

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** : DAHMANI Anes & HOUARI Mohammed

### **Sujet**

Optimisation des performances d'un béton vert à base de granulats de liège :  
Effet du prétraitement des granulats de liège

Soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2019, devant le jury composé de :

|                      |                         |               |                          |
|----------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|
| M. BOUKLI S.M.A.     | Professeur              | Univ. Tlemcen | Président                |
| M. GHOMARI F.        | Professeur              | Univ. Tlemcen | Directeur de mémoire     |
| M. TALEB O.          | Maître de conférences B | Univ. Tlemcen | Co- Directeur de mémoire |
| M. TEDJDITI A.K.     | Doctorant               | Univ. Tlemcen | Co- Directeur de mémoire |
| M. TOUIL B.          | Maître de conférences B | Univ. Saïda   | Examineur                |
| M. BOUHRAOUA<br>R.T. | Professeur              | Univ. Tlemcen | Invité                   |

## Remerciements

Ce projet a été réalisé au sein du Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (EOLE) à l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudee à notre cher professeur et encadrant **Pr. Ghomari Fouad** pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet.

Nous tenons à remercier également notre encadrant **Dr. Taleb Omar** pour le temps qu'il a consacré et pour les précieuses informations qu'il nous a prodigués avec intérêt et compréhension.

Nous voudrions présenter nos sincères remerciements à **Mr. Tedjditi Ahmed Kamel** (Doctorant à l'université de Tlemcen) de nous avoir aidé et guidé durant toute la progression de ce mémoire, dans laquelle il été un ami et un frère à la fois.

Nous adressons aussi nos vifs Remerciements aux membres de jurys (**Pr. Boukli Hacène S.M.A et Dr. Touil Brahim**), Pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail. Ainsi que nos chers enseignants.

Nous ne laisserons pas cette occasion passer, sans remercier nos familles pour leur soutien moral et financier, et pour leurs sacrifices. Par la même occasion, on tient à remercier tous nos amis ainsi que tous les étudiants de la promotion de Génie Civil (2018-2019).

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## Liste des Symboles

**R** : la résistance thermique [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ].  
 **$\lambda$**  : la conductivité thermique [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]. [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]  
 **$\rho$**  : la masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].  
**d** : la masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].  
**SSP** : Surface spécifique [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ].  
**K** : constante de l'appareil (perméabilimètre Blaine).  
**n** : porosité.  
 **$M_{v \text{ abs}}$**  : masse volumique absolue en [ $\text{t}/\text{m}^3$ ].  
**t** : temps d'écoulement [s].  
 **$\mu$**  : viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ].  
 **$M_f$**  : module de finesse.  
**Rc** : pourcentage des refus cumulés [%].  
**E** : module de Young [GPa].  
**T** : la température en [ $^{\circ}\text{C}$ ] ou [ $^{\circ}\text{K}$ ].  
**MV app** : Masses volumiques apparente en [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].  
**MV abs** : Masse volumique absolue des granulats en [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].  
 **$M_s$**  : Masse sèche des granulats en [g].  
 **$M_{\text{sat}}$**  : Masse des granulats saturés en [g].  
**Ab** : Coefficient d'absorption d'eau des granulats minéraux [%].  
**M** : la masse en [kg].  
**V** : volume en [ $\text{m}^3$ ].  
**t** : temps en [s].  
**L** : Longueur de l'éprouvette en [m].  
**v** : la vitesse en [m/s].  
 **$\sigma$**  : La résistance à la compression/flexion en [MPa].  
**F** : La force maximale de compression [N].  
**S** : La surface de l'éprouvette [ $\text{mm}^2$ ].  
**P** : La charge appliquée en flexion [N].  
**b** : Coté de l'éprouvette prismatique [m].

## Liste des Acronymes

**IEA** : Agence internationale de l'énergie.  
**GES** : gaz à effet de serre.  
**CO<sub>2</sub>** : le dioxyde de carbone.  
**ITE** : isolation thermique par l'extérieur.  
**R** : Direction radiale.  
**NR** : Direction non radiale.  
**Ca(OH)<sub>2</sub>** : La chaux.  
**NaOH** : La soude.  
**MEB** : La microscopie électronique à balayage.

**E.N.G** : l'Entreprise Nationale des Granulats.

**LTPO** : Laboratoire des Travaux Publiques Ouest.

**(S.CI.B.S)** : société des ciments de Béni-Saf.

**(S.O.C)** : S.A.R.L Orachem Concrete.

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

## Résumé

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons conduit au laboratoire EOLE, l'étude à la fois de l'influence du prétraitement des granulats de liège sur leurs propriétés intrinsèques ainsi que sur l'affaissement, les propriétés physiques (masses volumiques, vitesse ultrasonore et absorption en eau), mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) et thermiques (conductivité thermique) du béton de liège. Le squelette granulaire de ce dernier est composé de 50 % de granulats de liège.

Le prétraitement des granulats de liège avant leur incorporation dans le béton, est réalisé grâce à cinq méthodes : Hornification, Ebullition, Ethanol, NaOH et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Les résultats obtenus ont montré que le traitement des granulats de liège amène la diminution de leur masse volumique et une modification importante au niveau de leur structure morphologique. En revanche, pour les bétons, les prétraitements des granulats de liège à l'aide de l'éthanol et l'ébullition améliorent l'affaissement du béton. Aussi, ces prétraitements conduisent à l'augmentation de la masse volumique, de la vitesse ultrasonore et l'absorption en eau des bétons de liège. De plus, la majorité de ces traitements conduisent à l'affaiblissement de la résistance à la flexion et la baisse de la conductivité thermique.

### **Mots clés :**

Liège, Béton vert, prétraitement, propriétés physico-mécaniques, conductivité thermique.

## Table de matières

|   |      |
|---|------|
| Remerciements .....   | II   |
| Liste des Symboles .....  | III  |
| Liste des Acronymes .....   | III  |
| Résumé .....  | V    |
| Table de matières .....   | VI   |
| Liste de Figures .....  | X    |
| Liste des Tableaux .....  | XIII |
| Introduction générale.....  | 1    |
| 1. Le liège dans la construction : une solution prometteuse .....       | 3    |
| 1.1. Introduction .....   | 3    |
| 1.2. Le bâtiment et l'énergie .....                                     | 3    |
| 1.2.1. Développement durable.....                                       | 3    |
| 1.2.2. Dégradation de l'environnement.....                              | 4    |
| 1.2.3. Consommation énergétique.....                                    | 5    |
| 1.2.4. Consommation énergétique du secteur résidentiel.....             | 6    |
| 1.2.5 Les techniques actives .....                                      | 7    |
| 1.2.5.1. Les systèmes technologiques « intelligents » .....             | 7    |
| 1.2.6. Les techniques passives.....                                     | 7    |
| 1.2.6.1. Le système de chauffage .....                                  | 7    |
| 1.2.6.2. L'équipement électrique .....                                  | 7    |
| 1.2.6.3. L'architecture .....   | 7    |
| 1.2.6.4. Isolation thermique .....                                      | 8    |
| 1.3. Principe et piliers de l'isolation thermique.....                  | 8    |
| 1.3.1. Les propriétés isolantes du matériau .....                       | 8    |
| 1.3.1.1. Le rayonnement du matériau.....                                | 8    |
| 1.3.1.2. Les échanges thermiques (convection) .....                     | 8    |
| 1.3.1.3. La performance thermique des parois.....                       | 9    |
| 1.3.2. Les ponts thermiques, sources de désagréments au quotidien ..... | 9    |
| 1.4. Types d'isolation thermique .....                                  | 10   |
| 1.4.1. Isolation thermique par l'extérieur .....                        | 10   |
| 1.4.2. Isolation thermique par l'intérieur.....                         | 11   |
| 1.5. Les isolants .....   | 12   |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 1.6.      | Les bétons à base de particules végétales .....                 | 13 |
| 1.6.1.    | Béton de Diss .....   | 13 |
| 1.6.2.    | Béton de sisal .....  | 14 |
| 1.6.3.    | Béton de chanvre .....  | 15 |
| 1.6.4.    | Béton de liège .....  | 16 |
| 1.7.      | Le liège .....  | 17 |
| 1.7.1.    | Morphologie du liège .....                                      | 18 |
| 1.7.2.    | Composition chimique du liège.....                              | 19 |
| 1.7.3.    | Propriétés de liège .....                                       | 19 |
| 1.7.3.1.  | Propriétés mécaniques .....                                     | 19 |
| 1.7.3.2.  | Propriétés physiques .....                                      | 20 |
| 1.8.      | Conclusion .....  | 20 |
| 2.        | Bétons verts à base de particules végétales traitées .....      | 22 |
| 2.1.      | Introduction : .....  | 22 |
| 2.2.      | Effets du prétraitement des particules végétales.....           | 22 |
| 2.2.1.    | Effet sur les caractéristiques des particules végétales .....   | 22 |
| 2.2.1.1.  | Adhésion .....  | 23 |
| 2.2.1.2.  | Masse volumique .....   | 23 |
| 2.2.1.3.  | Composition chimique : .....                                    | 25 |
| 2.2.1.4.  | Perte de masse : .....  | 25 |
| 2.2.2.    | Effet du traitement sur les performances des bétons .....       | 26 |
| 2.2.2.1.  | Affaissement (maniabilité).....                                 | 26 |
| 2.2.2.2.  | Masse volumique .....   | 26 |
| 2.2.2.3.  | Résistance à la compression : .....                             | 28 |
| 2.2.2.4.  | Flexion : .....   | 31 |
| 2.2.2.5.  | Retrait.....  | 34 |
| 2.2.2.6.  | Propriétés thermiques (conductivité) .....                      | 35 |
| 2.2.2.7.  | Module d'élasticité : .....                                     | 36 |
| 2.2.2.8.  | Porosité : .....  | 37 |
| 2.2.2.9.  | Vitesse ultrasonore : .....                                     | 38 |
| 2.2.2.10. | Capillarité.....  | 39 |
| 2.3.      | Conclusion .....  | 40 |
| 3.        | Caractérisation des matériaux & procédures expérimentales ..... | 41 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 3.1.     | Introduction .....  | 41 |
| 3.2.     | Caractérisation des matériaux.....  | 41 |
| 3.2.1.   | Ciment.....   | 41 |
| 3.2.2.   | Eau.....  | 43 |
| 3.2.3.   | Granulats minéraux .....  | 44 |
| 3.2.3.1. | Analyse granulométrique des granulats .....   | 45 |
| 3.2.3.2. | Masses volumiques des granulats .....   | 45 |
| 3.2.3.3. | Absorption.....   | 46 |
| 3.2.4.   | Granulats végétaux :.....   | 47 |
| 3.2.4.1. | Analyse granulométrique des classes de liège : .....                                  | 48 |
| 3.2.4.2. | Masses volumiques des classes de liège .....  | 49 |
| 3.2.4.3. | Absorption.....   | 49 |
| 3.3.     | Formulation des bétons.....   | 50 |
| 3.3.1.   | Composition .....   | 50 |
| 3.3.2.   | Mode de malaxage .....  | 51 |
| 3.4.     | Caractérisation du béton à l'état frais :.....  | 53 |
| 3.4.1.   | Mesure de la consistance .....  | 53 |
| 3.5.     | Caractérisation du béton à l'état durci.....  | 54 |
| 3.5.1.   | Masse volumique.....  | 54 |
| 3.5.2.   | Transmission ultrasonique : .....   | 54 |
| 3.5.3.   | Absorption.....   | 55 |
| 3.5.4.   | Résistance à la compression .....   | 56 |
| 3.5.5.   | Résistance à la traction par flexion .....  | 57 |
| 3.5.6.   | Conductivité thermique .....  | 58 |
| 3.5.7.   | Microscopie électronique à balayage (MEB).....  | 59 |
| 3.6.     | Conclusion.....   | 59 |
| 4.       | Apport du prétraitement sur les propriétés des granulats et des bétons de liège ..... | 61 |
| 4.1.     | Introduction .....  | 61 |
| 4.2.     | Traitements utilisés.....   | 61 |
| 4.3.     | Effets des traitements sur les propriétés des granulats .....                         | 63 |
| 4.3.1.   | Masse volumique et inspection visuelle.....   | 63 |
| 4.3.2.   | Microstructure .....  | 65 |
| 4.4.     | Effet sur les propriétés des bétons de liège.....                                     | 67 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 4.4.1.                                   | Affaissement.....                          | 67 |
| 4.4.2.                                   | Propriétés physiques.....                  | 68 |
| 4.4.2.1.                                 | Masse volumique .....                      | 68 |
| 4.4.2.2.                                 | Vitesse des ultrasons .....                | 70 |
| 4.4.2.3.                                 | Absorption.....                            | 71 |
| 4.4.3.                                   | Propriétés mécaniques.....                 | 73 |
| 4.4.3.1.                                 | Résistance à la compression.....           | 73 |
| 4.4.3.2.                                 | Résistance à la traction par flexion ..... | 74 |
| 4.4.3.3.                                 | Courbes de capacité .....                  | 75 |
| 4.4.4.                                   | Conductivité thermique .....               | 76 |
| 4.5.                                     | Conclusion .....                           | 78 |
| Conclusion générale et perspectives..... |  | 80 |
| Références bibliographiques .....        |  | 82 |

## Liste de Figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1.1</b> : Les piliers du concept de développement durable (Benhalilou, 2008).....  | 4  |
| <b>Figure 1.2</b> : Consommation finale totale par secteur (IEA, 2018).....  | 5  |
| <b>Figure 1.3</b> : Plus grandes utilisations finales d'énergie par secteur (IEA, 2017). ....  | 6  |
| <b>Figure 1.4</b> : Répartition de la consommation finale par secteur (APRUE, 2015).....   | 6  |
| <b>Figure 1.5</b> : Causes et endroits des ponts thermiques (ADEME, 2018).....   | 9  |
| <b>Figure 1.6</b> : Répartition des déperditions thermiques dans une habitation (Source : Zephir). 10  |    |
| <b>Figure 1.7</b> : plante de Diss à l'état naturel (Sellami, 2013).....   | 14 |
| <b>Figure 1.8</b> : Fibres de sisal. ....  | 15 |
| <b>Figure 1.9</b> : Plante de chanvre et différents types de fibres du chanvre (Chamoin, 2013) & (Achour, 2017). ....  | 16 |
| <b>Figure 1.10</b> : Représentation schématique de la structure de la paroi cellulaire du liège (Pereira, 2007).....   | 18 |
| <b>Figure 1.11</b> : Représentation schématique de la disposition cellulaire de liège (Silva, 2005).18   |    |
| <b>Figure 2.1</b> : Evaluation de la masse de la paille en fonction des types de traitement (Bederina et coll., 2016).....   | 23 |
| <b>Figure 2.2</b> : Perte de masse lors du séchage des échantillons (Traoré et coll., 2018). ....  | 26 |
| <b>Figure 2.3</b> : Masse volumique du béton de paille d'orge en fonction des traitements utilisés (Bederina et coll., 2016).....                                  | 28 |
| <b>Figure 2.4</b> : Comparaison des résistances à la compression avant et après traitement du bois en fonction de la teneur en bois (Bederina et coll., 2009)..... | 29 |
| <b>Figure 2.5</b> : Résistance à la compression à 28 jours du béton de paille d'orge en fonction du type de traitement (Bederina et coll., 2016). ....             | 29 |
| <b>Figure 2.6</b> : Résistances mécaniques du béton de Diss en fonction des divers traitements subis par la fibre de Diss (Sellami et coll., 2013).....            | 30 |
| <b>Figure 2.7</b> : Résistance à la flexion (28 jours) du béton de paille d'orge en fonction du type de traitement (Bederina et coll., 2016).....                  | 31 |
| <b>Figure 2.8</b> : Résistance à la traction par flexion des mortiers renforcés de fibres de Diss (Achour et coll., 2017). ....                                    | 33 |
| <b>Figure 2.9</b> : Résistance à la traction par flexion des mortiers renforcés de fibres de Doum (Achour et coll., 2017). ....                                    | 33 |
| <b>Figure 2.10</b> : Evolution du retrait de séchage du béton de coquilles de palmier traité en fonction du temps (Traoré et coll., 2018).....                     | 34 |
| <b>Figure 2.11</b> : Evolution du retrait du béton de paille d'orge en fonction du temps (Bederina et coll., 2016).....  | 35 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 2.12</b> : La variation de la conductivité thermique du béton de coquilles de palmier d'huile en fonction du type de traitement (Traoré et coll., 2018). ..... | 36 |
| <b>Figure 2.13</b> : Variation de la conductivité thermique des bétons de Diss et de Doum en fonction de la teneur en fibres traitées (Achour et coll., 2017). .....     | 36 |
| <b>Figure 2.14</b> : Module d'élasticité des bétons OPS en fonction du type de traitement (Traoré et coll., 2018). .....   | 37 |
| <b>Figure 2.15</b> : Variation de la porosité des mortiers renforcés de fibres brutes .....<br>de Diss et traitées (Achour et coll., 2017). .....                        | 37 |
| <b>Figure 2.16</b> : Variation de la porosité des mortiers renforcés de fibres brutes .....<br>de Doum et traitées (Achour et coll., 2017). .....                        | 38 |
| <b>Figure 2.17</b> : Vitesse ultrasonore estimée sur des bétons d'OPS traités (Traoré et coll., 2018)<br>.....   | 39 |
| <b>Figure 3.1.</b> a) Entonnoir et b) perméabilimètre Blaine.....  | 42 |
| <b>Figure 3.2.</b> Super-plastifiant utilisé pour la formulation des bétons. ....  | 43 |
| <b>Figure 3.3.</b> Essai d'étalement au mini-cône. ....  | 44 |
| <b>Figure 3.4.</b> Courbe d'étalement au mini-cône des pâtes de ciment adjuvantées. ....   | 44 |
| <b>Figure 3.5.</b> Courbes granulométriques des granulats minéraux. ....   | 45 |
| <b>Figure 3.6.</b> Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats minéraux utilisés.....  | 46 |
| <b>Figure 3.7.</b> Absorption d'eau des granulats minéraux utilisés. ....  | 47 |
| <b>Figure 3.8.</b> Les classes des granulats de liège utilisés.....  | 48 |
| <b>Figure 3.9.</b> Courbes d'analyse granulométrique des granulats de liège utilisés.....  | 48 |
| <b>Figure 3.10.</b> Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats de liège utilisés. ....                                      | 49 |
| <b>Figure 3.11.</b> Immersion des échantillons de liège. ....  | 50 |
| <b>Figure 3.12.</b> Malaxeur utilisé pour la formulation de bétons. ....   | 52 |
| <b>Figure 3.13.</b> Table vibrante utilisée pour le serrage des échantillons de béton.....   | 52 |
| <b>Figure 3.14.</b> Rectification des surfaces des éprouvettes à l'aide de la scie à béton. ....   | 53 |
| <b>Figure 3.15.</b> Essai d'affaissement au cône d'Abrams .....  | 53 |
| <b>Figure 3.16.</b> Essais de masse volumique des bétons. ....   | 54 |
| <b>Fig 3.17.</b> Différentes techniques de mesure avec l'ultrason (BS EN 12504-4 :2004). .....   | 55 |
| <b>Figure 3.18.</b> Essai à l'ultrason. ....   | 55 |
| <b>Fig 3.19.</b> Immersion totale des échantillons dans l'eau. ....  | 56 |
| <b>Figure 3.20</b> : Presse de capacité 600 KN. ....   | 57 |
| <b>Fig 3.21.</b> Portique didactique .....   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 3.22.</b> Essai de conductivité thermique. ....   | 59 |
| <b>Figure 3.23.</b> Analyse microscope électronique à balayage (MEB). ....                        | 59 |
| <b>Figure 4.1.</b> Liège traité par Hornification.....  | 66 |
| <b>Figure 4.2.</b> Liège traité par Ebullition .....  | 66 |
| <b>Figure 4.3.</b> Liège traité par l’Ethanol .....   | 66 |
| <b>Figure 4.4.</b> Liège traité par NaOH.....   | 66 |
| <b>Figure 4.5.</b> Liège traité par Ca(OH) <sub>2</sub> .....                                     | 67 |
| <b>Figure 4.6.</b> Liège non-traité .....   | 67 |
| <b>Figure 4.7.</b> Affaissement des bétons de liège.....  | 68 |
| <b>Figure 4.8.</b> Masse volumique des bétons de liège à 28 jours. ....                           | 69 |
| <b>Figure 4.9.</b> Masse volumique des bétons de liège à différents âges.....                     | 70 |
| <b>Figure 4.10.</b> Vitesses des ultrasons des bétons de liège traité. ....                       | 71 |
| <b>Figure 4.11.</b> Absorption des bétons de liège .....  | 72 |
| <b>Figure 4.12.</b> Résistance à la compression en fonction de la vitesse des ultrasons. ....     | 74 |
| <b>Figure 4.13.</b> Résistance à la flexion pour les bétons de liège.....                         | 75 |
| <b>Figure 4.14.</b> Courbes de capacité des différents bétons de liège.....                       | 76 |
| <b>Figure 4.15.</b> Conductivité thermique des bétons de liège. ....                              | 77 |
| <b>Figure 4.16.</b> Relation entre la conductivité thermique du béton et sa masse volumique ..... | 77 |

