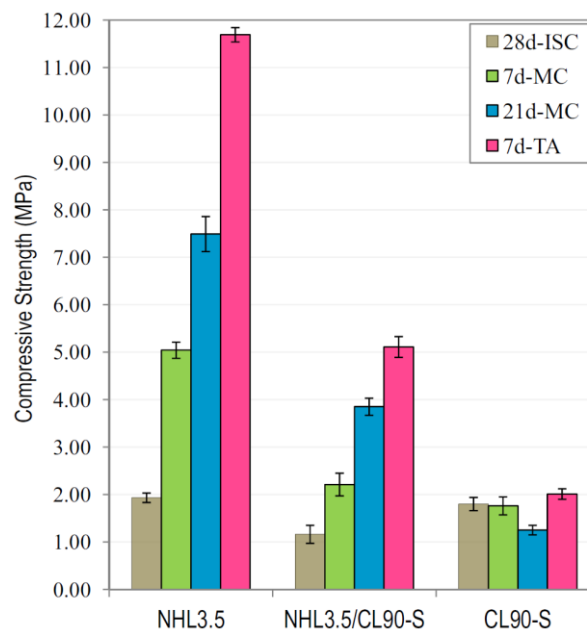
La Fig. II.12 montre l'effet de l'augmentation des températures de durcissement sur la résistance à la compression à 28 jours de la série MP (béton contenant des % en volume d'agrégat léger traité). Les résultats obtenus ont révélé que la résistance à la compression conventionnelle (28 j) diminue avec l'augmentation de la température de séchage de l'eau et il a été remarqué que le béton peut être durci à des températures allant jusqu'à 30°C en enregistrant seulement des chutes qui varient entre 2 et 8%. En revanche, l'augmentation de la température jusqu'à 40°C peut conduire à des diminutions de 17%.



**Figure II.12.** Résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'augmentation des taux de substitution des particules MP à température de cure 20°, 30° et 40°C (Alqahtani et coll., 2019).

(Chabannes et coll., 2016) ont étudié les agro-bétons à base de granulats de chanvre et de balle de riz. Dans cette étude, quatre cures ont été choisies : une cure à environnement ambiant (28d-ISC), une cure de 7 jours dans l'eau (7d-MC), une cure de 21 jours dans l'eau (21d-MC) et une cure à température élevée de 50 °C (7d-TA).

L'effet de la température de cure élevée sur le durcissement des liants aux jeunes âges s'est révélé particulièrement remarquable. A travers cette étude, les auteurs ont confirmé donc que l'élévation de la température jusqu'à 50 °C durant les premiers jours d'hydratation augmente le développement de la résistance à la compression à 28 jours. En définitif, la résistance à la compression a été multipliée au moins par 5 comparée à celle des mortiers conservés à 20°C et 50% HR (Fig. II.13).



**Figure II.13.** Résistance à la compression des mortiers de chanvre et balle de riz sous différentes conditions de cure à 28 jours (Chabannes et coll., 2016)

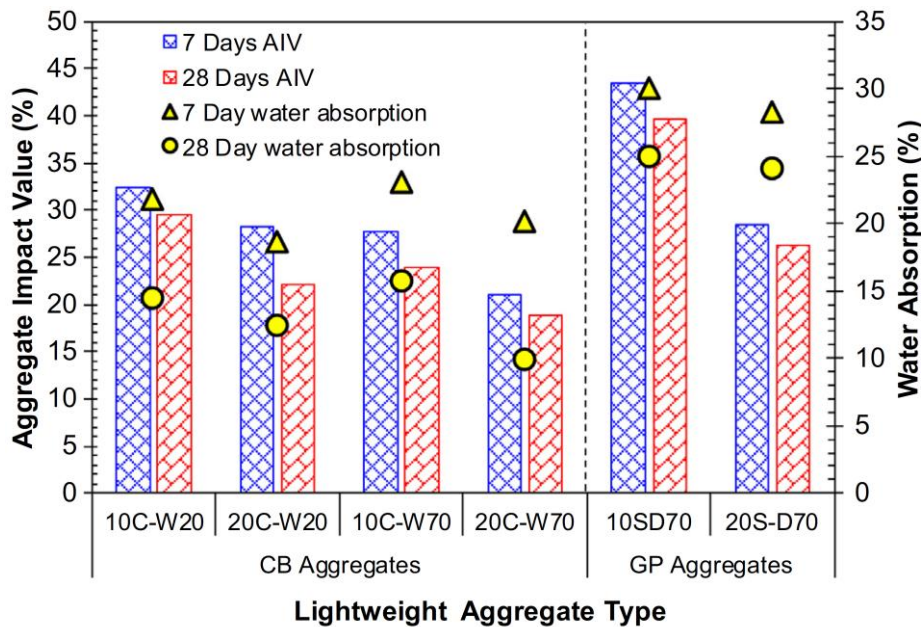
### 2.3.2. Absorption

Le travail effectué par (Rehman et coll., 2019) s'est focalisée sur l'utilisation des granulats légers issus des laitiers de haut fourneau et des cendre volantes dans la production de composites à base de ciments portland (dénommés C) et de géopolymères (notés S). Dans cette étude, l'effet de la température de cure sur les propriétés des composites a été étudié en testant deux cures différentes, en l'occurrence : une première cure dans l'eau à température ambiante (W20) et une seconde cure dans l'eau à 70 °C (W70). Ainsi, six (06) mélanges ont été produits. Il s'agit de :

- 10C-W20 : contenant 10% de ciment et conservé à l'eau à 20°C,
- 20C-W20 : contenant 20% de ciment et conservé à l'eau à 20°C,
- 10C-W70 : contenant 10% de ciment et conservé à l'eau à 70°C,
- 20C-W70 : contenant 20% de ciment et conservé à l'eau à 70°C,

- 10S-D70 : contenant 10% de ciment et conservé au four à 70°C,
- 20S-D70 : contenant 20% de ciment et conservé au four à 70°C.

A l'issue du travail réalisé, les chercheurs ont montré l'effet de la température de cure sur les mélanges légers produits. A 7 jours, pour les composés cimentaires, plus la température de cure augmente, l'absorption augmente aussi. Par exemple, en allant de 20 à 70°C, l'absorption du mélange contenant 20% de ciment est passée de 18 à 21%, ce qui correspond à une augmentation de 17% (Fig. II.14). Par contre, à 28 jours l'effet de température est lié aussi au taux de ciment. Pour le mélange contenant 10% de ciment, l'augmentation de la température engendre une hausse d'absorption, tandis que pour les mélanges avec 20% de ciment, le contraire est remarqué. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que l'intrusion d'eau chaude permet de provoquer une hydratation des particules non-hydratées, ce qui a un impact direct sur la microstructure et donc l'absorption des mélanges.



**Figure II-14.** Absorption d'eau des mélanges légers après 7 et 28 jours de cure en fonction de la température (Rehman et coll., 2019)

### 2.3.3. Microstructure

L'étude expérimentale réalisée par (Jiang et coll., 2018) a examiné l'influence de la température de cure sur des mortiers formulés par l'incorporation de laitiers de haut fourneau (GGBS) comme substituants au ciment. Les échantillons confectionnés ont durci aux températures de 20 ° (M0 et S3) et 60°C (M0-H et S3-H) pendant 24 h. Les températures de durcissement plus élevées améliorent l'activité potentielle des laitiers et améliorent le système d'hydratation. De plus, le laitier consomme de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pendant l'hydratation et crée plus de gel C-S-H. Au jeune âge, l'effet combiné de la multiplication des C-S-H avec l'évolution de l'hydratation, diminuent la porosité des mélanges (Fig. II-19).

A cours des travaux de (**Chabannes et coll., 2016**) sur un composite à base de chanvre, il a été remarqué que l'augmentation de température de cure serait liée à une augmentation de la porosité capillaire provenant d'un développement microstructural plus grossier et d'hydrates distribués de manière plus hétérogène dans la matrice. En ce qui concerne l'interface chanvre-chaux sous cure ambiante (Fig. II-16.a), l'image MEB montre un mince espace d'environ 5  $\mu\text{m}$  entre la particule et la matrice. Ce décollement à l'interface est régulièrement observé dans les composites végétaux et pourrait être lié au retrait par dessiccation des agrégats végétaux lors du séchage. Cependant, lorsque les composites chanvre-chaux ont durcis sous une température de 50 °C (Fig. II-16.b), la zone d'interface s'est transformée en un trou béant de plus de 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La particule de chanvre a été totalement découplée du liant, suggérant ainsi un fort manque d'adhérence. Les résultats obtenus par **Chabannes et coll., 2016**, confirment clairement l'influence de la température de cure sur la microstructure des composites verts.