## Liste des Tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1.1</b> : Caractéristiques des différents matériaux isolants (Jayr, 2010).....  | 12 |
| <b>Tableau 2.1</b> : Effet de différents traitements sur la masse volumique des fibres d’OPS (Traoré et coll., 2018).....  | 24 |
| <b>Tableau 2.2</b> : Effet de traitement sur la masse volumique des fibres de Diss (Sallami et coll., 2013).....   | 24 |
| <b>Tableau 2.3</b> : Composition chimique des fibres de bagasse de canne à sucre traitées et non traitées (Cabral et coll., 2018). ....  | 25 |
| <b>Tableau 2.4</b> : Variation de la masse volumique du béton d’OPS par type de traitement (Traoré et coll., 2018).....  | 27 |
| <b>Tableau 2.5</b> : Masse volumique du béton de copeaux de bois en fonction des traitements utilisés (Bederina et coll., 2009).....   | 28 |
| <b>Tableau 2.6</b> : Résistance à la compression des bétons de coquilles à palmier d’huile traités (Traoré et coll., 2018).....  | 31 |
| <b>Tableau 2.7</b> : Résistance à la flexion des bétons de coquilles à palmier d’huile traités (Traoré et coll., 2018).....  | 32 |
| <b>Tableau 2.8</b> : Nomenclature des mortier étudiés dans le travail de Achour & coll, 2017 .....   | 32 |
| <b>Tableau 2.9</b> : Retrait des composites à base de sable de dune (DS) et sable de rivière en fonction du contenu et du traitement du bois de rasage (Bederina et coll., 2009). .... | 34 |
| <b>Tableau 2.10</b> : La variation de la porosité et la teneur en air des bétons d’OPS traités (Traoré et coll., 2018).....  | 38 |
| <b>Tableau 3.1.</b> Masses volumiques et surface spécifique du ciment CPJ CEM II/A 42.5 utilisé. ....  | 42 |
| <b>Tableau 3.2.</b> Composition chimique de l’eau utilisée (LTPO). ....  | 43 |
| <b>Tableau 3.3.</b> Masses volumiques des granulats minéraux utilisés. ....  | 46 |
| <b>Tableau 3.4</b> : Coefficient d’absorption d’eau des granulats minéraux utilisés. ....  | 47 |
| <b>Tableau 3.5.</b> Masses volumiques des granulats de liège. ....   | 49 |
| <b>Tableau 3.6.</b> Coefficients d’absorptions des différents granulats de liège.....  | 50 |
| <b>Tableau 3.7</b> : Composition de 1m <sup>3</sup> de béton ordinaire en (kg/m <sup>3</sup> ). ....   | 51 |
| <b>Tableau 3.8.</b> Composition de 1m <sup>3</sup> du béton de liège (en kg/m <sup>3</sup> ). ....   | 51 |
| <b>Tableau 4.1.</b> Différents traitements utilisés.....   | 61 |
| <b>Tableau 4.2.</b> Masses volumiques et solutions récupérées des granulats traités .....  | 64 |
| <b>Tableau 4.3.</b> Absorption des bétons de liège pour différents traitements. ....   | 72 |
| <b>Tableau 4.4.</b> Valeurs des résistances à la compression à 28 jours des bétons testés en MPa. 73   |    |
| <b>Tableau 4.5.</b> Influence des traitements sur les différentes performances du béton de liège. ..   | 79 |

# Introduction générale

L'urbanisation galopante et le développement croissant des pays du sud, sont à l'origine de la demande mondiale accrue en énergie ainsi qu'à la dégradation progressive de l'environnement. Dans ce contexte, ces menaces risquent de s'intensifier de façon exponentielle si les activités humaines ne sont pas plus efficaces en termes de consommation énergétique, et d'émission de CO<sub>2</sub>.

Il est clair que le secteur résidentiel, au même titre que les autres secteurs, a une part de responsabilité dans la dégradation de l'environnement et des émissions des gaz à effet de serre (GES). Donc bâtir de façon durable est devenu un enjeu majeur. Pour relever ce défi, des solutions technologiques sont mises en place pour concevoir des bâtiments pérennes.

A l'instar des pays en voie de développement, l'Algérie a adopté une stratégie de développement durable reposant sur différents axes. Parmi ces axes, on cite l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur du logement qui peut se concrétiser par l'application d'une isolation thermique de parois constituant leur enveloppe.

Récemment dans le concept qui consiste à améliorer les performances thermiques des ouvrages, les matériaux d'origine végétale sont très répandus par leurs propriétés qui les rendent durables, sans impact pour l'environnement et à la fois d'excellents isolants thermiques et phoniques. Plusieurs études ont confirmé que l'incorporation de ces particules dans des matrices cimentaires, influent de façon directe sur les propriétés des composites qui les contiennent. Ces agro-bétons sont connus principalement par leurs bonnes performances thermiques. Cependant, ils ont une mauvaise résistance mécanique qui empêche leur utilisation structurelle.

Le béton de liège, sujet de notre étude, est obtenu en effectuant un remplacement, en volume, de 50% des granulats minéraux par son équivalent en granulats de liège. Cependant, la nature végétale des particules de liège, notamment leur composition chimique (pectine, tanins et polyphénols) peut causer de véritables problèmes lors de leur introduction dans une matrice cimentaire, tels que, l'inhibition de l'hydratation du ciment. Afin de surmonter cette problématique, les travaux de littérature consultés proposent d'effectuer un traitement de ces granulats, avant leur incorporation dans une matrice cimentaire.

Dans ce travail notre, campagne expérimentale consiste à évaluer l'effet des différents traitements opérés sur les granulats de liège sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques d'un béton à base d'un mélange, en volume égal, de granulats minéraux et granulats de liège.

Ce travail expérimental est organisé en quatre chapitres :

Une analyse bibliographique est élaborée dans le premier chapitre relatif aux concepts de base liés au contexte général de notre étude, où on présente en premier lieu les notions du développement durable, ainsi que l'impact du secteur du bâtiment sur la dégradation de l'environnement et la consommation énergétique. Par la suite, nous présentons une synthèse

bibliographique des différents types de bétons végétaux et surtout ceux réalisés sur les bétons de liège, sujet d'intérêt de notre recherche.

Le deuxième chapitre est consacré à un état de l'art sur certains aspects de la caractérisation des particules végétales, ainsi que l'influence de différents traitements des particules végétales avant leur l'incorporation dans les composites à matrices cimentaires.

On présente dans le troisième chapitre, les matériaux utilisés pour la préparation de nos bétons et les moyens et méthodes expérimentales employées pour leur caractérisation. On décrit, à la fin, le programme expérimental préconisé.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des différents traitements que nous avons effectuée, ainsi qu'à l'évaluation de leur effet sur les propriétés des granulats. Dans ce chapitre, nous avons essayé d'analyser et de discuter les résultats expérimentaux obtenus.

## **Chapitre 1 :**

### **Le liège dans la construction : une solution prometteuse**

#### **1. Le liège dans la construction : une solution prometteuse**

##### **1.1. Introduction**

Dans ce chapitre, à travers une étude bibliographique, on a commencé par citer les notions générales et quelques éléments qui peuvent nous aider à cerner le contexte de cette étude qui touche principalement à l'activité humaine et son incidence sur l'environnement et principalement l'impact du secteur du bâtiment sur la consommation énergétique. Ensuite, on s'est concentré sur les matériaux d'isolation et plus précisément, les particules végétales afin de les mettre en valeur et au même titre profiter de leur nombreuses qualités (isolations et durabilité). Par la suite, on a présenté les travaux de recherche réalisés sur les bétons verts à base de particules végétales ; ces travaux ont contribué à l'étude de différentes propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques. A la fin, on met en exergue les propriétés des particules végétales sujets de notre étude, dans notre cas les granulats de liège.

##### **1.2. Le bâtiment et l'énergie**

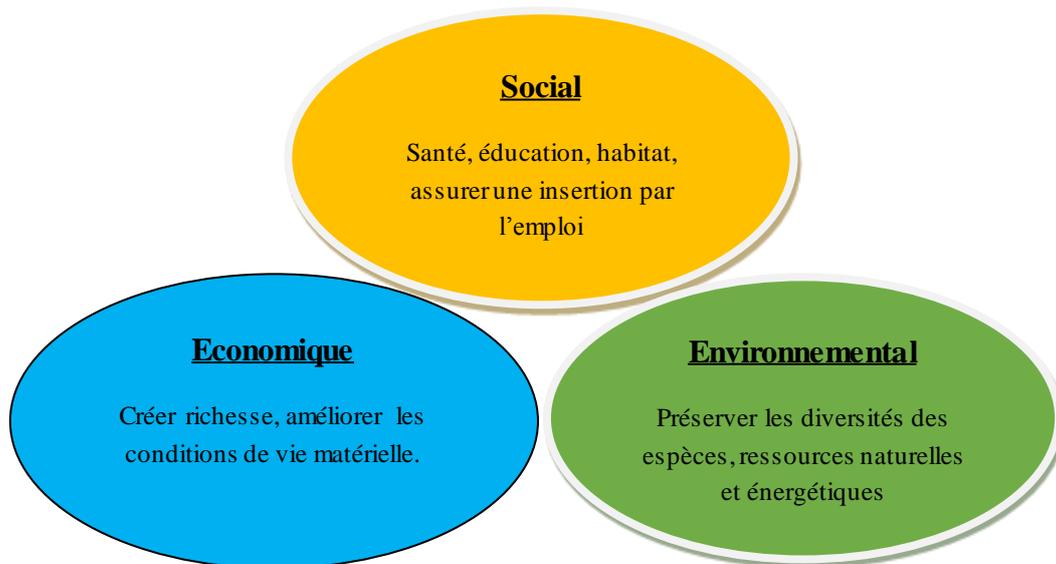
###### **1.2.1. Développement durable**

La naissance de l'idée du développement durable est en relation directe avec l'évolution industrielle, et ce n'est qu'au 19<sup>ème</sup> siècle que les pays occidentaux s'aperçoivent que leurs activités économiques et industrielles sont à l'origine de la dégradation de l'environnement.

Il aura donc fallu se rendre à l'évidence, et c'est lors de la commission de Brundtland en 1987 qu'il y a eu une prise de conscience mondiale du pouvoir destructeur de l'activité humaine sur l'environnement.

Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (Brundtland, 1987). Face à la multiplication des crises écologiques et de leurs conséquences sur les sociétés humaines telles que le réchauffement climatique et le trou d'ozone. La communauté internationale s'est sentie contrainte de repenser leurs modes économiques

C'est d'ailleurs pour cette raison que l'idée du développement durable a pris de l'importance. Ce concept repose sur trois piliers, à savoir : environnemental, économique et social (Fig 1.1).



**Figure 1.1** : Les piliers du concept de développement durable (Benhalilou, 2008).

En se basant sur cette dernière définition, afin qu'un projet soit durable, il doit donc veiller à satisfaire les besoins des trois domaines en même temps car si on enlève un pilier sur trois, le développement peut être viable, équitable ou vivable ; mais pas durable. Et puisque le secteur du bâtiment touche l'économie par la consommation élevée d'énergie et utilise des matériaux non renouvelables, énergivores et participant à la dégradation de l'environnement, il faut donc revoir cette approche en vue d'atténuer ses méfaits et la ramener vers une démarche durable.

### 1.2.2. Dégradation de l'environnement

Généralement, quand nous entendons le mot « environnement », nous avons tendance à penser aux espaces naturels (forêts ou montagne), aux animaux et aux plantes et nous oublions que le terme « environnement » ne désigne pas seulement la nature, la faune, la flore ou la biodiversité, mais plutôt un ensemble d'éléments qui sont liés les uns aux autres par des relations complexes. En effet, chaque organisme vivant a un impact sur son environnement, de telle sorte que les interactions entre ces différents éléments, fonctionnent en cercle fermé (l'oxygène, par exemple, est un déchet produit par les végétaux quand ils absorbent le CO<sub>2</sub>), chaque espèce constitue une source de nourriture pour une autre espèce, ce qui est rejeté par les uns est absorbé par les autres et les dégradations causées sont résorbées plus ou moins rapidement. Toutefois, les activités de l'espèce humaine se sont tellement intensifiées et diversifiées au fil de l'évolution des civilisations, que leurs conséquences dépassent la capacité de la planète.

Pour sa part le secteur résidentiel au même titre que le secteur agricole ou industriel, a une part de responsabilité dans la dégradation de l'environnement et la destruction des écosystèmes. À partir des statistiques sur le volume de rejets de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, le secteur du bâtiment est responsable de plus d'un tiers des émissions de dioxyde de carbone, ce qui lui permet d'être le deuxième plus grand émetteur de dioxyde de carbone après l'industrie (Diana et coll. ,2008)

Il existe un autre point alarmant, il s'agit de l'épuisement des ressources naturelles nécessaires à la perpétuation des activités humaines (granulats minéraux ou terre agricole). L'exploitation intensive de ces gisements naturels est un point d'incertitude majeur, qui accélère leur épuisement et doit par conséquent nous conduire à changer inévitablement nos habitudes (Nozahic, 2012).

### 1.2.3. Consommation énergétique

Depuis que l'homme existe, il a toujours pris ce que la nature lui offre ; mais depuis la révolution industrielle corrélée à l'action démographique galopante, la consommation énergétique ne cesse d'augmenter. D'après l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2018), la balance de la consommation énergétique s'est nettement modifiée ces dernières années. En effet, elle est passée de 4224Mtep en 1971 à 9555Mtep en 2016 (Fig 1.2).

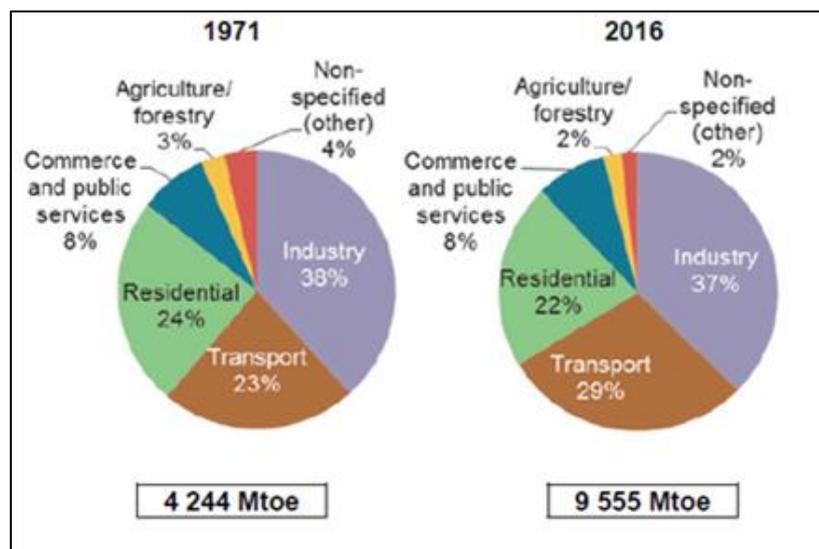
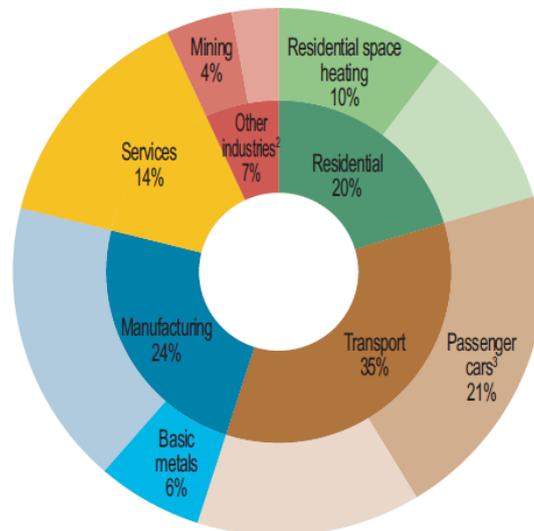


Figure 1.2 : Consommation finale totale par secteur (IEA, 2018).

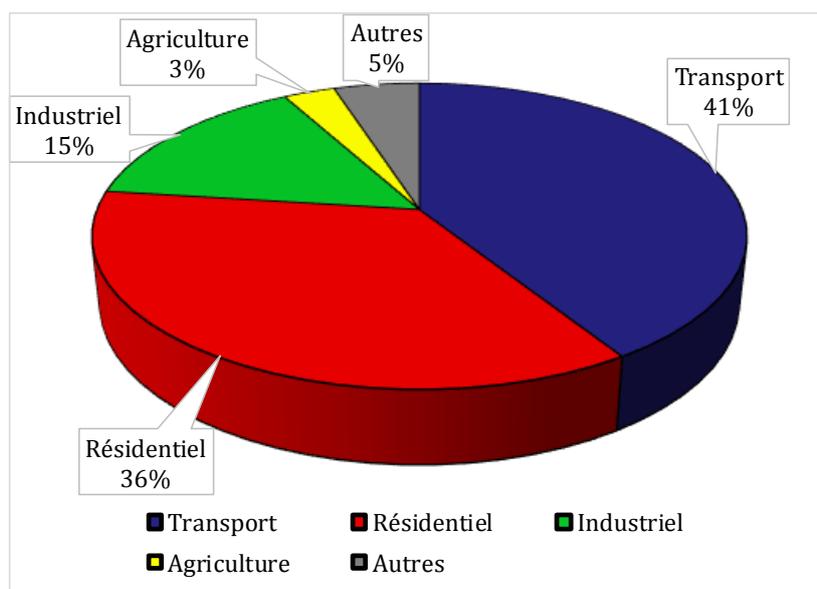
### 1.2.4. Consommation énergétique du secteur résidentiel

Les rapports de l'IEA (International Energy Agency) montrent qu'en 2017, dans le classement mondial des secteurs les plus énergivores, le secteur résidentiel occupait la 3<sup>ème</sup> place en terme de consommation énergétique, juste après le secteur du transport et d'industrie (Fig. 1.3).



**Figure 1.3 :** Plus grandes utilisations finales d'énergie par secteur (IEA, 2017).

Comme tout pays en voie de développement, l'Algérie connaît ces dernières années un accroissement de sa consommation énergétique. Dans ce contexte, le secteur résidentiel consomme l'équivalent de 36% de l'énergie finale (APRUE, 2015). Il est à ce titre classé le deuxième dans le classement des secteurs les plus énergivores en Algérie (fig. 1.4)



**Figure 1.4 :** Répartition de la consommation finale par secteur (APRUE, 2015)

Des nombreux pays de la communauté internationale sont conscients du problème de l'augmentation de la consommation énergétique, et de la nécessité qu'il y'a à prendre des mesures pour lutter contre cette consommation excessive. Dans le cadre de cette problématique, nous allons fournir, dans ce qui suit, les techniques et les méthodes, ainsi que les pistes de réflexion concernées par cet enjeu.

### **1.2.5. Les techniques actives**

Elles visent à utiliser l'énergie « juste nécessaire » par une gestion active des équipements :

#### **1.2.5.1. Les systèmes technologiques « intelligents »**

Les systèmes dits intelligents permettent de mesurer, de contrôler et de réguler la consommation énergétique des bâtiments (capteurs de température, de présence pour l'éclairage, etc.) et d'éviter ainsi les consommations inutiles. Ces solutions intelligentes pourraient réduire la consommation d'énergie globale d'un immeuble.

### **1.2.6. Les techniques passives**

#### **1.2.6.1. Le système de chauffage**

Quelques exemples relatifs aux systèmes de chauffage :

- ✓ les chaudières à condensation (récupération de l'énergie en condensant la vapeur d'eau des combustibles et rejets plus faible des taux en polluants).
- ✓ des systèmes de chauffage à base d'énergies renouvelables (pompe à chaleur ou systèmes solaires) peuvent également être installés, différents types de chauffages biomasse utilisant le bois comme combustible, présentent des hauts rendements.

#### **1.2.6.2. L'équipement électrique**

L'éclairage et l'électroménager absorbent 15% de l'énergie consommé (source : Commission européenne) dans le secteur résidentiel. Des lampes à économie d'énergie (fluorescentes ou LEDs) permettent de réaliser une économie d'énergie supérieure par rapport aux lampes à incandescence.

#### **1.2.6.3. L'architecture**

De nombreux paramètres peuvent être pris en compte lors de la conception d'un bâtiment, par exemple (Béguin, 2006):

- ✓ son orientation et sa capacité à profiter de l'énergie lumineuse, à capter et à se protéger de [l'énergie solaire](#) (architecture bioclimatique, matériaux de surface).
- ✓ Une isolation thermique renforcée, par exemple grâce à des faux plafonds empêchant le recours à l'inertie thermique, des matériaux comme la laine minérale ou le chanvre ou des doubles vitrages à isolation renforcée.
- ✓ des systèmes de ventilation plus performants.

#### **1.2.6.4. Isolation thermique**

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques visant à limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. Une maison bien isolée au niveau de son enveloppe empêche les déperditions de chaleur et au même titre, garantit le confort de l'habitat tout le long de l'année. Une isolation performante peut être réalisée à l'aide d'un bon isolant, elle permet de réduire sa consommation énergétique traditionnelle et par la même occasion limiter les rejets de gaz à effets de serre.

### **1.3. Principe et piliers de l'isolation thermique**

Comprendre les transferts de chaleur permet de mieux se rendre en compte de la nécessité d'améliorer l'isolation thermique de son habitat. Lorsque deux éléments ont une température différente, la chaleur se déplace de l'élément le plus chaud vers le plus froid jusqu'à ce que la température de chacun d'eux soit identique. Si on ne peut malheureusement pas éviter les transferts de chaleur, on peut en revanche les limiter grâce à une bonne isolation thermique (Beguin, 2006). Pour cela plusieurs éléments doivent être pris en considération, on en compte parmi eux :

#### **1.3.1. Les propriétés isolantes du matériau**

##### **1.3.1.1. Le rayonnement du matériau**

Chaque matériau émet des radiations. Moins un matériau émet de radiations, moins ce dernier transmet de la chaleur, et plus il est considéré comme isolant.

##### **1.3.1.2. Les échanges thermiques (convection)**

Plus on limite la circulation de l'air, moins il y a d'échanges thermiques d'un élément avec un autre, et donc plus la chaleur est contenue.

### 1.3.1.3. La performance thermique des parois

La performance thermique d'une paroi est notamment déterminée par deux facteurs (Beguin, 2006):

- **La résistance thermique (R)** : exprimée en mètre carré et degré Kelvin par Watt ( $m^2.K/W$ ), elle permet de mesurer la résistance d'une paroi au passage d'un flux de chaleur. Plus la résistance thermique d'une paroi est élevée, plus on considère que la paroi est isolante.
- **La conductivité thermique ( $\lambda$  ou lambda)** : exprimée en Watt par mètre par degré Kelvin ( $W/m.K$ ); elle mesure la quantité de chaleur qui s'échappe à travers une paroi. Plus le coefficient  $\lambda$  est faible, moins il y a de déperditions, et plus la paroi est jugée performante thermiquement parlant.

### 1.3.2. Les ponts thermiques, sources de désagréments au quotidien

Le principal objectif des travaux d'isolation thermique d'une maison est de lutter contre les ponts thermiques. Un pont thermique est un point de la construction où la barrière isolante est affaiblie ; ce qui permet à la chaleur de s'échapper facilement (fig. 1.5).

Les ponts thermiques créent des zones froides, qui laissent entrer l'air et favorisent l'apparition de condensation ou de moisissures. Ils sont situés en majorité aux points de jonction de la construction (murs, sols, toitures, angles...), mais peuvent aussi apparaître au niveau des ouvertures, souvent mal calfeutrées, comme les vitrages, les coffres de volets roulants, les conduites de cheminée... etc.

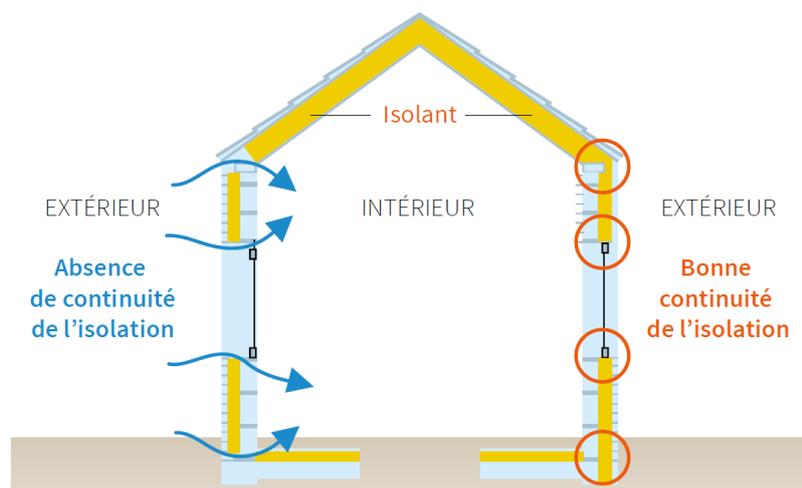
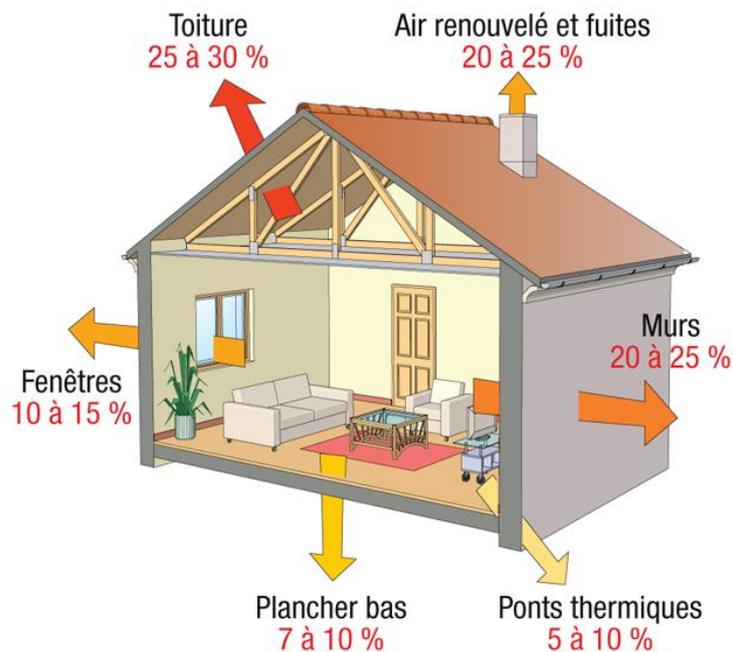


Figure 1.5 : Causes et endroits des ponts thermiques (ADEME, 2018)

Réduire les ponts thermiques est un bon point de départ pour améliorer l'isolation de l'habitat. La première chose à faire est d'identifier les zones qui engendrent le plus de déperditions de chaleur au sein de l'ouvrage (fig. 1.6) :

- ✓ Dans la majorité des cas, l'isolation des combles est la priorité pour une construction mieux isolée. La toiture représente en effet 30% des déperditions de chaleur d'un bâtiment.
- ✓ Viennent ensuite les murs, qui représentent à eux 25% des déperditions de chaleur.
- ✓ Puis les fenêtres (10 à 15% des déperditions), les sols (7 à 10%) et les ponts thermiques (5 à 10%).
- ✓ Enfin le système de renouvellement de l'air ambiant et les fuites, qui représentent en moyenne 20% des déperditions de chaleur dans un logement (ADEME, 2018).



**Figure 1.6 :** Répartition des déperditions thermiques dans une habitation (Source : Zephir).

## 1.4. Types d'isolation thermique

Il existe deux types d'isolation :

### 1.4.1. Isolation thermique par l'extérieur

L'isolation thermique par l'extérieur (ITE), s'impose autant pour une construction neuve que dans le cadre d'une rénovation. Elle permet de répondre parfaitement aux exigences de la réglementation actuelle, de plus en plus restrictive.

L'isolation thermique par l'extérieur, en plus qu'elle permet de bénéficier au maximum de l'inertie du bâtiment, elle le protège des changements de température, et présente les avantages suivants (Sotehi, 2010):

- ✓ Solution offrant la meilleure performance thermique.
- ✓ Peu d'impact sur la vie des habitants pendant les travaux.
- ✓ Préservation de l'inertie des murs.
- ✓ Réalisable en complément d'un ravalement de façade.
- ✓ Fermeture de la majorité des ponts thermiques.

En revanche elle a des inconvénients remarquables :

- ✓ Cout des travaux plus élevé que pour une isolation par l'intérieur.
- ✓ Demande d'autorisation des travaux nécessaires.
- ✓ Modification de l'aspect des façades, toitures et ouvertures.
- ✓ Fixation des volets battants et plans électriques extérieurs à revoir.
- ✓ Solution ne pouvant être appliquée à tous les bâtiments.

#### **1.4.2. Isolation thermique par l'intérieur**

L'isolation thermique par l'intérieur consiste à isoler les combles et à intégrer un isolant performant sur la surface intérieure des murs du bâtiment. Lorsque l'isolation par l'extérieur ne peut être mise en place, une isolation par l'intérieur réalisée dans les règles, permettra quand même, d'obtenir une bonne isolation thermique. En plus elle a les avantages suivants (Sotehi, 2010):

- ✓ Amélioration de la performance thermique globale.
- ✓ Solution plus économique que l'isolation par l'extérieur.
- ✓ Technique d'isolation facile à mettre en place.
- ✓ Superposition de l'effet paroi froide des maisons anciennes.

Cependant, elle a aussi des inconvénients remarquables :

- ✓ Réduction de la surface habitable.
- ✓ Modification du plan électrique.
- ✓ Annulation de l'inertie des murs.
- ✓ Evacuation des habitants pendant les travaux.
- ✓ Décoration intérieure à refaire après les travaux.

## 1.5. Les isolants

Chaque élément de l'habitation nécessite un isolant adapté, qui est à choisir parmi 5 familles d'isolants (Béguin, 2006):

- ✓ Les isolants synthétiques
- ✓ Les isolants Minéraux
- ✓ Les isolants Végétaux
- ✓ Les isolants D'origine animale
- ✓ Les isolants Issus du recyclage

Le Tableau 1.1 présente les caractéristiques principales des différents matériaux isolants.

**Tableau 1.1 :** Caractéristiques des différents matériaux isolants (Jayr, 2010).

| TYPE                           | -   | Matériau   | Masse Volumique   | Conduct. therm. $\lambda_i$ | Perm. à la vapeur $\mu$ moyen | Résist. à la compr. | Réact. au feu |
|--------------------------------|-----|--|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------|
| -                              | -   | -  | Kg/m <sup>3</sup> | W/mK                        | -                             | kg/cm <sup>2</sup>  | -             |
| Minéral                        | MW  | Laine de roche   | 150 à 175         | 0.045                       | 1.5                           | 0.7 à 1.3 (*)       | +             |
| -                              | GW  | Laine de verre   | 13 à 60           | 0.045                       | 1.5                           | 0.2 (*)             | +             |
| -                              | CG  | Verre cellulaire   | 120 à 135         | 0.055                       | infini                        | 7 à 16 (**)         | +             |
| -                              | EPB | Perlite expansée   | 170               | 0.060                       | 5 à 10                        | 3,5 (*)             | +             |
| Synthétique                    | PUR | Polyuréthane   | 30                | 0.035                       | 100                           | 1.2 (*)             | -             |
| -                              | PIR | Polyisocyanurate   | 30                | 0.035                       | 50                            | 1.2 (*)             | +             |
| -                              | PF  | Mousse phénolique  | 40                | 0.045***                    | 80                            | 1.2 (*)             | +             |
| -                              | EPS | Polystyrène expansé  | 15 à 40           | 0.045                       | 20 à 150                      | 0.7 à 3.5 (*)       | -             |
| -                              | XPS | Polystyrène extrudé  | 32 à 45           | 0.040                       | 225                           | 3 à 7 (*)           | -             |
| Végétal                        | ICB | Liège  | 100 à 120         | 0.050                       | 12 à 28                       | -                   | +             |
| Produits minces réfléchissants | PMR | Multicouche composé de feuilles d'aluminium, mousses plastiques, polyéthylène, ... | + 70              | 0.050                       | 12 à 28                       | -                   | +             |

À l'heure actuelle, on distingue l'intérêt d'utilisation des matériaux d'origine naturelle tels que les particules végétales (granulats, fibres). Elles sont de plus en plus utilisées, comme alternative aux matières premières d'origine minérale, pour la fabrication des composites utilisés dans la conception des bâtiments durables et sans impact pour l'environnement.

## **1.6. Les bétons à base de particules végétales**

Ces particules peuvent assurer soit un rôle de renforcement dans une matrice cimentaire, soit permettent de diminuer la masse volumique du mélange dans lequel elles sont introduites, en créant un réseau poreux interconnecté au sein du matériau en question (Gourlay, 2012). Les particules végétales ont une influence directe sur les performances physiques, mécaniques, thermiques et acoustiques des matériaux dans lesquels elles sont incorporées (M. Le Troëdec, 2011). Ces caractéristiques exceptionnelles sont liées à leurs compositions chimiques et leurs structures.

On note un nombre croissant de travaux de recherche qui concerne ces produits. Ces travaux menés visent à étudier l'influence de l'incorporation des particules végétales dans des composites cimentaires, sur leurs propriétés physiques et thermiques.

On va présenter dans ce qui suit quelques travaux qui concerne l'utilisation des bétons à base de particules végétales en tant que renfort :

### **1.6.1. Béton de Diss**

La fibre de Diss est une espèce végétale sauvage, répandu en Afrique du nord méditerranéenne et aux régions sèches de Grèce et d'Espagne (voir fig. 1.7). Les travaux de recherche entrepris par (Sellami et coll., 2013) reposent sur l'évaluation de l'effet des différents traitements, sur les propriétés physiques et mécaniques d'un béton à base de fibres de Diss.

A l'issue de cette étude, les auteurs ont montré que le traitement des fibres par ébullition, n'a aucun effet sur la diminution de la capacité d'absorption en eau des fibres, puisque ce dernier atteint 100% d'absorption après 60 mn d'immersion dans l'eau. En revanche, le traitement avec l'huile de lin a réduit significativement le coefficient d'absorption ; ce qui confirme, selon les auteurs, la capacité d'étanchéisation de la fibre traitée à l'huile. De plus, les résultats des essais d'écrasement à 28jours, ont révélé que les fibres traitées ont une résistance mécanique supérieure comparée aux fibres non traitées.



**Figure 1.7 :** plante de Diss à l'état naturel (Sellami, 2013)

Dans un autre travail, (Achour, 2017) a souligné l'effet de l'introduction dans une matrice cimentaire, des fibres traitées ou non à différents dosages massiques (0.5, 1, 1.5, 2, 3 et 4%). Les résultats fournis par ce chercheur indiquent, une diminution de la résistance à la compression, équivalente à 53% pour les mortiers renforcés par 4% de Diss par rapport au mortier témoin.

Il est essentiel de noter que l'utilisation des fibres traitées en tant que renfort dans un mortier, améliore les performances mécaniques de ce dernier par rapport aux fibres non traitées.

### **1.6.2. Béton de sisal**

La plante de sisal pousse toute l'année dans les climats chauds des régions arides (figure 1.8) tels que le Brésil, l'Indonésie et les pays africains de l'Est (la Tanzanie et le Kenya).

(Ferreira et coll, 2015), a travaillé sur un mortier à base de fibre de sisal issu de l'état du Bahia au Brésil. Parmi les paramètres étudiés par ces auteurs, l'influence du traitement sur les propriétés physiques et mécaniques de ces mortiers.

Les résultats obtenus indiquent que la résistance à la traction de la fibre de sisal augmente de façon générale après tous les traitements. Il convient de souligner que la meilleure résistance a été obtenue pour un prétraitement hybride.



**Figure 1.8 :** Fibres de sisal.

### **1.6.3. Béton de chanvre**

Le chanvre est une plante cultivée dans les zones à climat tempéré. Elle résiste bien aux maladies et aux parasites et ne nécessite aucun traitement phytosanitaire. Sa hauteur peut arriver jusqu'à 3 m (fig. 1.9). Durant la campagne expérimentale menée par, (Umirigiwa, 2014) ce dernier a précisé l'impact du traitement des particules de chanvre sur les caractéristiques physiques, thermiques, mécaniques, et de durabilité des bétons à base de chanvre.

A l'issue de cette étude, les résultats obtenus ont révélé que les traitements améliorent considérablement la masse volumique, qui est passée de 177 à 210 kg/m<sup>3</sup>. Ils s'avèrent aussi que les granulats de chanvre traités ont une résistance mécanique bien supérieure à celle des particules brutes (non traitées).