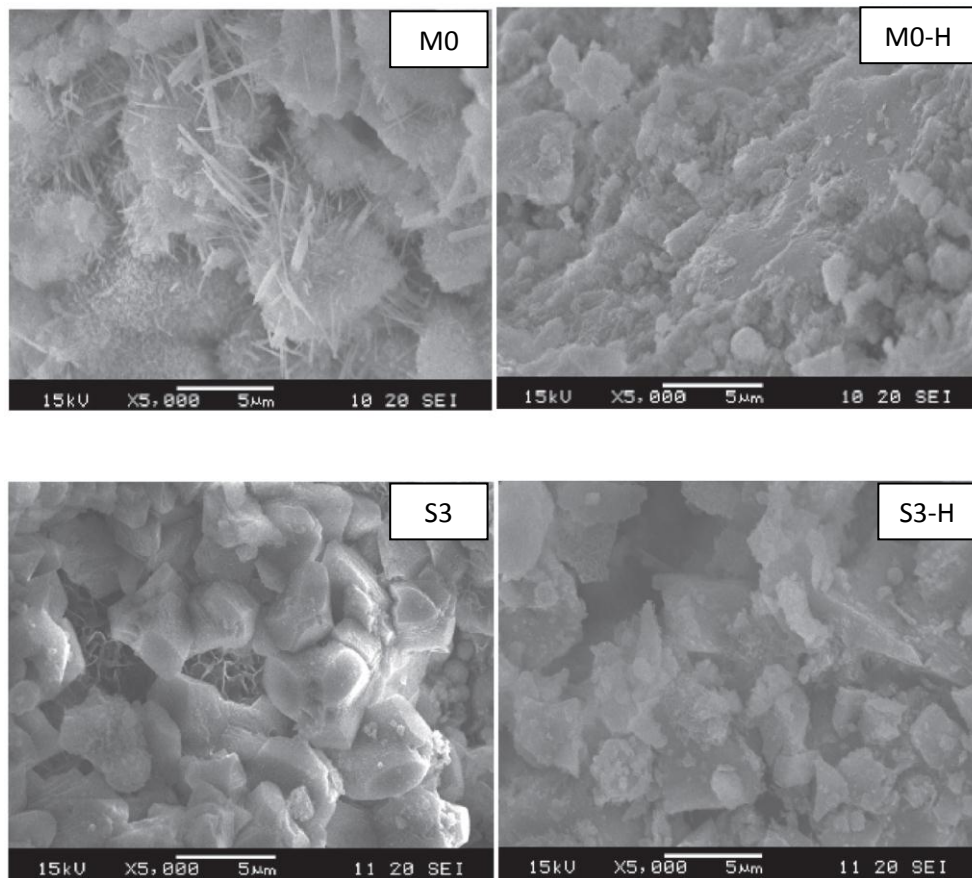


Figure II.15. Images MEB des mortiers à base de laitier (**Jiang et coll., 2018**)

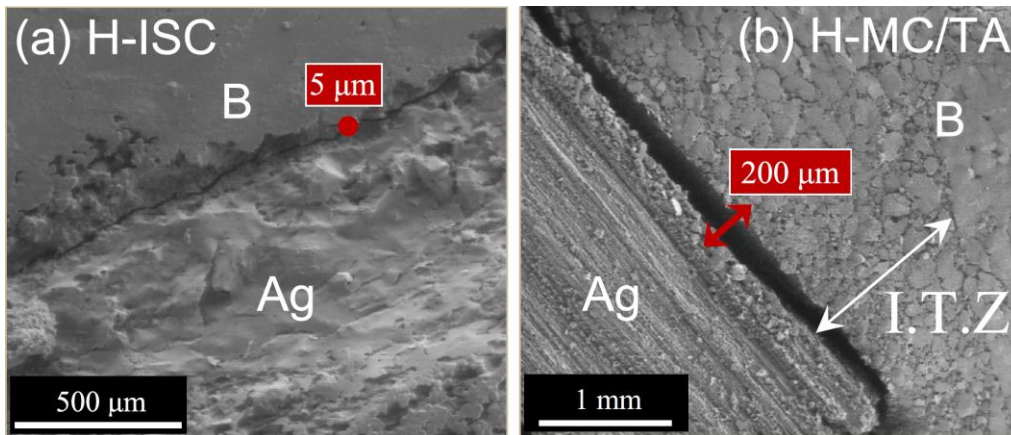


Figure II.16. Microstructure des composites de chanvre conservés sous température ambiante (a) et température élevée (b) (Chabannes et coll., 2016)

### 2.3.4. Propriétés thermiques

Afin de voir l'effet de la température de mûrissement sur les propriétés thermiques, **Nguyen et coll., 2017** ont fabriqué des bétons légers contenant différents dosages de schiste expansée (OS), de pierre ponce (OP), et d'argile expansée (OC). Les bétons produits étaient conservés sous des températures de 5, 20, 35 et 50 °C. Les valeurs des conductivités thermiques ( $\lambda$ ) sous différentes températures sont représentées dans la Fig. II.17.

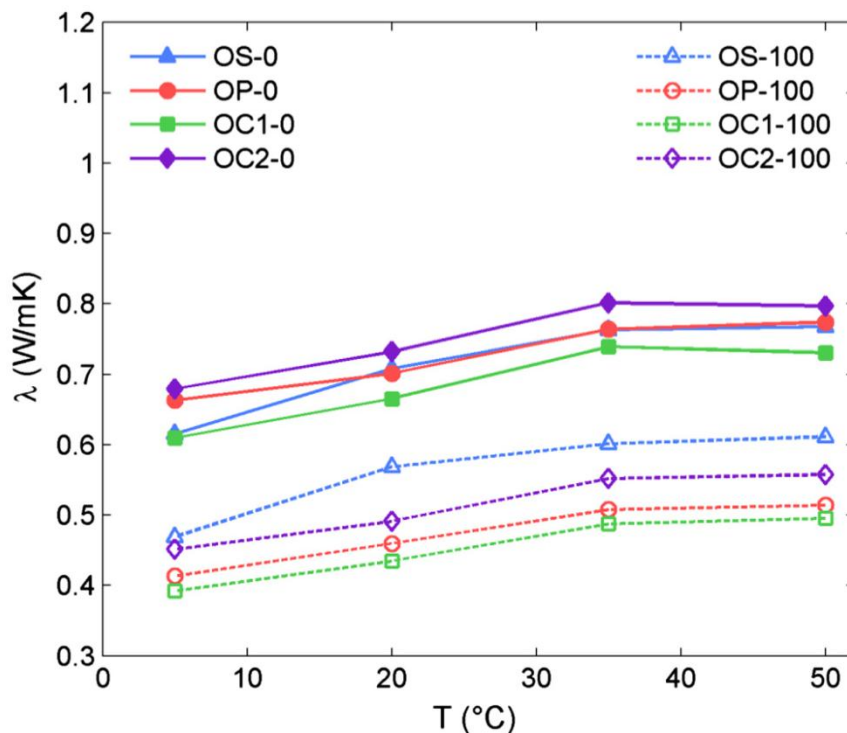


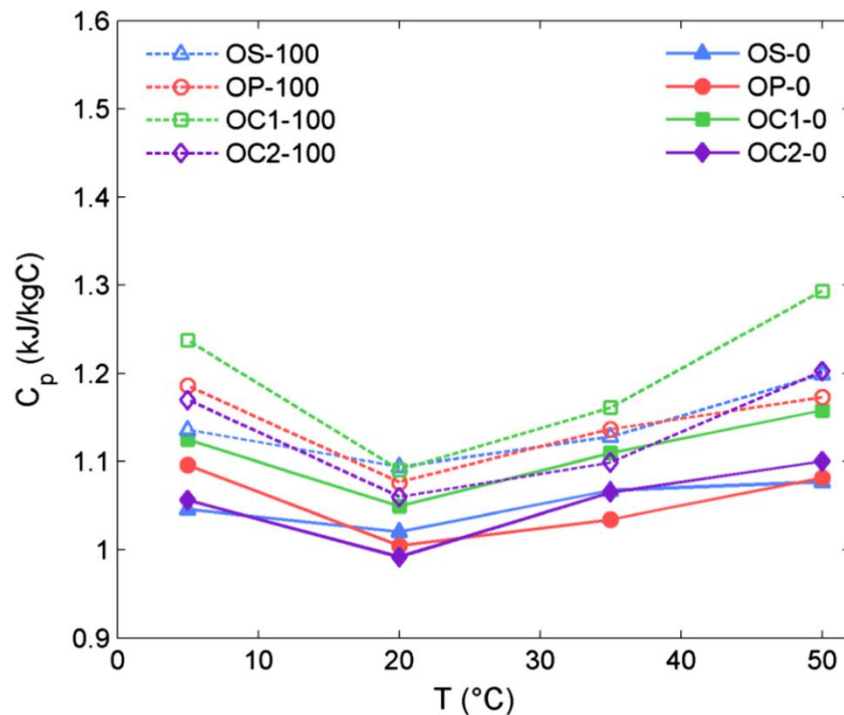
Figure II.17. Conductivité thermique des bétons légers en fonction de la température (Nguyen et coll., 2017)

Les résultats montrent que la température de cure impacte la conductivité thermique des bétons. Cette dernière tend à augmenter dans un intervalle de température variant entre 5 et 35 °C et puis elle se stabilise. L'augmentation engendrée dans le cas du béton qui ne

contient pas d'agrégats légers varie entre 17 et 24%. En revanche, pour les bétons contenant 100% de granulats légers, la hausse oscillait entre 24 et 30%.