**Figure 1.9 :** Plante de chanvre et différents types de fibres du chanvre (Chamoin, 2013) & (Achour, 2017).

Dans la nature, chaque particule végétale a sa propre structure biologique et morphologique, qui la diffère des autres. Cette diversité d'ailleurs est à l'origine de nombreuses propriétés spécifiques. En effet, les particules végétales, contrairement aux granulats minéraux, ont une composition chimique spécifique qui peut influencer leurs comportements et par conséquent influencer les matériaux qui les contiennent.

#### **1.6.4. Béton de liège**

Parmi les agro-bétons les plus utilisés récemment dans le domaine de la construction, le béton de liège, connu par sa légèreté et sa bonne isolation thermique. Le béton de liège a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons quelques études menées sur l'intégration des granulats de liège dans la masse du béton :

Dans le cadre de son travail (Laoud, 2013) a étudié le comportement mécanique et physique des bétons légers à partir d'un mélange de sable et de liège expansé 3/8 et 8/15. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation du liège dans le mélange allège la masse volumique du béton et au même titre diminue sa conductivité thermique. Cependant, une teneur élevée en liège affaiblit considérablement sa résistance mécanique.

(Karade, 2016) a évalué la compatibilité des granulats de liège avec le ciment, pour la formulation d'un béton léger. L'auteur a introduit cinq classes différentes de granulés de liège avec différents dosages. Les résultats obtenus montrent que les substances extractives de liège, sa taille et son dosage sont tous des facteurs qui peuvent affecter la compatibilité.

Dans un autre travail, réalisé par (Ziregue et coll., 2016), le potentiel de développement d'un béton léger isolant à base de liège a été étudié. Ils ont montré que le potentiel du composite peut atteindre une légèreté de 70 %, accompagnée d'une diminution significative de la résistance à la compression. En revanche, d'un point de vue thermique, des valeurs très performantes ont été signalées. Cependant, un pourcentage en liège au-delà de 60%, risque de beaucoup affaiblir la résistance mécanique

(Maalouf & coll., 2017) ont montré que l'augmentation de la quantité de granulés de liège entraîne une diminution de la masse volumique, de la conductivité thermique et des résistances mécaniques du béton à base de liège. A la fin ils ont conclu que le béton de liège peut être utilisé comme isolant thermique mais pas comme un composant structurel.

## **1.7. Le liège**

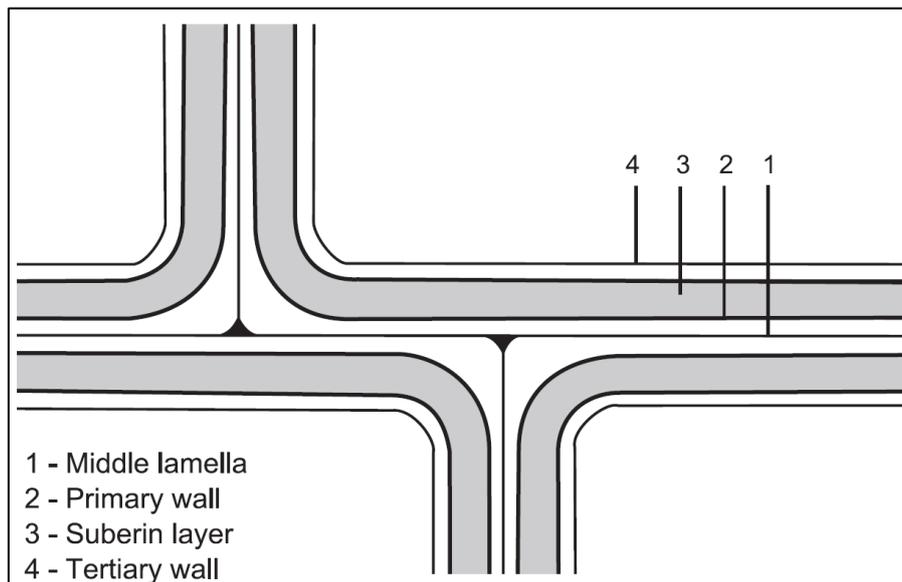
Le liège est un matériau biologique aux propriétés uniques. Il a attiré l'attention de l'homme depuis l'antiquité, grâce à certaines de ses propriétés principales et ses diverses applications.

Cette espèce est obtenue à partir de l'écorce externe du chêne-liège. Les couches de liège qui sont produites dans son écorce forment une enveloppe continue avec une épaisseur appréciable autour de la tige et des branches. Cette particule végétale peut être retirée de la tige sans mettre en danger la vitalité de l'arbre, qui reconstruit ensuite une nouvelle couche de liège. C'est la base de la production durable de liège pendant la longue durée de vie du chêne-liège.

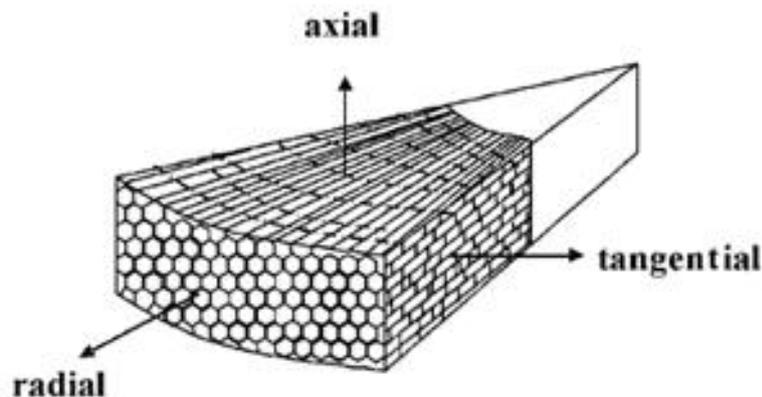
La plupart des chênes lièges utilisés dans le monde se trouvent dans les pays d'Europe méridionale que sont le Portugal et l'Espagne, ils sont également exploités en Sardaigne et dans une mesure très limitée dans d'autres régions d'Italie et en France, ainsi qu'au nord de l'Afrique, en l'occurrence, Au Maroc, en Tunisie et en Algérie. Actuellement, dans une mesure limitée, le liège produit, alimente le secteur industriel important qui exporte ses produits dans le monde entier. La recherche est active depuis les années 1990 et de nombreuses publications internationales ont élargi le corpus de connaissances sur le liège et le chêne-liège.

### 1.7.1. Morphologie du liège

La structure cellulaire du liège est bien connue et leur tissu a conservé une place particulière dans l'histoire de l'anatomie des plantes (fig. 1.10). Le liège peut être décrit comme un tissu homogène de cellules à parois minces, régulièrement disposées sans espace intercellulaire. Le liège révèle une structure alvéolaire, analogue à celle d'un nid d'abeille (fig. 1.11), sans espace vide entre les cellules contiguës, qui sont donc des unités fermées (Pereira, 2007). Le liège orienté peut être considéré, en première approximation, comme un matériau isotrope transversalement, ce qui implique que toutes les directions perpendiculaires à la direction radiale (c'est-à-dire les directions axiale et tangentielle) sont presque équivalentes (Gil, 2009) et (Pereira, 2007).



**Figure 1.10** : Représentation schématique de la structure de la paroi cellulaire du liège (Pereira, 2007).



**Figure 1.11** : Représentation schématique de la disposition cellulaire de liège (Silva, 2005).

## **1.7.2. Composition chimique du liège**

Les propriétés d'un matériau dépendent des caractéristiques chimiques de ses composants, de leur quantité relative et de leur répartition dans le solide. Dans le liège, comme dans d'autres matériaux cellulaires, les composants chimiques sont situés dans les faces et les bords des cellules. La composition du liège diffère de celle des autres tissus végétaux, notamment du bois. Cette différence est variée selon des facteurs de croissance, de climat et même il diffère d'un arbre à autre (Gil, 2015).

La paroi cellulaire du liège est composée chimiquement de deux types de paroi. En ce qui concerne la première, elle contient des composants structuraux qui sont des macromolécules de nature polymérique, constituant la paroi cellulaire et en définissent la structure ; elles sont insolubles et ne peuvent pas être retirés de la paroi cellulaire sans affecter profondément la structure et les propriétés de la cellule. En outre, la deuxième contient des composants non structurels ; il s'agit de composés organiques de faible poids moléculaire qui peuvent être solubilisés par des procédés appropriés (solvants, appelés extractifs).

Ainsi, le liège comprend à la fois des composants structurels, une forme complexe, ainsi que des composants non structurels. Il se compose principalement de subérine qui est responsable de la compressibilité et de l'élasticité du liège. Aussi, les parois cellulaires du liège sont riches en lignine, et polysaccharides offrant à la structure du liège sa rigidité et sa forme, et on y trouve aussi les cires qui repoussent l'eau et contribuent à son imperméabilité. De plus, les tanins donnent au liège sa couleur, et jouent le rôle de protection et conservation du matériau (Gil, 2009).

La composition chimique du liège comprend plusieurs types de composés, traditionnellement divisés en cinq groupes, à savoir : Subérine (45%), Lignine (27%), Polysaccharides (12%), Cire (6%), Tanins (6%) et Cendre (4%) (Gil, 2009).

## **1.7.3. Propriétés de liège**

### **1.7.3.1. Propriétés mécaniques**

Le liège présente des propriétés mécaniques plutôt particulières. La nomenclature utilisée pour les directions et les sections en liège est celle qui est généralement utilisée dans la description du bois, selon la nomenclature utilisée dans la littérature et dans la section 1.7.1 (Morphologie

du liège), ils seront désignés ci-après par radiale (R) ou non radiale (NR) ; cette dernière correspondant à la direction tangentielle ou axiale.

En général, le liège présente un comportement différent en traction et en compression. (Rosa et Fortes, 1991) ont signalé que le module d'Young en compression est sensiblement plus petit par rapport à la traction. Le plus grand module en traction s'explique par la rigidité des plaques ondulées (parois cellulaires), qui augmentent à mesure que l'amplitude des ondulations diminue. En effet, la compression augmente l'amplitude, alors que la traction la diminue (Gil, 2009).

### 1.7.3.2. Propriétés physiques

L'étude des autres propriétés que mécaniques n'a pas été considérable, bien qu'elles soient clairement importantes pour les nombreuses applications actuelles du liège.

- **La masse volumique et la transition thermique** : le liège est caractérisé par une faible masse volumique, cette faiblesse est due principalement à la forte teneur en air des petites cellules. La teneur en air et la taille de la cellule expliquent la mauvaise propriété de transfert de chaleur du liège. La chaleur peut être transmise par conduction (qui dépend de la quantité de solide dans la structure), convection (qui est significative uniquement pour les grands volumes de gaz) et le rayonnement (qui devient moins efficace avec la diminution de la taille de la cellule). Dans le liège, seule la conduction a une importance pour le transfert de chaleur (Gil, 2009). La conductivité thermique des parois des cellules de liège sera légèrement supérieure à celui du gaz contenu dans les cellules.
- **Transmission du son** : De même, la transmission du son est très faible en raison de la faible masse volumique et de la grande porosité du liège ; la plupart des ondes sonores incidentes sont absorbées et transformées en énergie thermique, ce qui réduit la réverbération, particulièrement significative pour les panneaux de liège expansé.

## 1.8. Conclusion

A travers ce premier chapitre, nous avons pu mettre en relief, les différentes notions relatives au contexte de notre étude. Le premier volet a été consacré à la mise en relation de la problématique du développement durable avec le secteur de la construction. Ensuite, nous avons présenté les

différentes solutions proposées dans la littérature pour pouvoir surmonter ces problèmes. Le deuxième volet a touché beaucoup plus une solution qui a commencé à trouver sa place dans l'isolation thermique des bâtiments, il s'agit de l'utilisation des bétons végétaux. Toujours dans cette partie, nous avons donné des exemples de travaux qui ont été réalisés sur quelques bétons verts et surtout ceux réalisés sur les bétons de liège et qui ne sont pas nombreux.

La dernière partie de ce chapitre a été dédiée à la détermination des propriétés des particules de liège. Cette partie a révélé que ce liège est un matériau unique. D'abord, il possède une structure cellulaire, une bonne capacité d'isolation ainsi qu'une composition chimique qui diffère de celles des autres particules végétales qui ont été utilisées auparavant dans les matrices cimentaires.

Le chapitre suivant fera l'objet d'une recherche bibliographique sur d'une part l'impact du prétraitement des particules végétales sur les propriétés intrinsèques des particules elle mêmes et d'autre part, sur les propriétés des composites qui les contiennent.

## Chapitre 2 :

### Bétons verts à base de particules végétales traitées

## 2. Bétons verts à base de particules végétales traitées

### 2.1. Introduction :

L'utilisation des particules végétales comme agents de renforcement dans les matériaux de construction anciens (argile) est une technique connue depuis des siècles, mais en tant que renfort dans les matériaux cimentaires, elle est très récente. Elle offre certains avantages, tels que l'amélioration de la résistance à la flexion, la ductilité et les propriétés d'isolation thermique (Cerezo, 2005) et (Nozahic, 2012). Cependant, l'addition de ce type de particules (végétales) dans la matrice cimentaire peut causer certains problèmes tels que :

- Une mauvaise adhérence entre les particules et la matrice.
- Une faible durabilité à cause de la dégradation des particules dans un milieu alcalin qui est la matrice cimentaire.
- Inhibition de l'hydratation du ciment et retard de la prise à cause de la dissolution de la particule végétale.
- Naissance de fissures et augmentation de la porosité en raison de leur forte capacité d'absorption en eau.

L'amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires renforcés à l'aide de particules végétales est un vrai défi pour l'obtention d'un matériau de qualité (Umirigirwa, 2014). En revanche, le traitement des particules végétales avant de les incorporer en tant que renfort est une priorité majeure. Le traitement vise à faire une modification des particules grâce :

- à des agents hydrofuges dans le but de réduire la capacité d'absorption en eau, de protéger la particule végétale dans le milieu alcalin contre les attaques alcalines de l'eau interstitielle chargée en électrolytes et d'améliorer l'adhérence entre la fibre et la matrice,
- ou bien par des agents chimiques dans le but d'éliminer les impuretés, cires et huiles recouvrant la surface de la fibre, ce qui rend la surface plus rugueuse, augmenter la stabilité de la fibre face à l'humidité et diminue leur caractère hydrophile, assurant ainsi une bonne adhérence interfaciale.

### 2.2. Effets du prétraitement des particules végétales

#### 2.2.1. Effet sur les caractéristiques des particules végétales

Le traitement préalable des particules végétales revêt une importance considérable. Les résultats de certains travaux de recherche sur l'évaluation des propriétés des particules végétales traitées, sont cités dans la section suivante :

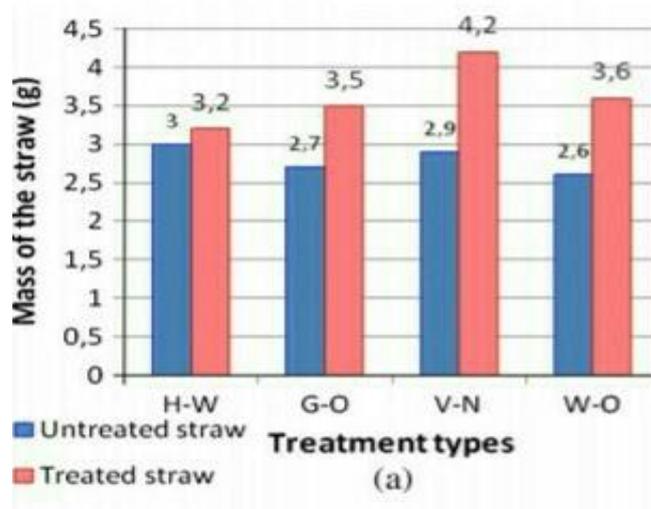
### 2.2.1.1. Adhésion

L'adhérence entre les particules végétales et la matrice cimentaire est un facteur fondamental ayant fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. On compte parmi eux :

L'étude expérimentale de (Bederina et coll., 2016), dans laquelle les auteurs ont évalué l'adhérence d'un béton à base de paille d'orge traité. Afin d'arriver à leurs objectifs, ils ont soumis ce composite végétal à différents traitements ; on cite, un traitement à l'eau chaude, au gasoil, au vernis et à l'huile usée. Les résultats obtenus ont montré que tous les traitements appliqués ont relativement améliorés la surface extérieure (lisse) de la paille d'orge. Ces améliorations enregistrées, ont conduit à une bonne compatibilité entre la paille d'orge et la matrice de ciment, et par conséquent une bonne adhérence.

### 2.2.1.2. Masse volumique

La masse volumique est considérée comme une caractéristique principale des matériaux tels que les fibres végétales utilisées dans le béton. (Bederina et coll., 2016) ont trouvé que la masse de la paille augmente après l'application des traitements proposés (Eau chaude (H-W), gasoil (G-O), vernis (V-N) et l'huile usée (W-O)). Dans ce travail, la valeur la plus basse est enregistrée dans le cas de l'eau chaude (fig. 2.1).



**Figure 2.1** : Evaluation de la masse de la paille en fonction des types de traitement (Bederina et coll., 2016).

Les travaux menés par (Traoré et coll., 2018), ont permis d'étudier l'influence du traitement d'un béton vert à base de granulats de coquilles de palmier à huile (OPS). Cette étude a examiné l'incidence de cinq traitements sur les propriétés physiques et mécaniques du béton d'OPS tels que : traitement à la chaux (CH), silicate de sodium (SS), alcool polyvinylique (PVA), traitement thermique (TH) et saturation en OPS (SAT).

A l'issue de cette étude, les auteurs ont mesuré la masse volumique apparente des agrégats d'OPS avant et après le traitement. Ils ont conclu que les rapports de masse volumique entre les OPS traitées (CH, SS, et TH) et les OPS brutes étaient proches de 1. Ce qui indique que ces traitements avaient donc peu d'influence sur la masse volumique d'OPS (Tableau 2.1).

**Tableau 2.1** : Effet de différents traitements sur la masse volumique des fibres d'OPS (Traoré et coll., 2018).

| Code du mélange | Traitement d'OPS                         | Rapport de masse avant et après traitement | Rapport de masse volumique apparente d'OPS en vrac après traitement |
|-----------------|--|--|---|
| N               | Non traité                               | 1  | 1   |
| CH              | Solution de chaux (Ca(OH) <sub>2</sub> ) | 1.004                                      | 1.04  |
| SS              | Solution de silicate de sodium           | 1.012                                      | 1.06  |
| PVA             | Solution PVA                             | 1.026                                      | 0.82  |
| TH              | Traitement thermique                     | 0.948                                      | 1.02  |
| SAT             | Saturation                               | 1.23                                       | –   |

(Sallami et coll., 2013), ont aussi étudié la masse volumique d'un béton à base de fibre de Diss sous différents traitements, à s'avoir : traitement thermique et traitement à l'huile de lin.

Dans ce travail expérimental, les auteurs ont constaté que la masse volumique des fibres de Diss a diminuée pour chacun des traitements étudiés (Tableau 2.2). En revanche, la diminution de la masse volumique apparente de Diss traité thermiquement (bouillie) est expliquée par la dégradation des substances contenues dans la fibre de Diss.

**Tableau 2.2** : Effet de traitement sur la masse volumique des fibres de Diss (Sallami et coll., 2013).

| Type de fibre                | Masse volumique (g/l) |
|------------------------------|-----------------------|
| Diss fraisé non traité       | 50.3                  |
| Diss traité à l'huile de lin | 37.5                  |
| Diss traité thermiquement    | 48.0                  |

### 2.2.1.3. Composition chimique :

La composition chimique des particules végétales est un caractère primordial, qui peut influencer fortement sur les propriétés des composites à base de matrice cimentaire.

Dans cet article présenté par (Cabral et coll., 2018), ces chercheurs, ont déterminé l'efficacité du prétraitement des fibres de bagasse de canne à sucre pour la fabrication des composites de ciment. Pour ce faire, ils ont chauffé l'eau à 100°C. Sur la base des résultats d'analyse des propriétés chimiques et morphologiques, une légère diminution, des substances extractives et des impuretés ont été remarqué dans les fibres traitées. Ces substances extractives, sont des substances inhibitrices de la réaction d'hydratation du ciment à savoir : sucre, tanin, amidon, graisse, résine, etc.

De plus, le traitement des fibres étudiées a entraîné, une perte de masse de 12% par rapport à celle non traité (Tableau 2.3).

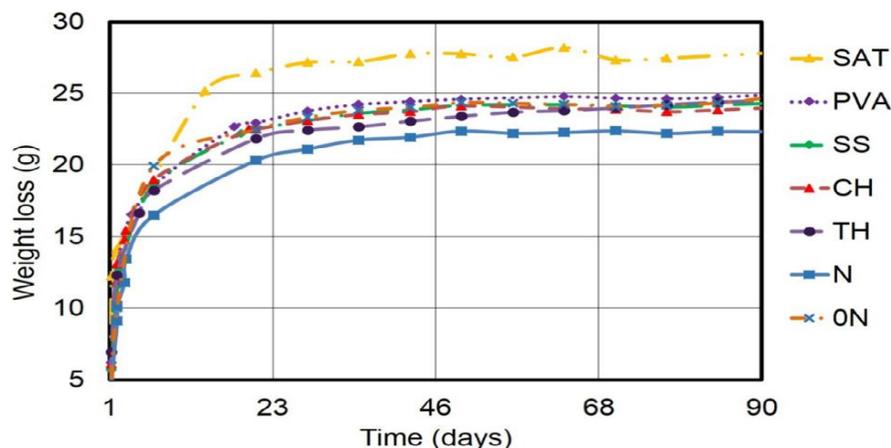
**Tableau 2.3 :** Composition chimique des fibres de bagasse de canne à sucre traitées et non traitées (Cabral et coll., 2018).

| Composé (%)        | Bagasse de canne à sucre non traitée | Bagasse de canne à sucre traitée |
|--------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| La cellulose       | 38.1                                 | 38.3                             |
| L'hémicellulose    | 28.1                                 | 25.0                             |
| Lignine            | 24.8                                 | 24.8                             |
| Extractives        | 9.0                                  | 7.1                              |
| Teneur en humidité | 7.1                                  | 7.1                              |
| Cendre             | 0.9                                  | 0.5                              |

### 2.2.1.4. Perte de masse :

Les travaux de recherche entrepris par (Traoré et coll., 2018), reposent sur l'étude des bétons à base de coquilles de palmier à huile (OPS). Parmi les paramètres évalués par ces auteurs, la variation de la masse en fonction du temps pour différents traitements (comme on l'a déjà précisé auparavant).

Les résultats de cette étude ont montré que tous les traitements utilisés ont conduit à une perte de masse. Dans ce contexte, le traitement à l'eau a marqué les plus grandes valeurs de perte de masse (Fig 2.2).



**Figure 2.2 :** Perte de masse lors du séchage des échantillons (Traoré et coll., 2018).

### 2.2.2. Effet du traitement sur les performances des bétons

On sait maintenant que les particules végétales ont une composition chimique et une structure morphologique qui les diffère des granulats minéraux. Ce qui d'ailleurs influe sur leurs propriétés physiques, thermiques et mécaniques et par conséquent sur les propriétés des composites qui les contiennent.

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques travaux de recherche sur les agro-bétons, regroupés en fonction du paramètre d'étude.

#### 2.2.2.1. Affaissement (maniabilité)

L'affaissement au cône d'Abrams est l'un des essais les plus simples et les plus couramment utilisés pour mesurer l'ouvrabilité du béton frais.

Dans le travail de (Bederina et coll., 2016), l'effet du traitement à l'eau chaude, au vernis, à l'huile usée et au gasoil, sur l'amélioration des propriétés d'un béton de sable contenant de la paille d'orge, a été étudié. L'une des caractéristiques étudiées aussi par ces auteurs est l'ouvrabilité. En ce qui concerne le mélange, le béton de sable a été renforcé par différents dosages de paille tubulaire et cassée, respectivement de 70 et 30%, avec des longueurs de 2 et 3,5 cm.

Selon les chercheurs, les résultats de l'affaissement obtenu à l'aide du cône d'Abrams ont montré que, quel que soit le traitement proposé, l'ouvrabilité restait plastique, avec des valeurs allant de 5 à 6 cm. Ces résultats ont confirmé que tous les traitements appliqués n'avaient aucun effet significatif sur la maniabilité du béton.

#### 2.2.2.2. Masse volumique

L'étude menée par (Traoré et coll., 2018), a examiné l'influence de différents traitements sur la variation de la masse volumique d'un béton à base de palmier à huile (OPS).

D'après les résultats des auteurs, la masse volumique du béton d'OPS traité variait entre 1822 et 1867 kg/m<sup>3</sup>. En revanche, la masse volumique du béton ordinaire (ON) atteint 2239 kg/m<sup>3</sup>. En effet, tous les bétons traités, avaient des masses volumiques relativement voisines (Tableau 2.4).

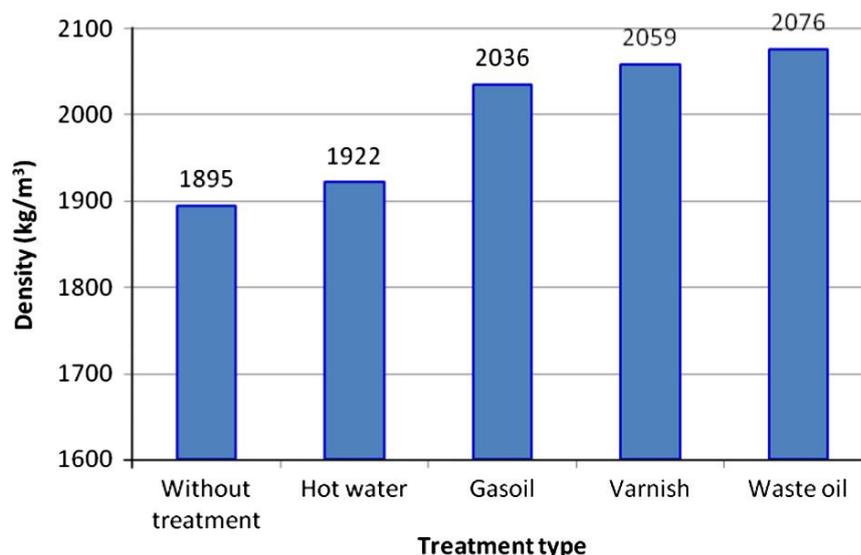
**Tableau 2.4** : Variation de la masse volumique du béton d'OPS par type de traitement (Traoré et coll., 2018).

| Désignation du mélange | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosité (%) |
|------------------------|--------------------------------------|--------------|
| ON                     | 2239                                 | 11%          |
| N                      | 1839                                 | 17%          |
| CH                     | 1847                                 | 17%          |
| SS                     | 1859                                 | 17%          |
| PVA                    | 1867                                 | 17%          |
| TH                     | 1849                                 | 17%          |
| SAT                    | 1822                                 | 18%          |

La recherche réalisée par (Bederina et coll., 2016), présente les résultats d'une étude sur l'influence des traitements, sur différentes propriétés d'un béton à base de fibre végétale.

Guidé par leurs objectifs, ces auteurs ont incorporé différents dosages de paille d'orge (cassé et tubulaire) à 30 et 70% respectivement, et ils l'ont exposé à différents traitements.

Parmi les propriétés évaluées par ces auteurs, la variation de la masse volumique du béton de paille d'orge en fonction du traitement proposé, comme indiqué sur la figure 2.3. Les résultats obtenus ont montré que la masse volumique des bétons a augmenté pour l'ensemble des traitements. Cette augmentation était comprise entre 1922 et 2076 kg/m<sup>3</sup>. Aussi, les valeurs des masses volumiques les plus élevées sont atteintes pour les traitements à l'huile et au vernis.



**Figure 2.3 :** Masse volumique du béton de paille d'orge en fonction des traitements utilisés (Bederina et coll., 2016).

L'article de (Bederina et coll., 2009), repose sur l'étude de l'effet du traitement des granulats bois par revêtement au ciment sur des bétons à base de copeaux de bois (CB) sous différents dosages : 0, 80 et 160 kg/m<sup>3</sup>. Dans ce travail expérimental, le béton étudié a été confectionné à l'aide de deux types de sable : sable de dune (SD) et sable de rivière (SR).

A l'issue de cette étude, les chercheurs ont conclu que la masse volumique du béton CB, a légèrement augmenté avec le traitement (Tableau 2.5).

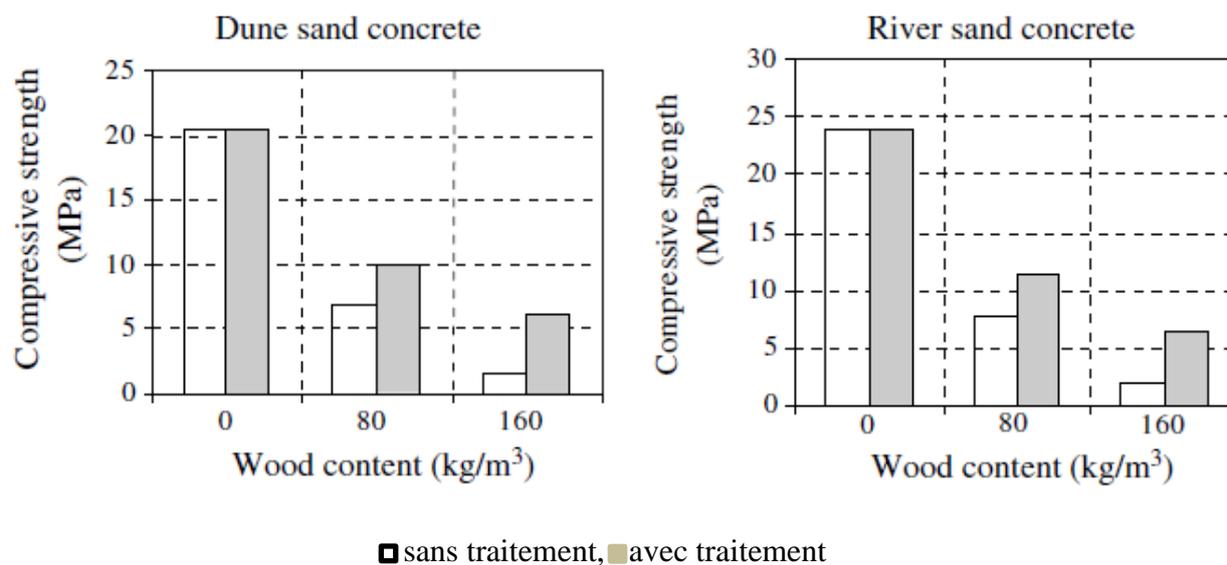
**Tableau 2.5 :** Masse volumique du béton de copeaux de bois en fonction des traitements utilisés (Bederina et coll., 2009).

| Nature du béton / Dosage Massique (kg/m <sup>3</sup> ) | 0                   | 80   | 160  |
|--|---------------------|------|------|
|  | Béton SD non traité | 2040 | 1530 |
| Béton SD traité aux CB                                 | 1740                |      | 1520 |
| Béton SR non traité                                    | 2100                | 1580 | 1220 |
| Béton SR traité  |                     | 1800 | 1537 |

### 2.2.2.3. Résistance à la compression :

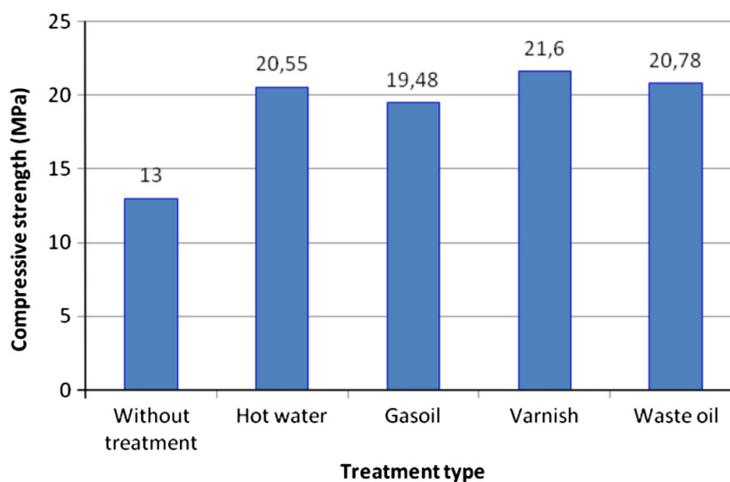
L'essai de compression sur des éprouvettes en béton est le principal outil pour caractériser leur résistance. Dans leur travail expérimental (Bederina et coll., 2009) avaient comme objectif, d'examiner les propriétés physiques et mécaniques d'un béton de bois soumis à un traitement par ciment. Afin d'arriver à leurs fins, ces auteurs ont procédé à deux formulations : une avec du sable de dune et l'autre avec du sable de rivière (comme on l'a déjà mentionné plus haut). Les résultats obtenus montrent que le traitement utilisé a amélioré la résistance à la compression

des deux bétons à base de sable de dune et sable de rivière (fig. 2.4). Ils ont noté aussi qu'au fur et à mesure que la teneur en bois augmente, la résistance à la compression du béton de bois traité augmente par rapport à celle de celui contenant un bois non traité. Plus précisément un gain de résistance allant de 20 à 45% a été obtenu avec une teneur en bois de 80 kg/m<sup>3</sup> et de 230 à 313% avec une teneur de 160 kg/m<sup>3</sup>.



**Figure 2.4 :** Comparaison des résistances à la compression avant et après traitement du bois en fonction de la teneur en bois (Bederina et coll., 2009).

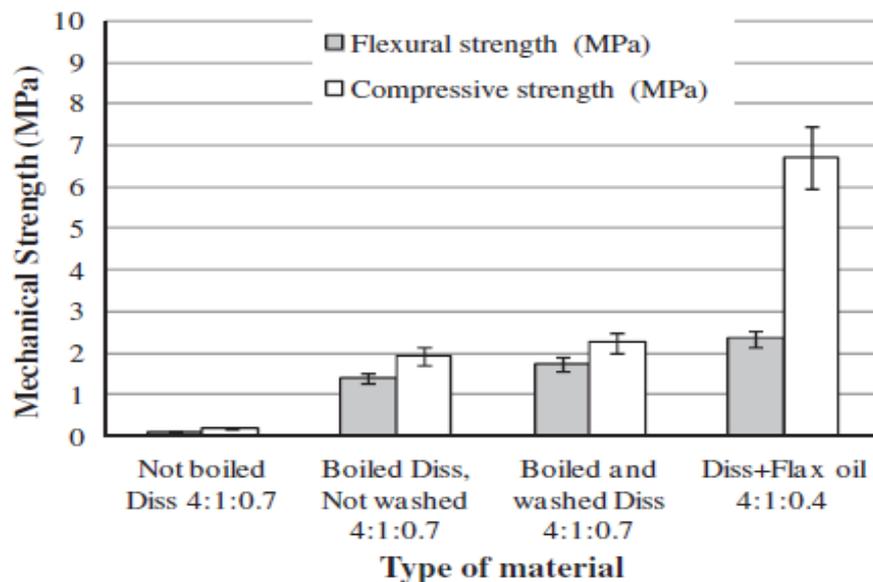
Comme nous avons déjà précisé (Bederina et coll., 2016), ont étudié l'effet de différents traitements de paille d'orge sur les propriétés mécaniques des bétons dans lesquels elles sont incorporés. A partir des résultats obtenus, on constate que les différents traitements appliqués aux fibres de paille ont amélioré la résistance à la compression. Ces chercheurs ont justifié ces résultats par une bonne compatibilité entre la paille et la matrice cimentaire. Pour conclure, il est primordial de signaler, que le traitement du vernis a donné la meilleure résistance à la compression (voir fig. 2.5).



**Figure 2.5 :** Résistance à la compression à 28 jours du béton de paille d'orge en fonction du type de traitement (Bederina et coll., 2016).

(Sellami et coll., 2013), ont utilisé les fibres de Diss. Soumis à différents traitements (traitement thermique par ébullition avec lavage, traitement par ébullition sans lavage, traitement par séchage à 50° C, traitement à l'huile de lin), ces auteurs ont évalué l'effet de ces derniers sur les propriétés mécaniques et physiques du mélange.

Les essais de résistance mécanique (compression et flexion) de ce béton fibré, indiquent que les fibres traitées thermiquement et revêtues d'huile de lin, résistent mieux que les fibres non traitées (Fig. 2.6).



**Figure 2.6 :** Résistances mécaniques du béton de Diss en fonction des divers traitements subis par la fibre de Diss (Sellami et coll., 2013).

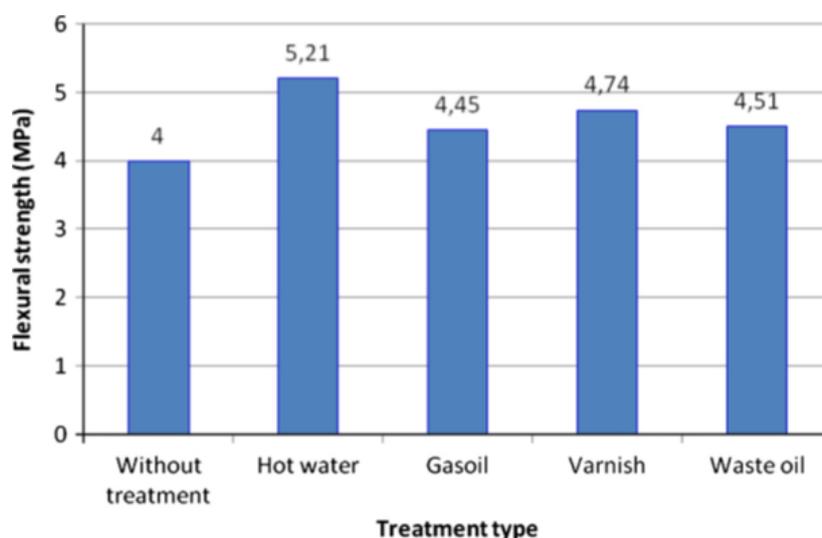
(Traoré et coll., 2018) ont étudié les propriétés physiques et mécaniques d'un béton à base de coquilles de palmier à huile (OPS). Les résultats obtenus représentés au Tableau 2.6, montrent qu'il y a respectivement une amélioration de 8, 5 et 6% pour les traitements CH, SS et TH par rapport au béton non traité (N) ; ce qui correspond à une diminution de 39, 41 et 40% par rapport au béton ordinaire (ON). Cette augmentation de la résistance à la compression après traitement peut être due à une amélioration de l'adhérence entre l'OPS traitée et la pâte de ciment (Tableau 2.6).