Contrairement à la conductivité thermique qui augmente avec la température, la chaleur spécifique diminue jusqu'à une valeur minimale lorsque la température varie de 5 à 20 °C, puis elle remonte avec l'augmentation de la température jusqu'à 50 °C et ceci pour toutes les formulations de béton réalisées (Fig. II.18). La chaleur massique élevée à 5 °C provient du changement de phase de l'eau piégée dans le béton. De 20 à 50 °C, la chaleur spécifique présente une augmentation de 5 à 20% et ceci en fonction du béton produit.

L'étude des propriétés thermiques des bétons légers sous l'effet de la température est encore limitée selon **Nguyen et coll., 2017**.



**Figure II.18.** Chaleur spécifique des bétons légers en fonction de la température (**Nguyen et coll., 2017**)

### 2.3.5. Capillarité et sorptivité

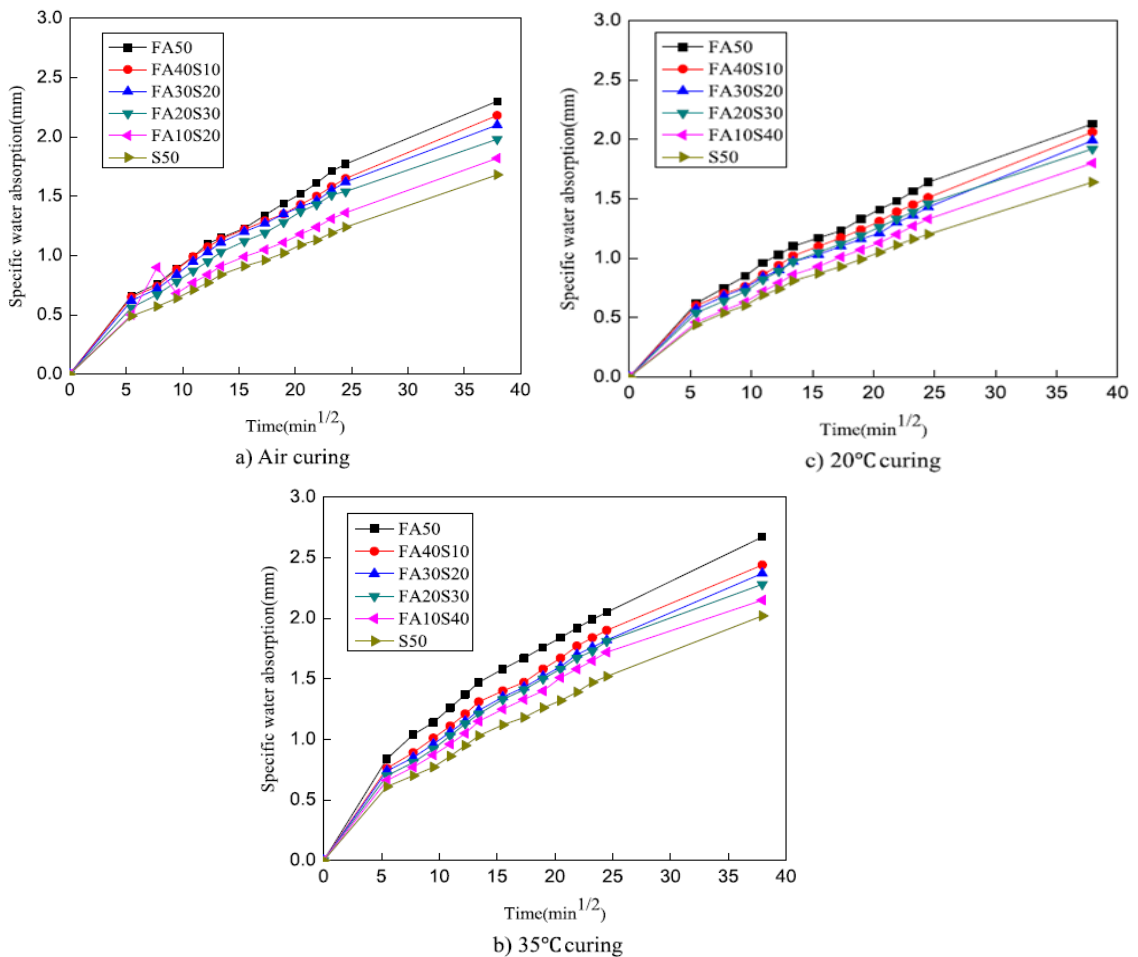
(**Liu et coll., 2018**) ont étudié l'influence de la température de durcissement et l'humidité relative sur les mélanges minéraux légers à base de cendres volantes et de scories de haut fourneau (GGBFS). Les bétons fabriqués dans ces travaux sont désignés comme suit :

- FA 50 : Béton contenant 50% de cendres volantes,
- FA40S10 : Béton contenant 40% de cendres volantes et 10% de Laitier,
- FA30S20 : Béton contenant 30% de cendres volantes et 20% de Laitier,
- FA30S30 : Béton contenant 20% de cendres volantes et 30% de Laitier,
- FA10S40 : Béton contenant 10% de cendres volantes et 40% de Laitier,
- S50 : Béton contenant 50% de Laitier.

Les auteurs de cette étude ont utilisé trois différents types de séchage : (i) séchage à l'air libre, (ii) séchage à 20 °C, et (iii) durcissement à 35 °C. Pour ces trois types de cure, l'humidité relative moyenne était d'environ 80 %. Parmi les paramètres étudiés, l'absorption capillaire.

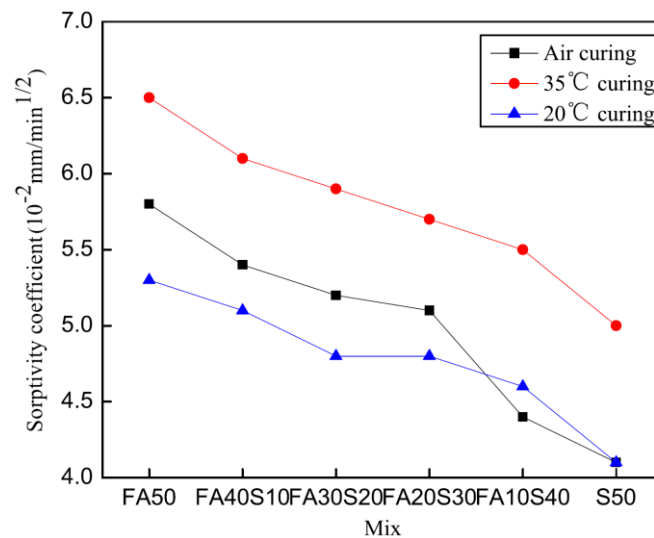
La Fig. II.19, montre que l'eau spécifique absorbée par le béton augmente avec l'augmentation de la température. Ce résultat est attribué à l'augmentation de la porosité et microfissures causées par le durcissement précoce à haute température. Autrement dit, l'augmentation de la température conduit à une augmentation des pores ouverts sur la surface du béton, ce qui tend par la suite à augmenter l'absorption des bétons.

Quant au coefficient de sorptivité, les bétons conservés à une haute température sont les plus poreux comme indiqué sur la Fig. II.20. Bien que l'hydratation rapide due aux températures augmente au début, il semble que les capillaires se fissurent et le coefficient de sorptivité augmente pendant l'hydratation rapide. Le coefficient de sorptivité du béton aux mélanges minéraux augmente avec l'augmentation de la température de durcissement. Cette situation s'explique par la propriété pouzzolanique du GGBFS.