**Tableau 2.6** : Résistance à la compression des bétons de coquilles à palmier d'huile traités (Traoré et coll., 2018).

| Désignation des mélanges | Résistance à la compression (MPa) |
|--------------------------|-----------------------------------|
| ON                       | 41.8                              |
| N                        | 23.7                              |
| CH                       | 25.5                              |
| SS                       | 24.7                              |
| PVA                      | 21.9                              |
| TH                       | 25.1                              |
| SAT                      | 20.5                              |

#### 2.2.2.4. Flexion :

(Bederina et coll., 2016) ont travaillé sur des bétons à base de paille d'orge. Parmi les propriétés étudiées, l'influence du traitement sur la résistance à la flexion. Les résultats des mesures enregistrées à 28 jours, ont montré une amélioration de la résistance à la flexion pour tous les cas de traitements : l'huile usée, l'eau chaude, le vernis et le gasoil (fig. 2.7). Il est essentiel de noter que, comparé à d'autres traitements, l'eau chaude semble être le meilleur traitement, suivi par celui du vernis et l'huile usée. Toutefois, le traitement au gasoil a donné les résultats les plus faibles lors des essais de flexion par rapport aux autres traitements utilisés.

**Figure 2.7** : Résistance à la flexion (28 jours) du béton de paille d'orge en fonction du type de traitement (Bederina et coll., 2016).

(Traoré et coll., 2018), ont examiné l'effet du traitement de coquilles de palmier à huile sur les propriétés physiques et mécaniques du composite. Ces chercheurs ont utilisé différents traitements, avec différents dosages; 40 g/l, de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), 100 g/l de silicate de sodium, 5% d'alcool polyvinylique, et pour finir un traitement thermique et un autre par saturation en eau. A l'issue de cette étude, les auteurs ont conclu que les traitements appliqués à la coquille de palmier à huile n'avaient presque pas d'effets significatifs sur la résistance à la flexion du béton (Tableau 2.7).

**Tableau 2.7 :** Résistance à la flexion des bétons de coquilles à palmier d'huile traités (Traoré et coll., 2018).

| Désignation des mélanges | Résistance à la flexion (MPa) |
|--------------------------|-------------------------------|
| ON                       | 6.4                           |
| N                        | 4.7                           |
| CH                       | 5.0                           |
| SS                       | 4.4                           |
| PVA                      | 4.1                           |
| TH                       | 4.9                           |
| SAT                      | 4.0                           |

(Achour et coll., 2017) ont étudié l'effet de l'incorporation dans les mortiers, des fibres de Diss et de Doum, naturelles et traitées, sur les propriétés physiques et mécaniques de ces composites. Différents dosages de ces fibres, de longueur de 10 mm, ont été testés (0.5, 1, 1.5, 2, 3 et 4%). Les mortiers utilisés dans ce travail sont regroupés dans le Tableau 2.8.

**Tableau 2.8 :** Nomenclature des mortier étudiés dans le travail de Achour & coll, 2017

| Teneur en fibres (%) | Rapport des composants (C:S) <sup>a</sup> | Mortiers à base des différents pourcentages de fibres |                                      |                       |                                      |
|----------------------|---|---|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
|                      |   | Fibres de Diss brutes                                 | Fibres de Diss traitées à 3% de NaOH | Fibres de Doum brutes | Fibres de Doum traitées à 1% de NaOH |
| 0.0                  | 1: 3                                      | MT  | -                                    | -                     | -                                    |
| 0.5                  | 1: 3                                      | MDIB05  | MDIT05                               | MDOB05                | MDOT05                               |
| 1.0                  | 1: 3                                      | MDIB10  | MDIT10                               | MDOB10                | MDOT10                               |
| 1.5                  | 1: 3                                      | MDIB15  | MDIT15                               | MDOB15                | MDOT15                               |
| 2.0                  | 1: 3                                      | MDIB20  | MDIT20                               | MDOB20                | MDOT20                               |
| 3.0                  | 1: 3                                      | MDIB30  | MDIT30                               | MDOB30                | MDOT30                               |
| 4.0                  | 1: 3                                      | MDIB40  | MDIT40                               | MDOB40                | MDOT40                               |

Les résultats obtenus indiquent que la meilleure résistance à la traction par flexion est obtenue par des mortiers renforcés avec 2% de Diss (fig. 2.8) et 1.5% de Doum (fig. 2.9). De plus, les mortiers à base de fibres de Doum semblent avoir une résistance mécanique en flexion bien plus importante que celles renforcées avec les fibres de Diss.

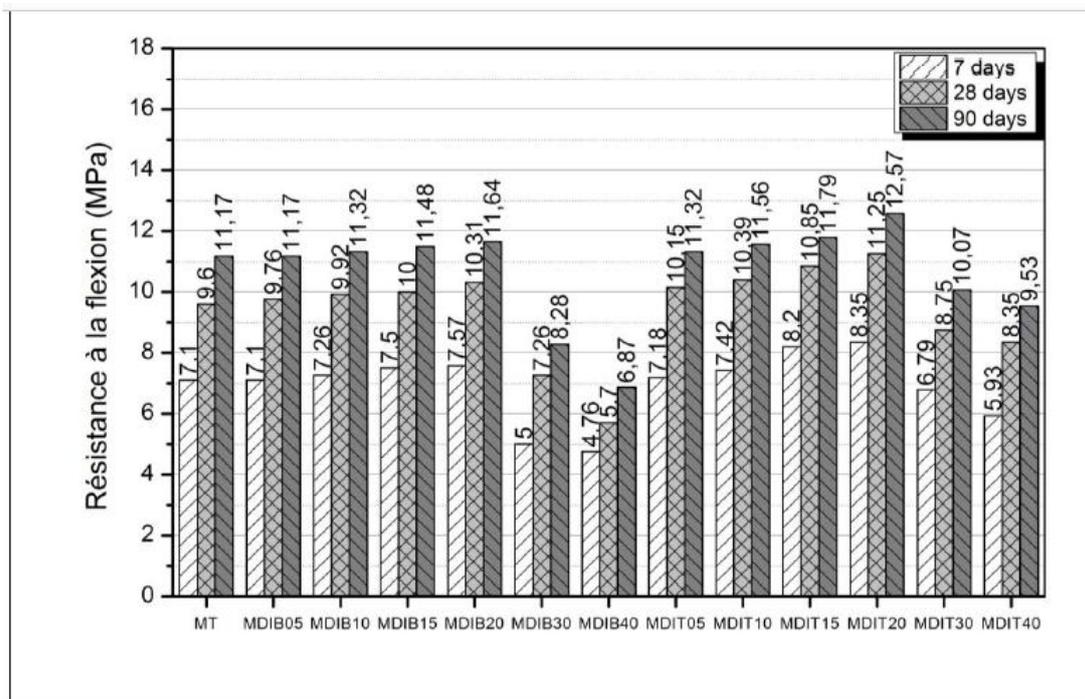


Figure 2.8 : Résistance à la traction par flexion des mortiers renforcés de fibres de Diss (Achour et coll., 2017).

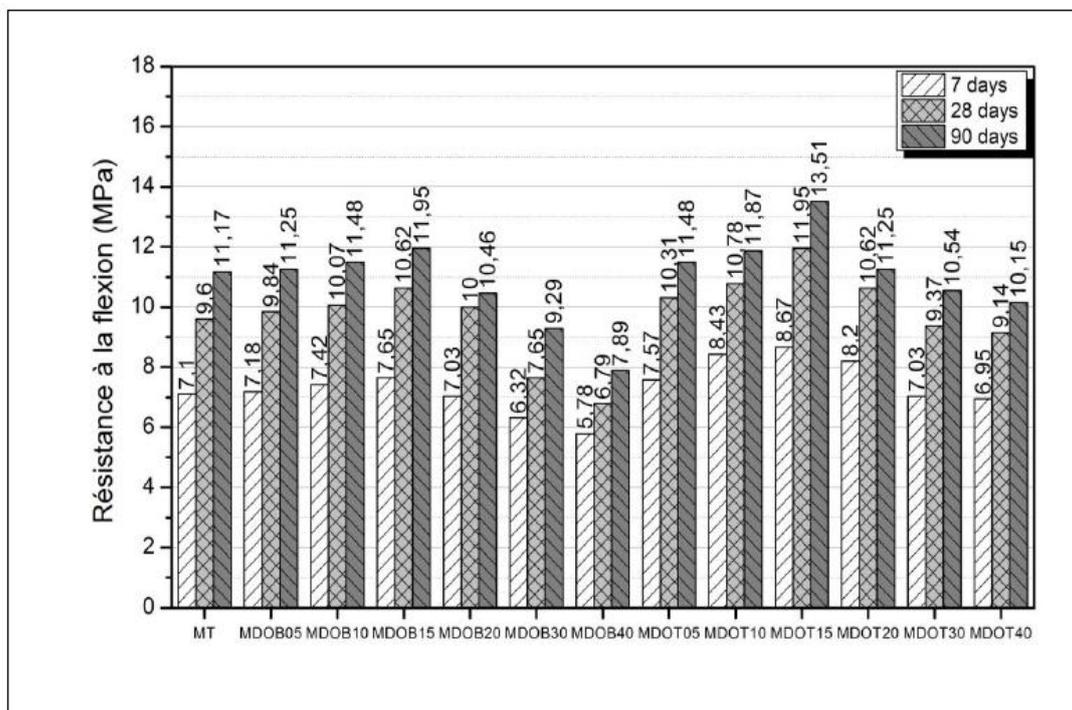


Figure 2.9 : Résistance à la traction par flexion des mortiers renforcés de fibres de Doum (Achour et coll., 2017).

2.2.2.5. Retrait

(Traoré et coll., 2018) ont mesuré la variation dimensionnelle des échantillons de béton allégé par coquille de palmier (OPS) traités à l'aide des traitements cités dans le paragraphe 2.2.1.2. Les résultats obtenus montrent qu'au cours des premiers mois de maturité du béton traité, la variation du retrait est très importante à comparer à celui du béton ordinaire (ON) (fig. 2.10). D'après les auteurs, cette augmentation du retrait est due à la perte en eau lors du séchage du béton.

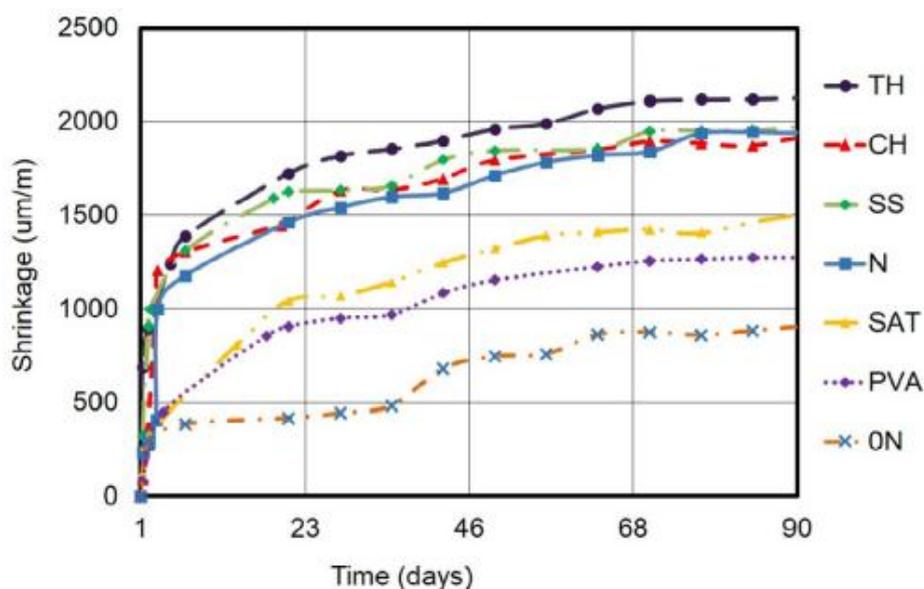


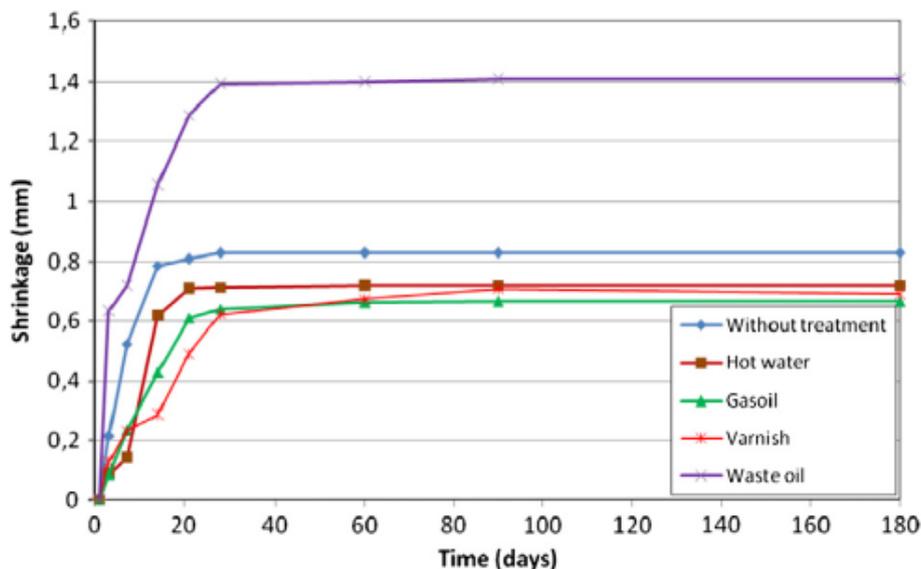
Figure 2.10 : Evolution du retrait de séchage du béton de coquilles de palmier traité en fonction du temps (Traoré et coll., 2018).

(Bederina et coll., 2009) ont aussi étudié l'influence du traitement aux copeaux de bois sur le retrait du béton. Ils ont observé pour le dosage de 160 kg/m<sup>3</sup>, que le retrait est réduit d'environ 33% dans le cas du béton de sable de dune (SD) et de 37% dans le cas du béton de sable de rivière (SR) (Tableau 2.9).

Tableau 2.9 : Retrait des composites à base de sable de dune (DS) et sable de rivière en fonction du contenu et du traitement du bois de rasage (Bederina et coll., 2009).

| Retrait (µm/m)           | 0   |     | 80   |      | 160   |       |
|--------------------------|-----|-----|------|------|-------|-------|
|                          | DS  | RS  | DS   | RS   | DS    | RS    |
| Retrait sans traitement  | 840 | 800 | 1460 | 1400 | 1900  | 1800  |
| Retrait avec traitement  |     |     | 950  | 910  | 1270  | 1130  |
| Réduction du retrait (%) | 0   |     | 34.9 | 35   | 33.16 | 37.22 |

(Bederina et coll., 2016) ont aussi étudié l'effet du traitement de la paille d'orge sur le béton. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 2.11. Les auteurs ont constaté que presque tous les traitements utilisés avaient contribué à la réduction du retrait des bétons étudiés. Le retrait évolue d'une manière remarquable au cours des 7 premiers jours, sauf dans le cas de l'huile usée où la cinétique était très importante. Au-delà de 21 jours, presque toutes les compositions avaient tendance à se stabiliser avec une légère augmentation. À l'exception du traitement au vernis où le retrait poursuivait son évolution avec la même cinétique jusqu'au début du deuxième mois.

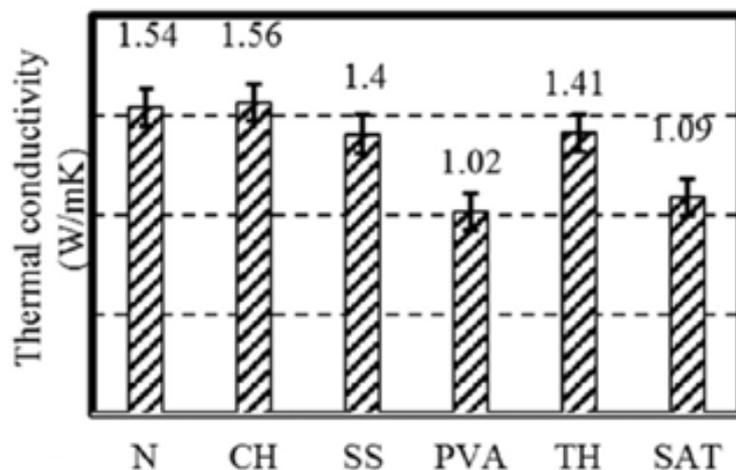


**Figure 2.11 :** Evolution du retrait du béton de paille d'orge en fonction du temps (Bederina et coll., 2016).

#### 2.2.2.6. Propriétés thermiques (conductivité)

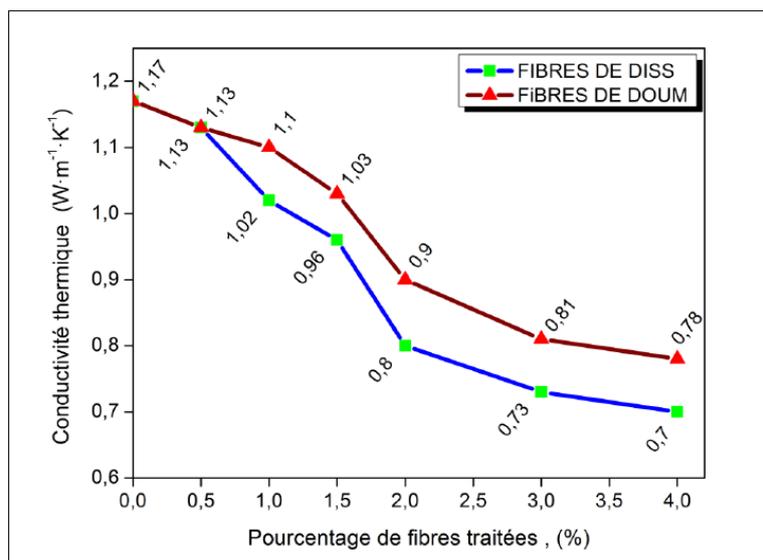
L'addition des fibres végétales aux composites à matrice cimentaire, entraîne une réduction de la conductivité thermique, accompagnée d'une augmentation de la porosité.

(Traoré et coll., 2018) ont observé que l'incorporation des coquilles de palmier d'huile dans le béton a amélioré les propriétés thermiques du matériau, en augmentant ses caractéristiques isolantes (Fig. 2.12). Les résultats des différents traitements réalisés ont montré que ces derniers n'ont pas une influence réelle sur la conductivité thermique du béton OPS, à l'exception du béton traité à l'alcool polyvinylique, qui a montré d'ailleurs une légère diminution de la conductivité thermique.



**Figure 2.12 :** La variation de la conductivité thermique du béton de coquilles de palmier d'huile en fonction du type de traitement (Traoré et coll., 2018).

(Achour et coll., 2017) a conclu que l'incorporation des fibres végétales diminue significativement la conductivité thermique des composites réalisés (fig. 2.13), avec une diminution qui atteint 40 et 33% pour les composites à base de fibres traitées de Diss et Doum par rapport à celles du mortier témoin (non traité).



**Figure 2.13 :** Variation de la conductivité thermique des bétons de Diss et de Doum en fonction de la teneur en fibres traitées (Achour et coll., 2017).

### 2.2.2.7. Module d'élasticité :

(Traoré et coll., 2018), ont montré une diminution significative du module d'élasticité des différents bétons OPS ayant subi différents traitements, sauf celui de la chaux (CH) qui a montré une évolution remarquable de 12,1 GPa (fig. 2.14).

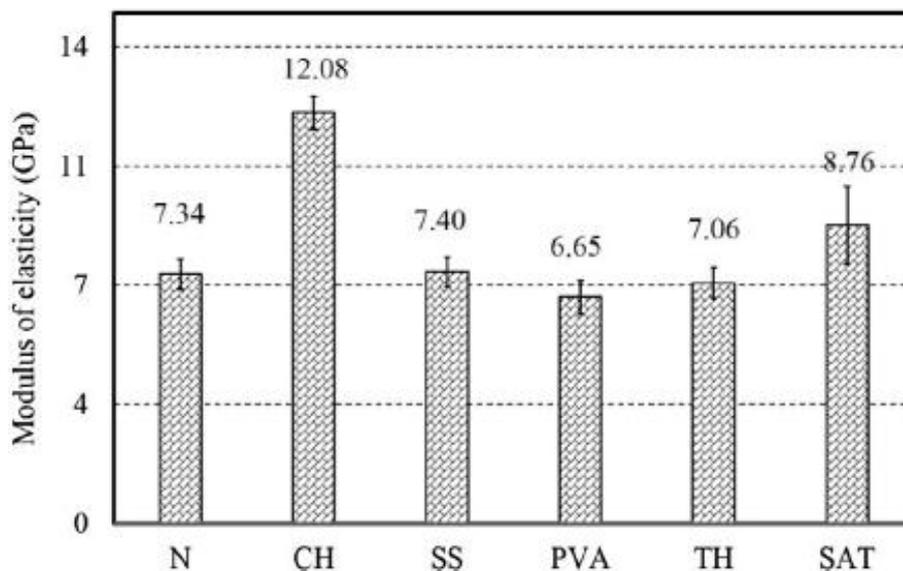


Figure 2.14 : Module d'élasticité des bétons OPS en fonction du type de traitement (Traoré et coll., 2018)

2.2.2.8. Porosité :

(Achour et coll., 2017), ont montré que l'augmentation du dosage en fibres végétales (Diss et Doum) au mortier entraîne une augmentation de la porosité (fig. 2.15 et 2.16). Après 90 jours, la porosité des fibres de Diss traité varie de 13 à 181% par rapport à celle du mortier témoin. Concernant les mortiers renforcés de fibres de Doum traité, la porosité passe de 6.5 à 160%, par rapport à celle du mortier témoin. Cette augmentation est lié à la porosité initiale des fibres et à la porosité de la matrice cimentaire.

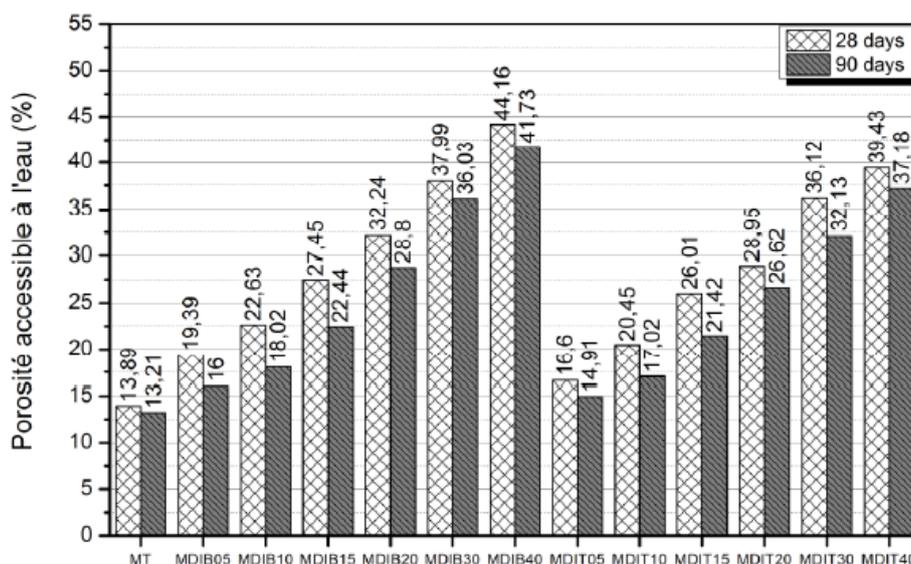
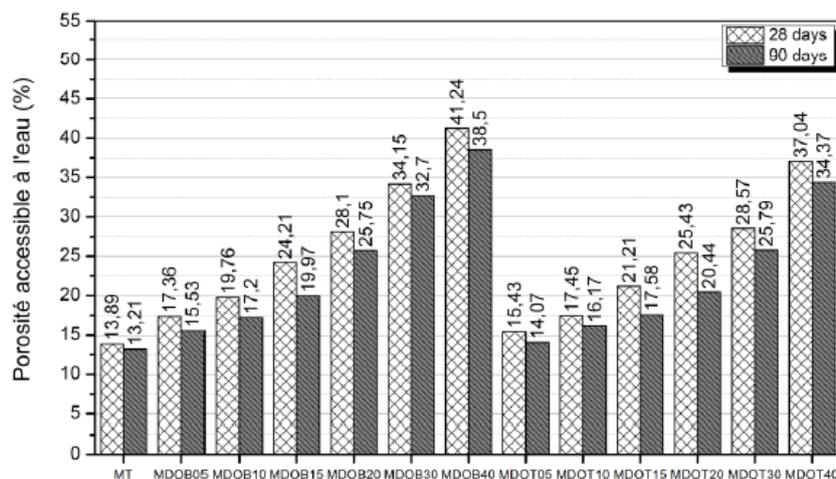


Figure 2.15 : Variation de la porosité des mortiers renforcés de fibres brutes de Diss et traitées (Achour et coll., 2017).



**Figure 2.16 :** Variation de la porosité des mortiers renforcés de fibres brutes de Doum et traitées (Achour et coll., 2017).

(Traore & coll, 2018) ont également montré que tous les bétons traités ont vu leur porosité augmenter par rapport au béton ordinaire (ON). Ces résultats se justifient par le volume d'air occlus (Tableau 2.10).

**Tableau 2.10 :** La variation de la porosité et la teneur en air des bétons d'OPS traités (Traoré et coll., 2018).

| Désignation des mélanges | Porosité (%) | Teneur en air (%) |
|--------------------------|--------------|-------------------|
| ON                       | 11%          | 3.6%              |
| N                        | 17%          | 4.3%              |
| CH                       | 17%          | 4.3%              |
| SS                       | 17%          | 4.4%              |
| PVA                      | 17%          | 4.5%              |
| TH                       | 17%          | 4.2%              |
| SAT                      | 18%          | 5.7%              |

**2.2.2.9. Vitesse ultrasonore :**

(Traore et coll., 2018) ont trouvé que la vitesse ultrasonore la plus élevée du béton d'OPS traité est de 3509 m/s. Cette valeur correspond au béton traité à la chaux (voir figure 2.17). En outre, les traitements effectués n'ont pas eu un impact notable sur la variation de ce paramètre.

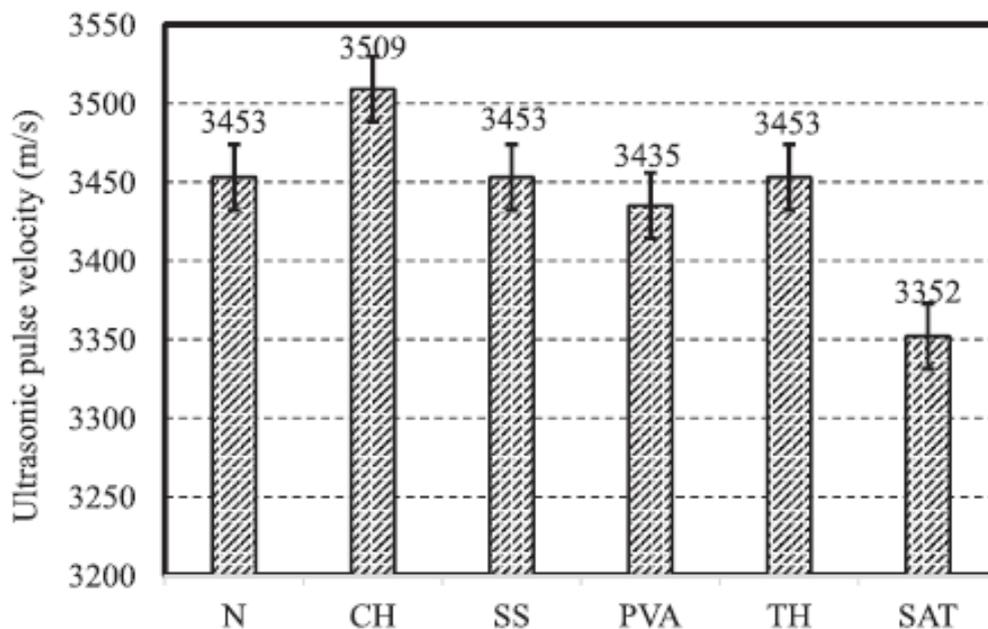


Figure 2.17 : Vitesse ultrasonore estimée sur des bétons d'OPS traités (Traoré et coll., 2018)

### 2.2.2.10. Capillarité

(Achour et coll., 2017) Les résultats d'absorption d'eau par capillarité, ont montré que les mortiers renforcés de fibres naturelles (brutes) ont un coefficient d'absorption capillaire plus élevée que celle des fibres traitées (fig. 2.18).

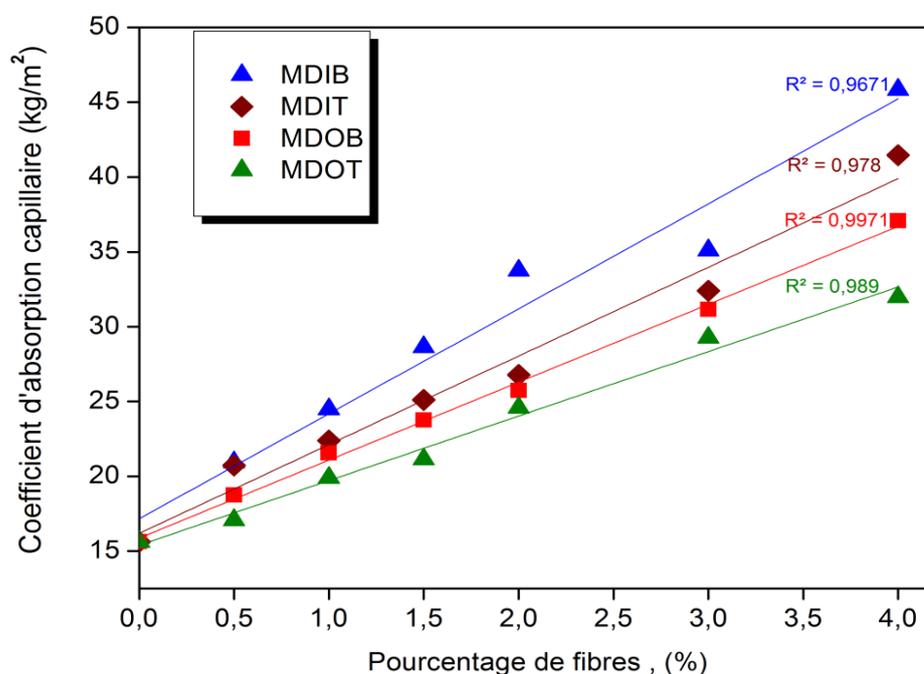


Figure 2.18 : Coefficients d'absorption capillaire à 24 h des composites renforcés de fibres naturelles et traitées, âgés de 90 jours (Achour et coll., 2017).

### 2.3. Conclusion

L'utilisation des particules végétales comme renfort dans la matrice cimentaire, présente de nombreux avantages en termes, d'amélioration des propriétés mécaniques, physiques, thermiques et de durabilité. Mais lorsque ces particules sont intégrées dans un milieu alcalin (cimentaire), certaines de leurs caractéristiques se détériorent et se dégradent. Pour cela, le traitement des particules végétales est très important pour améliorer leurs propriétés et assurer leurs efficacités.

Ce chapitre comprend des travaux de plusieurs chercheurs, qui ont étudié l'influence de différents traitements, sur l'incorporation des particules végétales dans les composites à matrice cimentaire. Ces études ont montré que les traitements jouent un rôle important pour l'amélioration des propriétés mécaniques, comme les résistances à la compression et à la flexion sans oublier le retrait. Cette augmentation des résistances après traitement est due à une amélioration de l'adhérence entre les particules traitées et la pâte de ciment, et dépend du pourcentage de l'ajout des particules. De plus, l'intégration des particules végétales à la matrice cimentaire, contribue généralement à augmenter la légèreté ou bien la porosité des composites étudiés. Ainsi, la conductivité thermique de ces composites diminue significativement par rapport au béton ordinaire, particulièrement quand les particules végétales sont traitées, ce qui offre aux composites une bonne isolation thermique et souvent une moindre absorption capillaire.

Pour tout ce qui précède, on conclut que le traitement préalable des fibres végétales avant leur incorporation dans une matrice cimentaire est une priorité majeure.

## Chapitre 3 :

### Caractérisation des matériaux & procédures expérimentales

#### 3. Caractérisation des matériaux & procédures expérimentales

##### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons, en premier lieu, définir les matériaux utilisés pour la préparation de nos bétons ainsi que les moyens et les méthodes nécessaires pour leur caractérisation.

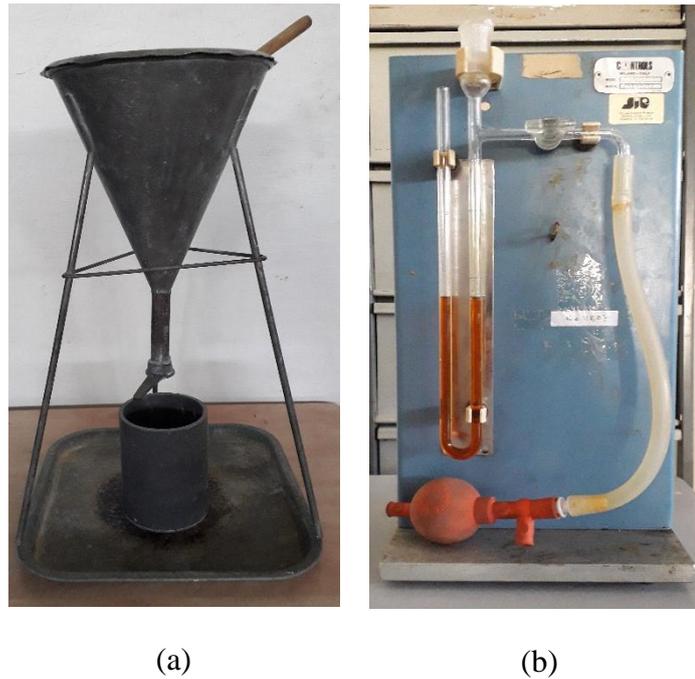
Nous décrivons par la suite les méthodes expérimentales qui ont permis d'étudier les paramètres d'un béton à base de granulats de liège. Ces méthodes concernent l'affaissement au cône d'Abrams, la masse volumique, la vitesse de transmission des ondes ultrasonores, l'absorption d'eau, la résistance à la compression et à la traction par flexion, la conductivité thermique et pour finir la microscopie électronique à balayage (MEB).

##### 3.2. Caractérisation des matériaux

Cette partie concerne la détermination des caractéristiques des différents constituants utilisés pour la confection des bétons sujets de notre travail. Les différents matériaux utilisés pour formuler les bétons sont les suivants :

###### 3.2.1. Ciment

Dans ce travail, Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42,5 à base de pouzzolane. Il est fourni par la société des ciments de Béni-Saf (S.C.I.B.S) de la wilaya d'Ain-Temouchent. Ses masses volumiques ont été déterminées suivant la norme NF P18-558. La masse volumique apparente a été mesurée à l'aide d'un entonnoir porté par un trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile, placé au-dessus d'un récipient qui a un volume de 1 litre Fig (3.1.a). De l'autre côté, la masse volumique absolue était mesurée en utilisant un pycnomètre et le toluène comme solution. La surface spécifique a été mesurée suivant les recommandations de la norme NF P 15-471 à l' aide d'un perméabilimètre Blaine Fig (3.1.b) en utilisant l'éq 3.1. Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau 3.1.



**Figure 3.1.** a) Entonnoir et b) perméabilimètre Blaine.

$$SSP = K \frac{\sqrt{n^3 t}}{MV \text{ abs}(1 - n)\sqrt{\mu}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Avec :

SSP : Surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g)

K : constante de l'appareil.

n : porosité (en général égal à 0,5)

MV abs : masse volumique absolue du ciment en t/m<sup>3</sup>

t : le temps d'écoulement (s)

μ : viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai (Pa.s)

**Tableau 3.1.** Masses volumiques et surface spécifique du ciment CPJ CEM II/A 42.5 utilisé.

| Matériau                     | Ciment  |
|------------------------------|---------|
| M.V app (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1011    |
| M.V abs (Kg/m <sup>3</sup> ) | 3124    |
| Ssp (cm <sup>2</sup> /g)     | 3142,02 |

### 3.2.2. Eau

L'eau utilisée pour la fabrication des bétons est celle qui court dans les robinets du pôle universitaire de Chetouane à Tlemcen. Sa composition chimique est obtenue par l'analyse d'un échantillon d'eau au Laboratoire des Travaux Publics Ouest de la wilaya de Tlemcen (LTPO). Cette analyse nous a permis d'obtenir la composition chimique regroupée dans le Tableau 3.2.

**Tableau 3.2.** Composition chimique de l'eau utilisée (LTPO).

| CATIONS        | mg/l    | méq/l | ANIONS                           | mg/l    | méq/l  |
|----------------|---------|-------|----------------------------------|---------|--------|
| Calcium        | 110,621 | 5,520 | Chlorure (Cl)                    | 99,400  | 2,800  |
| Magnésium (mg) | 42,282  | 3,477 | Sulfates (SO <sub>4</sub> )      | 312,740 | 6,515  |
| Sodium (Na)    | -       | -     | Carbonates (CO <sub>3</sub> )    | NEAT    | NEAT   |
| Potassium (k)  | -       | -     | Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> ) | 473,515 | 7,760  |
| Balance cation | -       | 8,997 | Balance Anion                    | 885,655 | 17,075 |

### 3.2.3. Adjuvant

Le super-plastifiant utilisé est de type Haut réducteur d'eau nommé THM 17200 Fig (3.2), acheté depuis la S.A.R.L Orachem Concrete (S.O.C), situé à Boutelilis, dans la wilaya d'Oran.