**Figure II.19.** Influence de la température de durcissement sur l'absorption capillaire des bétons (Liu et coll., 2018)





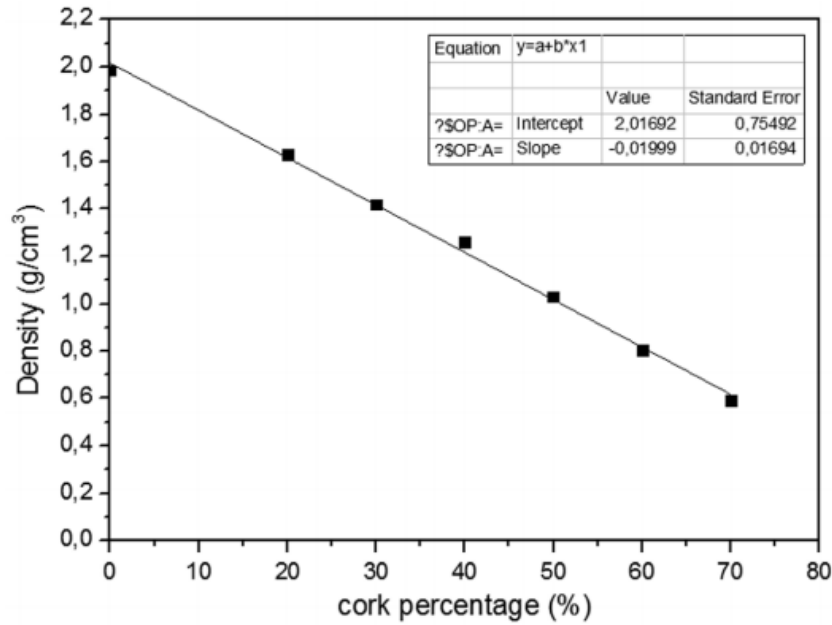
**Figure II.20.** L'influence de la température de durcissement sur le coefficient de sorptivité du béton à base de granulats minéraux (Liu et coll., 2018)

## 2.4. Propriétés des composites de liège

### 2.4.1. Masse volumique

La variation de la masse volumique des composites de liège en fonction de la teneur en liège a été traitée dans la plupart des travaux de recherche consultés. Dans ce qui va suivre, nous n'allons citer que les travaux les plus récents.

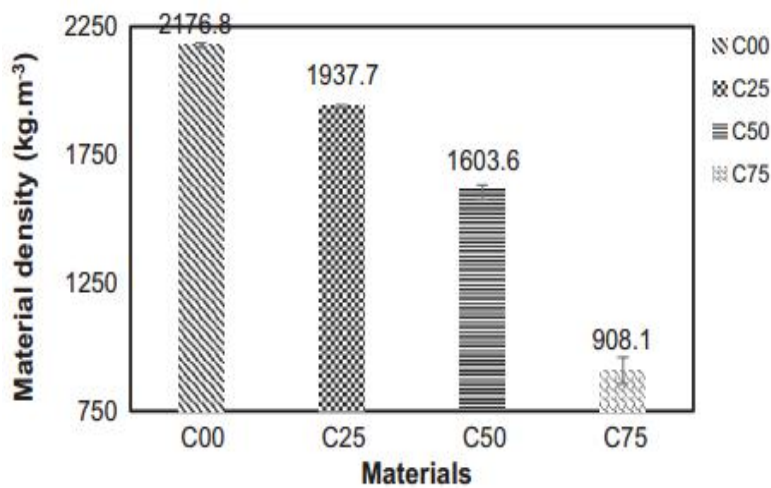
(Ziregue et coll., 2016) ont travaillé sur un mortier de liège expansé issu de la fabrication de panneaux d'isolation d'épaisseur de 3.8mm. Ces chercheurs ont utilisé le liège à des taux de 20, 30, 40, 50, 60 et 70% comme substituant du mortier (ciment + sable + eau). Les résultats obtenus montrent, voir Fig. II.21, que la densité diminue avec l'augmentation de la teneur en liège. La masse volumique des composites produits varie de 1980 à 590kg/m<sup>3</sup> pour une teneur en agrégats de liège allant de 0 % (béton témoin) à 70%, ce qui correspond à une réduction d'environ 70%. En revanche, un dosage minimal de 20% de liège apporte une légèreté de 18% par rapport au béton témoin.



**Figure II.21.** Evolution de la masse volumique de béton de liège étudié en fonction des taux de liège incorporés (Ziregue et coll., 2016)

Dans un autre travail qui s’est fixé les mêmes objectifs, (Boussetoua et coll., 2017) ont utilisé des granulats de liège de 0/6.3mm avec des teneurs de 0, 25, 50 et 75% comme substituant au sable. La Fig. II.22 montre la variation de la masse volumique des échantillons en fonction du pourcentage de liège incorporé. La diminution de la masse volumique à 84 jours est estimée à 58% en passant de 0 à 75% de liège.

Les résultats des deux précédentes études (Ziregue et coll., 2016) et (Boussetoua et coll., 2017) sont bien en accord et c’est tout à fait normal car la substitution progressive du ciment par le liège plus léger dans la matrice cimentaire, conduit forcément à la diminution de la masse volumique des mélanges.



**Figure II.22.** La masse volumique des échantillons à 84 jours avec son écart type (Boussetoua et coll., 2017)

### 2.4.2. Résistance à la compression

(Brás et coll., 2013) ont étudié les mortiers à base de liège. Pour ce faire, ils ont effectué des substitutions volumiques de sable de l'ordre de 0, 10, 20, 40, 50, 60, 70 et 80%. Les résultats montrent que l'augmentation du pourcentage des granulats de liège incorporés, conduit à une diminution significative de la résistance mécanique des mélanges puisqu'ils sont de moins en moins compacts (voir Tableau II.6).

**Tableau II.6.** Résistance à la compression des granulats de liège (CC) durcis ou des billes d'EPS (CE) pour les taux d'incorporation étudiés (Brás et coll., 2013).

Mortars with cork granulate or EPS beads	Compressive strength at 28d (MPa)	COV (%) - Compressive strength 28d	Compressive strength at 150d (MPa)	COV (%) - Compressive strength 150d	Increase rate (%)
CB	24.4	2.5	34.0	11.3	39.0
CC50*	9.2	4.1	10.7	13.1	16.1
CC70**	4.5	16.6	6.1	15.1	36.1
CE40	15.1	8.1	18.5	11.0	22.6
CE50	14.0	1.4	15.7	3.5	12.3
CE80	10.7	5.6	12.6	7.4	17.8

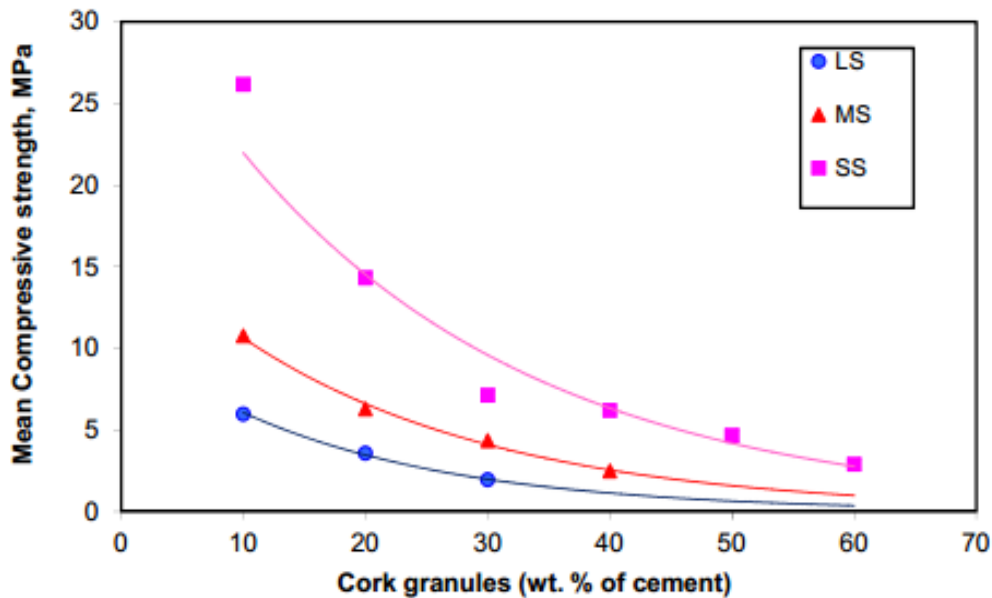
Dans un autre travail visant les mêmes objectifs, (Moreira et coll., 2014) ont étudié l'influence du dosage en ciment sur les performances d'un béton de liège destiné à la production de chapes légères. Pour aboutir à leurs objectifs, les chercheurs ont formulé trois différents mélanges contenant 80% de liège comme substituant au sable. Ces mélanges diffèrent en termes de dosage en ciment : 150, 250 et 400 kg/m<sup>3</sup>. En fonction de ce dosage, la résistance des chapes légères produites (notées M) variait entre 0.12 à 7j à 2.23 MPa à 84 j (Tableau II.7).

**Tableau II.7.** Résistance à la compression des chapes légères (M) et références (R) (Moreira et coll., 2014)

Sample	7 Days	28 Days	56 Days	84 Days
M150	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.01
M250	0.43 ± 0.04	0.54 ± 0.03	0.57 ± 0.08	0.61 ± 0.07
M400	1.79 ± 0.12	1.98 ± 0.13	2.08 ± 0.12	2.23 ± 0.12
R150	0.83 ± 0.10	0.86 ± 0.13	1.00 ± 0.08	1.23 ± 0.12
R250	2.63 ± 0.15	2.75 ± 0.08	3.06 ± 0.11	3.91 ± 0.17
R400	7.58 ± 0.20	12.84 ± 0.13	15.42 ± 0.18	18.36 ± 0.21

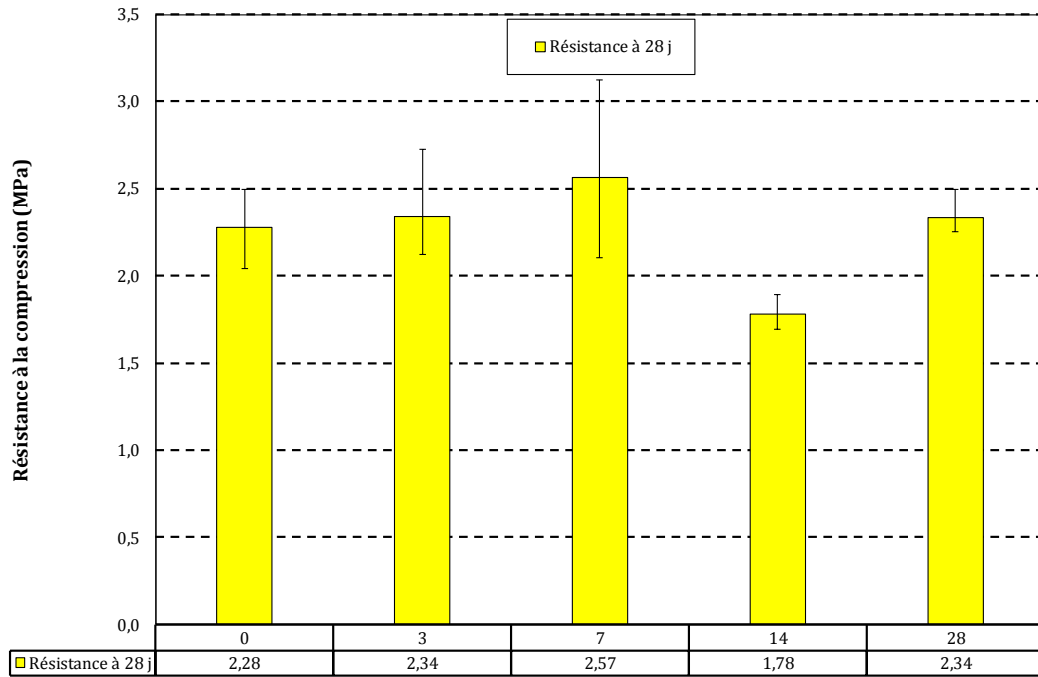
Comme on pouvait s'y attendre, les résultats trouvés par (Karade, 2015) ont montré que la résistance à la compression du composite diminue à mesure que le rapport liège-ciment augmente (Fig. II.23). Pour un rapport liège-ciment donné, le composite avec des granulats

de plus petite taille (SS) donne la plus grande résistance à la compression, tandis que celui contenant des granulats de plus grande taille (LS) a la plus faible résistance à la compression. Les composites testés présentent des résistances à la compression variant dans une large gamme : 1 à 26 MPa.



**Figure II.23.** Effet des granulats de liège sur la résistance à la compression du composite (Karade, 2015)

(Riouchi et Belguendouzi, 2019) ont abordé la question relative à l'effet du temps d'immersion dans l'eau sur les performances du béton de liège. Le béton produit contient 50% de liège du volume total des granulats. Parmi les paramètres évalués dans cette étude, la résistance à la compression à 28 jours. Les résultats obtenus indiquent que la résistance à la compression des bétons testés augmente avec le temps d'immersion jusqu'à arriver à 7 jours d'immersion pour atteindre une valeur de 2.57 MPa. Au délai de 14 jours d'immersion, les mélanges ont montré une chute de leur résistance à la compression allant de 2.57 et 1.78 MPa (Fig. II.24).

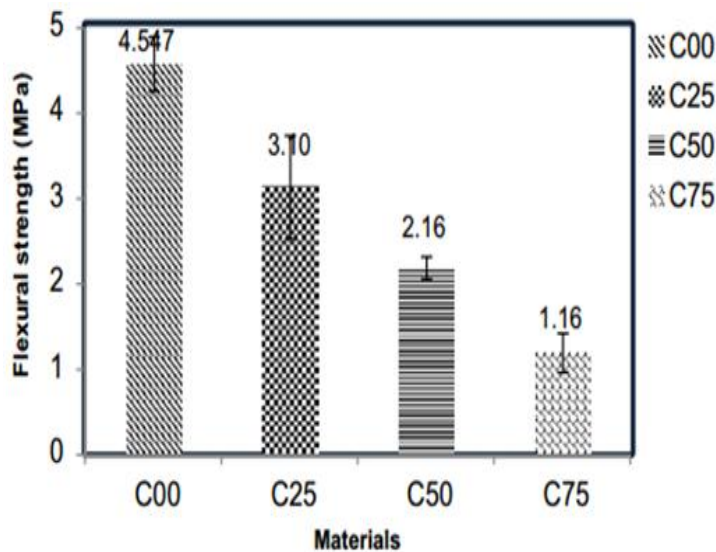


**Figure II.24.** Résistance à la compression des bétons à 28 jours sous différentes conditions de cure (immersion dans l’eau de béton à température d’environ 23°C) (Riouchi et Belguendouzi, 2019)

**2.4.3. Résistance à la flexion**

La campagne expérimentale de (Brás et coll., 2013) qui repose sur l’étude d’un mortier à base de liège a montré que l’addition croissante des granulats de liège induit une importante diminution de la résistance à la flexion comme il apparaît sur la Fig. II.25.

Les résultats de la résistance à la flexion présentent des variations similaires à celles de la résistance à la compression présentés précédemment. Le comportement mécanique des nouveaux composites est largement modifié par la nature fragile des granulats de liège.



**Figure II.25.** Résistance moyenne à la flexion des mortiers de liège (Bousetoua et coll., 2017)

La Fig. II.26. présente les résultats de la variation de la résistance à la flexion de spécimens contenant trois tailles différentes de granulats de liège : grand (LS), moyen (MS) et petit (SS) introduites à 19, 20 et 30% (Karade, 2015).

Les résultats de cette étude confirment ceux de la précédente.

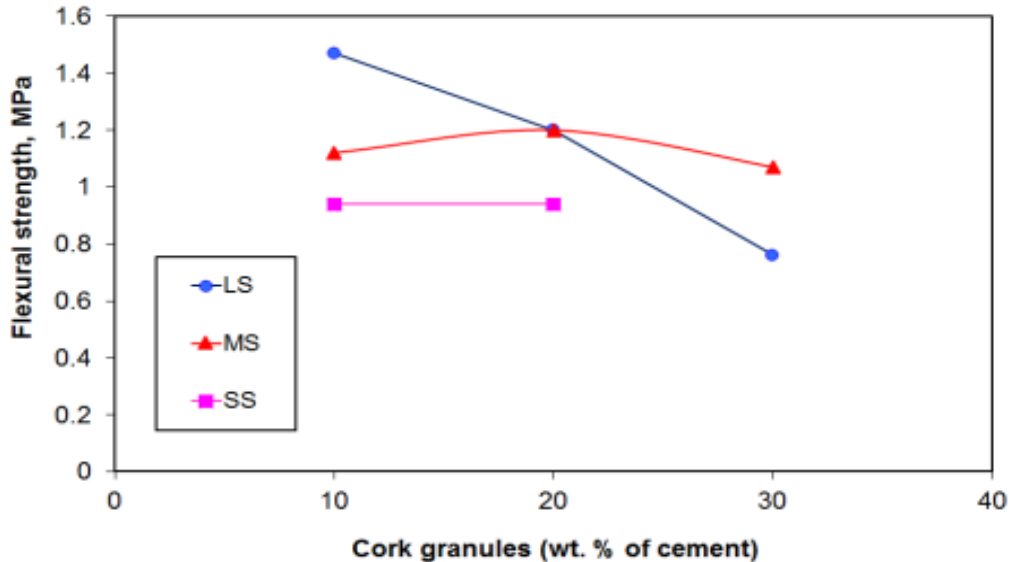
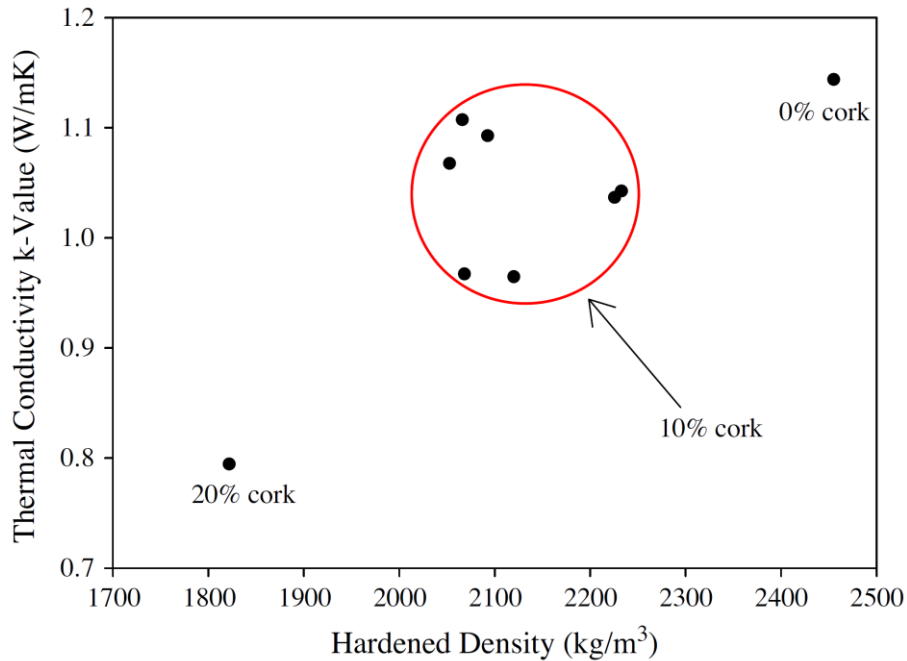


Figure II.26. Effet de l'ajout des granulats de liège sur la résistance à la flexion de composite (Karade, 2015)

#### 2.4.4. Conductivité thermique

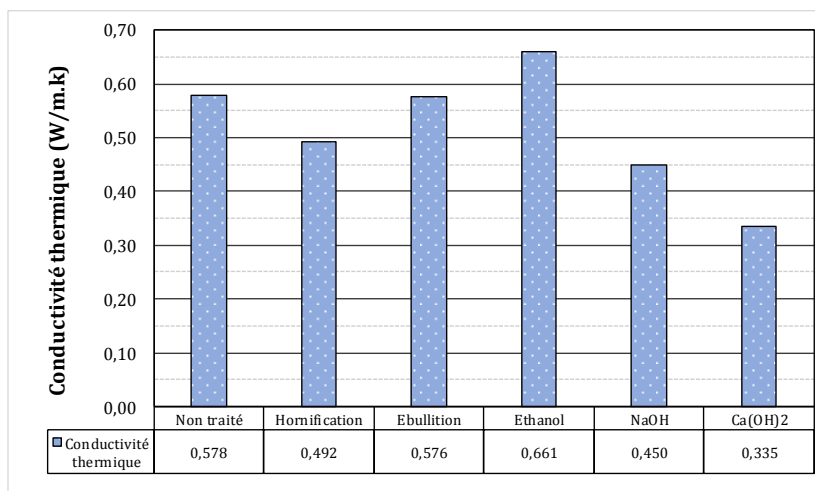
La conductivité thermique a suscité de l'intérêt par rapport aux travaux réalisés sur les composites de liège :

(Panesar & Shindman, 2012) ont produit des bétons à base des déchets de liège résidus de la fabrication de bouchons. Dans leur recherche, ces auteurs ont préparé plusieurs spécimens contenant différents pourcentages en liège (0%, 10%, 20%) avec différentes tailles (0.5/1), (2/3), (3/5), (3/8) et (6/14mm) comme substitution aux granulats conventionnels, ce qui a donné dix (10) mélanges différents désignés C1-10. Quant à l'évaluation de la conductivité thermique des mélanges préparés, les résultats ont montré que l'incorporation du liège dans les composites conduits à la diminution de leur conductivité thermique (Fig. II.27). Les bétons contenant 10% de liège (du C2 à C8) sous forme de sable et / ou de gravier ont montré une diminution pouvant aller jusqu'à 16% par rapport à celle du béton témoin C1. En revanche, pour un dosage de 20% en liège, le mélange C9 a montré une chute de 30%, améliorant ainsi considérablement la performance thermique du béton.



**Figure II.27.** Conductivité thermique des bétons de liège (Panesar et Shindman, 2012)

Dans un travail très récent, (Dahmani et Houari, 2019) ont évalué l'apport du prétraitement des granulats de liège sur la performance d'un béton incorporant 50% de liège, en volume. Les traitements choisis dans ce travail étaient : i) un traitement par hornification (5 cycles d'humidification/séchage), ii) un traitement par ébullition, iii) un traitement par l'éthanol, iv) un traitement à la soude NaOH et v) un traitement à la chaux Ca(OH)<sub>2</sub>. A travers cette étude, les auteurs ont réussi à produire des bétons ayant des conductivités thermiques oscillant entre 0.33 et 0.66 W/m.<sup>°K</sup>. Cette étude a montré que le traitement des particules de liège avant leur incorporation affecte considérablement la conductivité thermique des bétons. A l'exception du traitement à l'éthanol qui a engendré une augmentation de la conductivité, tous les traitements ont conduit à une diminution au niveau de cette propriété. Les baisses enregistrées étaient de l'ordre de 15, 22 et 42% par rapport à la conductivité du béton contenant des granulats de liège non-traité (Fig. II.28).



**Figure II.28.** Conductivité thermique des bétons de liège en fonction du traitement appliqué (Dahmani et Houari, 2019)

### 2.4.5. Microstructure

Bien que la microstructure des composites de liège soit un paramètre très important pour la bonne compréhension du comportement de ce type de composites, ce paramètre n'a pas été systématiquement étudié dans les travaux publiés dans la littérature consultée. Parmi les articles les plus récents, on peut citer le travail de **(Novais et coll., 2019)** qui visait la fabrication d'un composite ultraléger en utilisant des particules de liège. Au cours de cette étude et dans le but de comprendre les phénomènes qui se manifestent à l'intérieur du composite, **(Novais et coll., 2019)** ont réalisé des tests de Microscopie Electronique à Balayage (MEB) sur un composite contenant 63% de liège (Fig. II.29). Les images MEB obtenues ont montré l'absence d'une interface poreuse entre le liège et la matrice dense. Les résultats obtenus ont aussi révélé l'existence d'une matrice assez dense qui ne contient pratiquement pas de pores de grande taille.

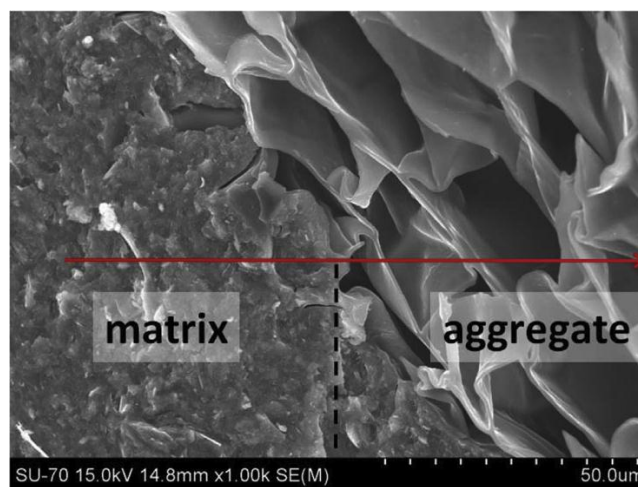


Figure II.29. Image MEB d'un composite contenant 65% de liège **(Novais et coll., 2019)**

## 2.5. Récapitulatif des travaux sur les composites de liège

La section précédente était destinée à la présentation des propriétés des composites de liège. Au regard de cette présentation, nous pouvons affirmer que le nombre de travaux effectués sur ce type de composites reste insuffisant pour étudier les différents paramètres influençant leurs propriétés.

Le Tableau II.8 récapitule la nature des expérimentations réalisées pendant la dernière décennie pour pouvoir identifier les facteurs qui nécessitent d'être examinés dans les prochains travaux. Il est clair, que toutes ces études ont été menées au laboratoire à la température ambiante pour la cure ; ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité.

Quels seraient donc les effets sur les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques, thermiques et de durabilité de ces composites par temps froid ou chaud ?



**Tableau II.8.** Récapitulatif des travaux récents sur les composites de liège

<b>Auteur, date</b>	<b>Type du composite</b>	<b>Problématique étudiée</b>	<b>Température de cure</b>
Panesar et Shindman, 2012	Mortier et béton de liège	Effet de la taille et du pourcentage de liège sur les performances thermomécaniques	23°C
Bràs et coll., 2013	Mortier de liège	Avantage d'utilisation du liège au lieu des granulats de polystyrène en termes de performance thermique	20°C
Moreira et coll., 2014	Béton de liège	Influence du dosage en ciment : étude des propriétés mécaniques et hygrothermiques des chapes de liège	23°C
Karade, 2015	Béton de liège	Evaluation des propriétés physico-mécaniques et les applications potentielles	20°C
Ziregue et coll., 2016	Mortier de liège	Effet de remplacement de la pâte cimentaire (0 à 70%) sur les propriétés mécaniques et hygrothermiques des mortiers	20°C
Boussetoua et coll., 2017	Mortier de liège	Effet de remplacement d'une partie de sable (0 à 75%) sur les propriétés mécaniques et hygrothermiques des mortiers : Etude expérimentale et numérique	23°C
Novais, 2018	Composite géopolymérique	Possibilité de produire un composite ultraléger et durable en utilisant des granulats de liège	23°C
Riouchi et Beleguendouzi, 2019	Béton de liège	Effet du temps d'immersion dans l'eau sur la performance du béton	23°C
Dahmani et Houari, 2019	Béton de liège	Effet du prétraitement des granulats de liège sur la performance du béton	23°C

## 2.6. Conclusion

L'utilisation de granulats légers dans l'industrie de la construction a suscité l'intérêt des chercheurs depuis longtemps. Dans ce deuxième chapitre, nous avons essayé dans un premier temps de mettre en évidence l'influence de la température sur quelques propriétés des granulats végétaux. Ensuite, nous sommes passés à la détermination de l'impact de la température de cure sur différentes propriétés des nouveaux bétons légers. A la fin de cette partie, nous avons conclu que l'effet de la variation de la température reste un paramètre sous-estimé vu la quantité insignifiante de travaux de la littérature. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons mis en relief les différentes propriétés des composites de liège en se basant sur les derniers travaux publiés. Cette dernière partie a été terminée par un tableau récapitulatif des différentes expérimentations conduites au laboratoire.

En se basant sur l'étude bibliographique élaborée, on a pu conclure que l'influence du pourcentage, de la taille des granulats et du dosage en liant sur les propriétés mécaniques et hygrothermiques a bien été déterminée. En revanche, en essayant de mettre la relation entre l'impact de la température sur les propriétés des granulats végétaux et des bétons légers, on a remarqué que l'étude de l'influence de la température de cure sur la performance des bétons de liège est fortement recommandée pour les prochains travaux puisque seulement les températures variant de 20 à 23 °C ont été testées.

## Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons effectué une revue bibliographique sur l'influence de la température de cure sur les propriétés du béton de liège. Notre travail a consisté à recueillir et discuter les travaux de recherche réalisés sur les bétons à base de granulats végétaux en général et les bétons de liège en particulier. Après une lecture critique, nous comprenons plus ou moins l'incidence liée à l'augmentation de la température sur les propriétés des bétons légers et les conséquences que cela induit sur les performances des composites de liège.

Nous présentons dans ce qui suit, les principaux enseignements à retenir à partir des résultats de la bibliographie recueillie :

- Vu la richesse de notre pays en termes de ressources végétales et particulièrement pour la production du liège, la valorisation de ce dernier dans le secteur des matériaux de construction s'avère plus que nécessaire,
- Les bétons verts ont des caractéristiques thermiques et acoustiques qui les qualifient pour se substituer au béton conventionnel particulièrement dans le domaine de l'isolation. En effet, l'étude des propriétés du liège a permis de mettre en revue sa grande légèreté liée à sa morphologie microstructurale ainsi que sa composition chimique spécifique qui lui confère à la fois un grand pouvoir isolant et une durabilité accrue,
- L'impact de la température sur les propriétés des granulats végétaux a été explicitement identifié. Ce paramètre doit indubitablement être pris en considération lors de la conservation des bétons verts,
- L'élévation de la température de cure des bétons à base de granulats végétaux durant les premiers stades de l'hydratation augmente le développement de la résistance en compression au jeune âge. En revanche, elle peut avoir des conséquences néfastes à long terme (perte notable en résistances mécaniques),
- L'augmentation de la température de cure est à l'origine d'un accroissement de la conductivité thermique des bétons légers. En effet, cette augmentation induit la diminution de leurs masses volumiques qui est une conséquence de l'augmentation de la porosité de ces composites lors de la cure,
- Le durcissement à température élevée diminue à long terme la perméabilité des bétons légers.
- Le taux de liège incorporé à la matrice cimentaire, la taille de ses granulats, le dosage en ciment et le mode de cure (temps d'immersion dans l'eau) sont des paramètres qui ont une grande influence sur la variation des propriétés des bétons de liège.

Dans le recueil des travaux publiés que nous avons consulté, la température de durcissement étudiée lors de la cure du béton de liège a été limitée aux conditions de températures normales ( $T \approx 20$  à  $23$  °C). Nous recommandons comme perspective de se rapprocher de la réalité, puisque les températures de cure des matériaux cimentaires peuvent dépasser les  $60$  °C. A ce titre, des travaux expérimentaux sur les bétons de liège

soumis à des températures variant entre 30 et 60 °C restent à faire. De plus, la microstructure des composites de liège ainsi que leur composition chimique demandent davantage d'investigations en vue de maîtriser leurs performances.

## Références bibliographiques

### Ouvrages

**ADEME Edition, (2010)** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie « Bâtiment - énergie - environnement ».

**Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE)**. Consommation énergétique finale de l'Algérie 2020.

**BEN HMID et coll., 2010**. Guide maghrébin des matériaux d'isolation thermique des bâtiments, réseau des entreprises Maghrébines pour l'environnement (REME), (Algérie, Maroc, Tunisie).

**BETHENCOURT De. (2013)** Efficacité énergétique : un gisement d'économies ; un objectif prioritaire. Paris : Les éditions des journaux officiels.

**CANAT R., PIAZZETTAR R. (2005)**. La levée du liège : Guide technique et de vulgarisation, Institut Méditerranéen du Liège.

**Charte des bouchonniers liègeurs CBL (2006)**. Fédération Française des Syndicats du Liège 5<sup>ème</sup> Edition-Novembre, 66p.

**VAUGE C., (2013)**. Le développement durable, nouvel enjeu pour l'humanisme Paris, l'université de Paris, France.

**BOCQUET H., (2013)** : l'isolation thermique pour le bâtiment, fiche technique.

**International Energy Agency (IEA)**. Key World Energy Statistics. 2020.

**MOREL N. et GNANSOUNOU E., (2008)**. 'Énergétique du Bâtiment', Cours 4/5<sup>ème</sup> année, Génie Civil, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Septembre. doi :<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117290>

**PEREIRA H., (2007)**. Cork: Biology, production and Uses. Elsevier.ISBN13. Oxford. UK.3 29p.

**Rapport BRUNDTLAND – Notre avenir à tous**. « Commission mondiale sur l'environnement et le développement ». Présidée par Gro Harlem Brundtland, 1987.

**THIERRY R., (2012)**. Les ponts thermiques dans les bâtiments performants, mutuelle des architectes français assurances, Les fiches d'informations techniques de la MAF sur la RT, Enertech.

**ROBILLARD Y., (2011)**. Guide vers un bâtiment durable : les équipements et solutions d'efficacité énergétique.

**JACQUEMOT F. (2015)**. Article Bétons « verts ». Développement d'une gamme de Béton Ultra Léger : Thermolitys.25pages.

**Thèses**

**ACHOUR A., (2017).** Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales. Thèse de doctorat en Génie Civil. Université de Tlemcen, Algérie, 166 pages.

**AKKAOUI A., (2014).** Bétons de granulats de bois. Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles. Thèse de doctorat. Universités Paris-Est doctorale science Ingénieur et environnement, France, 230 pages.

**CEREZO V., (2005).** Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat. L'Ecole Nationale des travaux publics de L'Etat, Lyon, France, 225 pages.

**CHABANNES M., (2016).** Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction. Thèse de doctorat. Matériaux composites et construction. Université Montpellier, France, 226 pages.

**CHAMOIN J., (2013).** Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. Thèse de doctorat en Génie Civil. INSA Rennes, France, 205 pages.

**GLE P., (2013).** Acoustique des matériaux du bâtiment à base de fibres et particules végétales - outils de caractérisation, modélisation et optimisation. Thèse de doctorat, Acoustique, INSA de LYON, France, 389 pages.

**HO THI, et THU NGA, (2008).** Etude de l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco. Thèse doctorat. Ecole de technologie supérieure université du QUÉBEC, 243 pages.

**LELIEVRE D., (2015).** Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés. Science des matériaux. Université de Bretagne Sud, France, 184 pages.

**MAGNIONT C., (2010).** Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'ag ressources. Thèse doctorat. Université de TOULOUSE III -PAUL SABATIER, France, 343 pages.

**NIYIGENA C., (2016).** Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne. Thèse doctorat. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 226 pages.

**NOZAHIC V., (2012).** Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant / végétal : application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce /chaux. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont II, France, 334 pages.

**SHINK M., (2003).** Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers. Thèse de doctorat. Universités Laval, Québec, Canada, 172 pages.

## Références bibliographiques

**SOTEHI N., (2010).** Caractéristiques thermiques des parois de bâtiments et amélioration de l'isolation. Thèse de doctorat. Université Mentouri, Constantine, Algérie, 157 pages.

**TRAN A D L., (2010).** Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment. Thèse de doctorat. Université de REIMS compacte Ardennes, 220pages.

**UMURIGIRWA B. S., (2014).** Élaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre-amidon pour le Bâtiment. Thèse doctorat. Universités de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE U.R.F Sciences Exactes et naturelles. Ecoles Doctorale Sciences Technologie Santé. 139 pages.

**YERMAK N. (2015).** Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres. Thèse de doctorat. Université de cergy-pontoise. 215 pages.

## Mémoires de master

**ABANI S., HAFSI F., KRIKER A., & BALI A., (2015).** Valorisation of Date Palm Fibers in Sahara Constructions". *Energy Procedia*, Vol. 74, pp. 289-293.

**ACHOUR A., GHOMARI F., BELAYACHI N., (2017).** Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers, *Journal of Adhesion Science and Technology*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2017.1290572>.

**ALI M., LIU A., SOU H. & CHOUW N., (2012).** Mechanical and dynamic properties of coconut fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 30, pp. 814-825.

**ALQAHTANI F. K., ZAFAR I., (2019).** Characterization of processed lightweight aggregate and its effect on physical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 230, 1-14. doi : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116992>.

**ARRACHE A. (2018).** Etude des paramètres de la qualité du liège de plaine et de montagne de quelques subéraies oranaises (BENI OUARSOUS –MSILA vs HFIR –NASMOTH) Mémoire master. Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Algérie, 90 pages.

## Articles et communications

**BEDERINA M., BELHADJ B., AMMARI M. S., GOUILLEUX A., MAKHLOUFI Z., MONTRELAY N., & QUÉNEUDÉC M., (2016).** Improvement of the properties of a sand concrete containing barley straws – Treatment of the barley straws. *Construction and Building Materials*, 115, 464-477. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.065.

**BENMANSOUR N., AGOUDJIL B., GHERABLI A., KARECHE A., BOUDENNE A., (2014).** Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, 81, pp. 98-104.

**BOUBEKEUR T., EZZIANE K., & KADRI E.-H., (2014).** Estimation of mortars compressive strength at different curing temperature by the maturity method. *Construction and Building Materials*, vol. 71, pp. 299–307.

## Références bibliographiques

**BOUSSETOUA H., MAALOUF C., LACHI M., BELHAMRI A., & MOUSSA T., (2017).** Mechanical and hygrothermal characterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-16. Doi: 10.1080/19648189.2017.1397551

**BRÁS A., LEAL M., & FARIA P., (2013).** Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials*, 49, 315-327. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006>

**DAHMANI A., & HOUARI M., (2019).** Optimisation des performances d'un béton vert à base de granulats de liège : Effet du prétraitement des granulats de liège. Mémoire master. Université AbouBekr Belkaïd Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 99 pages.

**DIB M. R., & AMARA A., (2018).** Influence du mode de malaxage sur les propriétés du béton de liège. Mémoire master. Université AbouBekr Belkaïd Tlemcen, Algérie, 106 pages. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.087>

**GARAVAGLIA V., & BESACIER C., (2012).** State of Mediterranean Forests. Fête de liège. 14-15 juin. Vivès.

**JHA S. K., & SINGH A., (2007).** Physical and thermal properties of untreated and chemically treated rice husk, *J. Agric. Eng.*, vol. 44, n°. 4.

**JIANG CH., JIN CH., WANG Y., YAN SH., & CHEN D., (2018).** Effect of heat curing treatment on the drying shrinkage behavior and microstructure characteristics of mortar incorporating different content ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 168, 379 -387. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.079>

**JOVE P., OLIVELLA M.A., & CANO L., (2011).** Study of the variability in chemical composition of barklayers of *Quercus suber* L. from different production areas. *Bio Resources*, 6 (2), 1806-1815.

**KARADE S. R., (2016).** Potential of Cork Cement Composite as a Thermal Insulation Material. *Key Engineering Materials*, 666, 17-29. Doi : 10.4028/[www.scientific.net/KEM.666.17](http://www.scientific.net/KEM.666.17)

**LIU B., LUO G., & XIE Y., (2018).** Effect of curing conditions on the permeability of concrete with high volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 167, 359-371. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.190>

**DIBLASIO BROCHARD L., (2011).** Le développement durable : enjeux de définition et de mesurabilité. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en science politique. Université du Québec à Montréal.

**MANUEL C., (2012).** La Forêt de Chêne-liège du Portugal AMORIM ISOLAMENTOS, S.A. Fête de liège 14-15 juin. Vivès.

**MEADOWS D. H., MEADOWS D. L., RANDERS J., & BEHRENS W. W., (1972).** The limits to growth. New York: Universe Books.



## Références bibliographiques

**MOREIRA A., ANTÓNIO J., & TADEU A., (2014).** Lightweight Screed Containing Cork Granules: Mechanical and Hygrothermal Characterization. *Cement and Concrete Composites* 49, 1– 8. Doi : 10.1016/j.cemconcomp.2014.01.012.

**NGUYEN L. H., BEAUCOUR A. L., ORTOLA S., & NOUMOWÉ A., (2017).** Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures. *Construction and Building Materials*, 151, 720-731.

**NOVAIS R. M., SENFF L., CARVALHEIRAS J., SEABRA M.P., PULLAR R.C., LABRINCHA J.A., (2019).** Sustainable and efficient cork - inorganic polymer composites: An innovative and ecofriendly approach to produce ultra-lightweight and low thermal conductivity materials. *Cement and Concrete Composites*, 97, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.024>

**PANESAR DK., SHINDMAN B., (2012).** The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement Concr. Compos* 34, 982–992.

**REHMAN M.U., KHURAM R., EHSAN H B., MURID H., NASIR SH., (2019).** Physico-mechanical performance and durability of artificial light weight aggregates synthesized by cementing and geopolymerization, *Construction and Building Materials*, 232, 1-14.

**RIOUCHI I. & BELGUENDOUI W., (2019).** Optimisation des performances d'un béton vert à base de granulats de liège : Effet des conditions de cure. Mémoire master. Université AbouBekr Belkaïd Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 113 pages.

**SALIH M. A., FARZADNIA N., ABANG ALI A. A., DEMIRBOGA R., (2015).** Effect of different curing temperatures on alkali activated palm oil fuel ash paste. *Construction and Building Materials*, 94, 116-125. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.052>

**SILVA SP., SABINO MA., & FERNANDES EM., (2005).** Cork properties, capabilities, and applications. *Int. Mater*, 50, 345–365

**TRAORE Y. B., MESSAN A., HANNAWI K., GERARD J., PRINCE W., & TSOBNANG F. (2018).** Effect of oil palm shell treatment on the physical and mechanical properties of light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 452-460. Doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.155

**ZIREGUE A., MOULDI K.H.M., MONTRELAY N., & QUÉNEUDÉC M., (2016).** Developmental potentiality of insulating light weight concrete based on cork and calcare ous sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30:9, 934-946. Doi: 10.1080/01694243.2015.1129882

## **Sites web**

[http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odyseedeveloppementdurable/files/5/rapport\\_bru\\_ndtland.pdf](http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odyseedeveloppementdurable/files/5/rapport_bru_ndtland.pdf) consulté le 20/08/2020

<https://www.conseils-isolations-france.com/isolation-mur-exterieur/> Consulté le 24/08/2020

<https://www.ecobati.com/fr/success-story/420/le-charme-du-liege-apparent> Consulté le 24/08/2020

## Références bibliographiques

<https://www.ecobati.com/fr/success-story/420/le-charme-du-liege-apparent> Consulté le 24/08/2020

<https://freshidees.com/deco/bouchon-de-liege-objets-utiles-et-deco/> consulté le 24/08/2020

[http://iso-cork.com/1\\_6\\_li-ge-pour-mur-et-parquet.html](http://iso-cork.com/1_6_li-ge-pour-mur-et-parquet.html) Consulté le 24/08/2020

<https://www.planeteliege.com/tout-sur-le-liege/le-liege-et-lenvironnement/le-recyclage-des-bouchons-de-liege/pourquoi-recycler-les-bouchons-de-liege/> Consulté le 27/08/2020

<http://www.aps.dz/economie/82759-liege-hausse-de-la-production-a-plus-de-86-000-quintaux-en-2018> consulté le 04/09/2020