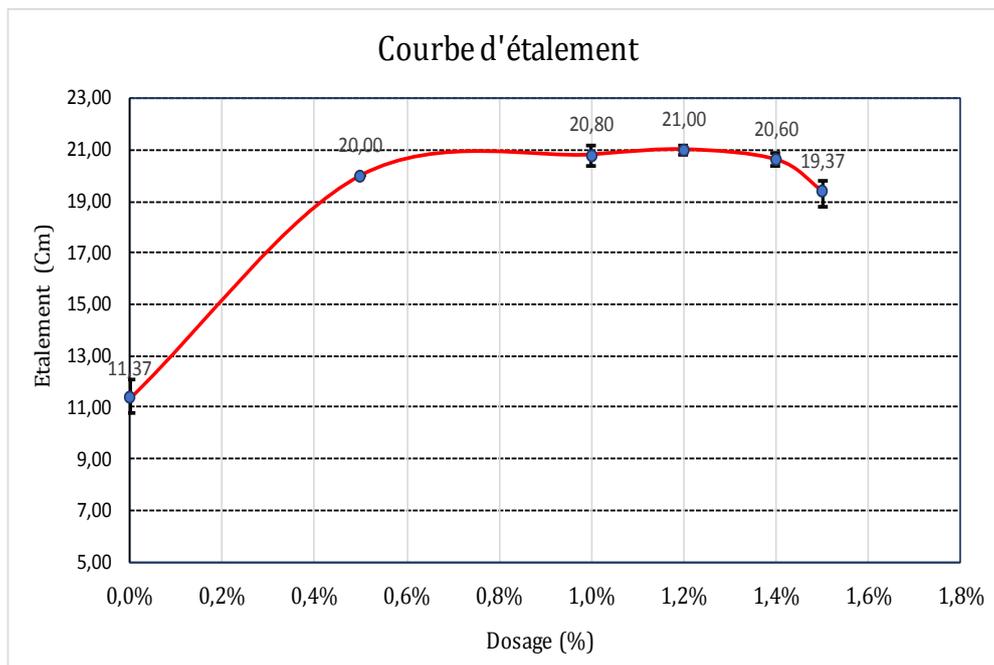
**Figure 3.2.** Super-plastifiant utilisé pour la formulation des bétons.

L'utilisation de super plastifiant vise à avoir une bonne fluidité du béton. Cependant, la quantité qu'on peut introduire varie en fonction du liant utilisé. Par conséquent, pour trouver le dosage de saturation dans ce travail, nous avons effectué un essai d'étalement au mini cône (Fig 3.3).

L'essai a été effectué en utilisant un rapport E/C de 0.5 et différents dosages de superplastifiants, en l'occurrence : 0%, 0.5%, 0.8%, 1%, 1.2%, 1.4% et 1.5%. Les résultats obtenus (Fig 3.4) ont montré que la saturation a été obtenue pour un dosage de 0.8%. Par conséquent, dans la suite du travail, nous allons utiliser ce dosage pour la formulation de nos bétons.



**Figure 3.3.** Essai d'étalement au mini-cône.



**Figure 3.4.** Courbe d'étalement au mini-cône des pâtes de ciment adjuvantées.

### 3.2.3. Granulats minéraux

Les granulats utilisés (gravier et sable) sont des granulats concassés fournis par l'Entreprise Nationale des Granulats (E.N.G) située à Sidi-Abdelli, Tlemcen-Algérie. Les bétons que nous avons fabriqués contiennent trois différentes tailles de granulats minéraux qui sont : sable 0/4mm et Gravier de classes 4/8, 8/16mm.

### 3.2.3.1. Analyse granulométrique des granulats

Dans le but de déterminer la distribution dimensionnelle des différents granulats minéraux, l'essai de l'analyse granulométrique suivant la norme BS EN 933-1 a été effectué. L'essai consiste à faire passer un échantillon de granulat sur une série de tamis. A l'issue de cet essai, une courbe granulométrique qui représente les pourcentages des tamis cumulé en fonction des diamètres des tamis est tracée. Les courbes granulométriques de différentes classes granulaires sont représentées dans la Fig 3.5.

En exploitant la courbe granulométrique du sable, le module de finesse a été calculé en utilisant l'éq 3.1 :

$$Mf = \frac{\sum Rc(\%)[0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 2.5; 5]}{100} \quad (3.1)$$

Les calculs effectués ont révélé un module de finesse de 3.26. Ceci indique que notre sable est plutôt grossier.

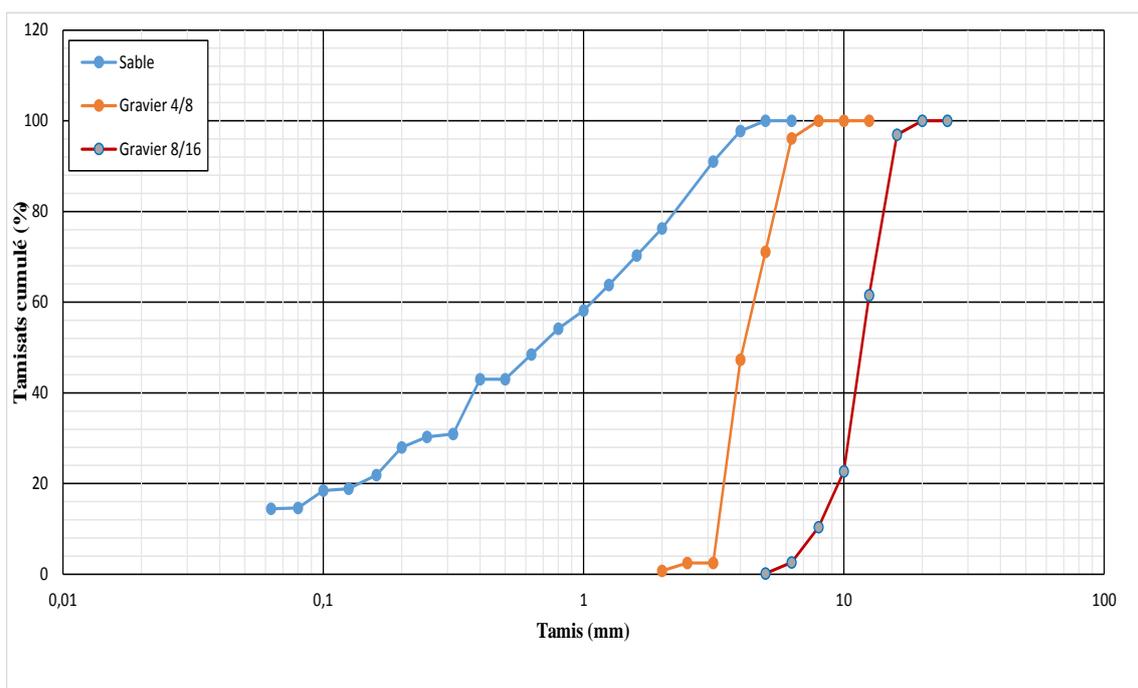
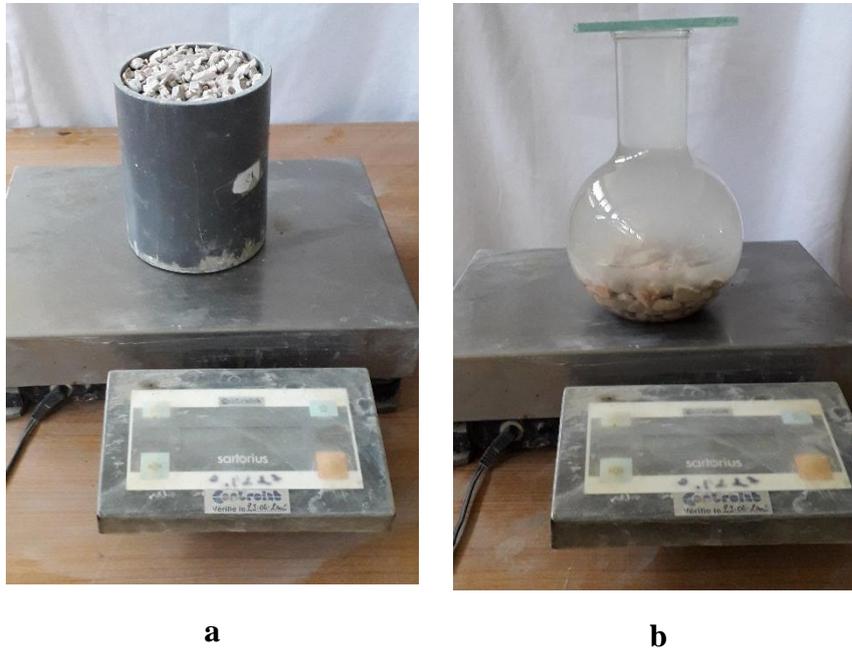


Figure 3.5. Courbes granulométriques des granulats minéraux.

### 3.2.3.2. Masses volumiques des granulats

Concernant les masses volumiques, la masse volumique apparente des granulats a été réalisée suivant la norme BS EN 1097-3 : 1998 (Fig 3.6.a), tandis que la masse volumique absolue a été déterminée en utilisant la méthode du ballon décrite dans la norme BS EN 1097-6 : 2012 (Fig 3.6.b). Il est utile de noter que cette méthode donne une précision plus élevée que celle dite de l'« éprouvette graduée ». Les résultats obtenus sont listés dans le Tableau 3.3. Ce tableau

montre que les masses volumiques apparentes varient entre 1200 et 1600 kg/m<sup>3</sup>, le temps où celles absolues oscillent entre 2500 et 2600 kg/m<sup>3</sup>.



**Figure 3.6.** Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats minéraux utilisés.

**Tableau 3.3.** Masses volumiques des granulats minéraux utilisés.

| Classe granulaire            | Sable   | Gravier 4/8 | Gravier 8/16 |
|------------------------------|---------|-------------|--------------|
| M.V app (kg/m <sup>3</sup> ) | 1558,9  | 1356,2      | 1207,3       |
| M.V abs (kg/m <sup>3</sup> ) | 2598,75 | 2538,07     | 2546,68      |

### 3.2.3.3. Absorption

Le coefficient d'absorption exprime la quantité d'eau que peut absorber le granulat pendant 24h d'immersion totale dans l'eau (Fig 3.7). Dans la présente étude, ce paramètre a été mesuré conformément aux règles de la norme BS EN 1097-6 : 2012. Dans un premier temps, l'échantillon est séché pendant 48h à 105°C. Ensuite il est immergé dans l'eau durant 24h.



**Figure 3.7.** Absorption d'eau des granulats minéraux utilisés.

L'étape qui suit consiste à sécher la surface de l'échantillon à l'aide d'un chiffon pour les graviers 4/8 et 8/16mm, et en utilisant un séchoir pour le sable. Le coefficient d'absorption est calculé à la fin par le biais de l'éq 3.2. Les Coefficients d'absorption des trois classes granulaires sont regroupés dans le Tableau 3.4 :

$$Ab_{24} (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (3.2)$$

Avec :

$M_s$  : Masse sèche des granulats en grammes (g).

$M_{sat}$  : Masse des granulats saturés (g).

**Tableau 3.4 :** Coefficient d'absorption d'eau des granulats minéraux utilisés.

| Granulat       | Sable | Gravier 4/8 | Gravier 8/16 |
|----------------|-------|-------------|--------------|
| Absorption (%) | 2,12  | 1,57        | 1,28         |

### 3.2.4. Granulats végétaux :

Dans le présent travail, nous avons utilisé le liège comme sous forme de granulats concassés. Nous avons introduit trois différentes classes granulaires de liège, en l'occurrence, Le liège 0/4, 4/8 et 8/16mm (Fig 3.8). Les deux dernières classes proviennent de la société JIJEL SIBL, tandis que la classe granulaire 0/4 a été obtenu après broyage des morceaux de lièges récoltés de la forêt d'Ahfir située à Tlemcen.



Figure 3.8. Les classes des granulats de liège utilisés.

### 3.2.4.1. Analyse granulométrique des classes de liège :

L'analyse granulométrique des granulats de liège a été aussi effectuée suivant les règles de la norme BS EN 933-1. Cependant, des masses de 160 grammes pour les classes 0/4 et 4/8mm et 180 grammes pour la classe 8/16 ont été utilisées. Ces masses représentent les quantités nécessaires pour remplir les tamis. Les courbes granulométriques de différentes classes granulaires sont représentées dans la Fig 3.9.

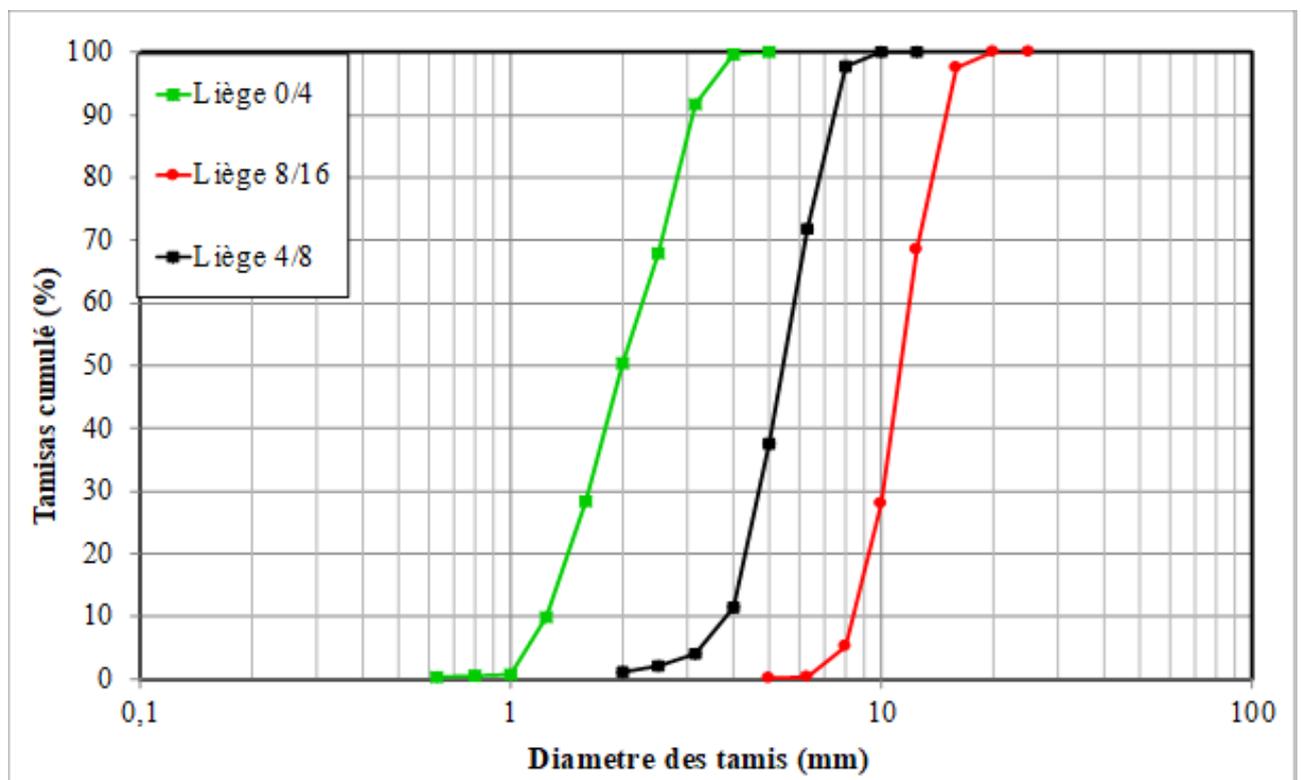


Figure 3.9. Courbes d'analyse granulométrique des granulats de liège utilisés.

### 3.2.4.2. Masses volumiques des classes de liège

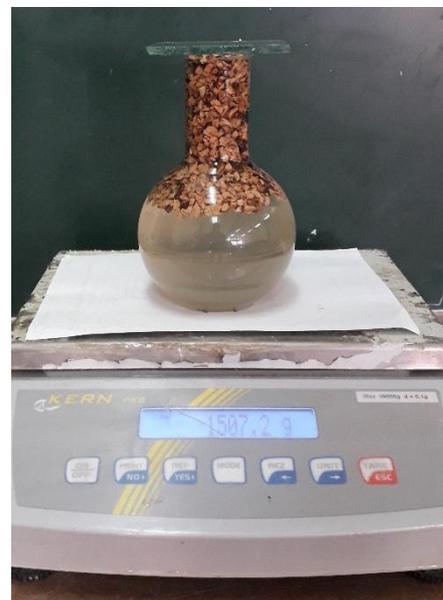
Les masses volumiques apparentes (Fig 3.10.a) et absolues (Fig 3.10.b) des granulats de liège ont été déterminées par la même manière que celles des granulats minéraux, c.à.d. en utilisant les recommandations des normes : BS EN 1097-3 ; 1998 et BS EN 1097-6 ; 2012, respectivement. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 3.5.

**Tableau 3.5.** Masses volumiques des granulats de liège.

| Classe granulaire            | Liège 0/4 | Liège 4/8 | Liège 8/16 |
|------------------------------|-----------|-----------|------------|
| M.V app (kg/m <sup>3</sup> ) | 128,4     | 84        | 86         |
| M.V abs (kg/m <sup>3</sup> ) | 218       | 184       | 223        |



**a**



**b**

**Figure 3.10.** Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats de liège utilisés.

### 3.2.4.3. Absorption

L'essai consiste à déterminer le coefficient d'absorption d'eau du liège. Cependant, il n'existe aucune norme qui décrit la procédure de détermination de ce paramètre pour les particules végétales. Par conséquent, ce paramètre a été déterminée grâce à la méthode décrite par la suite : après un séchage de 24h sous une température de 60°C, les trois classes granulaires (0/4, 4/8, 8/16) du liège ont été ensuite totalement immergés dans l'eau pendant des durées de 4, 8, 15, 30 min 1, 2, 4, 24, 48, 72 et 96 heures (Fig 3.11). Il est essentiel de noter que après chaque période de temps mentionné les granulats de liège ont été séchés (à l'aide d'une l'essoreuse à

salade) et puis pesés pour déterminer leurs masses en état humide. Les Coefficients d'absorption des trois classes granulaires de liège sont regroupés dans le Tableau 3.6 :

$$Ab(\%) = \frac{M_t - M_s}{M_s} * 100 \quad (3.3)$$

**Avec :**

$M_t$  : Masse de l'échantillon à l'instant t (g).

$M_s$  : Masse sèche de l'échantillon (g).



**Figure 3.11.** Immersion des échantillons de liège.

**Tableau 3.6.** Coefficients d'absorptions des différents granulats de liège.

| Granulat       | Liège 0/4 | Liège 4/8 | Liège 8/16 |
|----------------|-----------|-----------|------------|
| Absorption (%) | 168,67    | 116,78    | 68,89      |

### 3.3. Formulation des bétons

#### 3.3.1. Composition

Le principe de formulation des bétons de lièges sujet de cette étude repose sur le remplacement, à partir d'un béton ordinaire, d'un volume de granulats minéraux par son équivalent en granulats de liège. Le béton ordinaire choisi est un béton obtenu à l'aide d'une formulation par la méthode de Dreux-Gorisse. Il présente un Affaissement de 17 cm une résistance à la compression à 28 jours de 31.5MPa. La composition de ce béton est regroupée dans le Tableau 3.7.

**Tableau 3.7 :** Composition de  $1m^3$  de béton ordinaire en ( $kg/m^3$ ).

| <b>Sable</b> | <b>Gravier<br/>4/8</b> | <b>Gravier<br/>8/16</b> | <b>Ciment</b> | <b>Eau</b> | <b>Adjuvant</b> |
|--------------|------------------------|-------------------------|---------------|------------|-----------------|
| 780,6        | 348                    | 729,3                   | 350           | 171,4      | 2.8             |

En allant de cette formulation de béton ordinaire et en effectuant un remplacement volumique de 50%, le béton de liège a été formulé. Le remplacement a été effectué de manière que la moitié du sable est remplacée par le liège 0/4mm, le gravier 4/8 par le liège 4/8mm et le gravier 8/16 par le liège 8/16mm. Le choix de ce taux de remplacement est basé sur les résultats des travaux antérieurs réalisés par (Tedjditi et coll, 2018). La composition du béton de liège est résumée dans le Tableau 3.8.

**Tableau 3.8.** Composition de  $1m^3$  du béton de liège (en  $kg/m^3$ ).

| <b>Ciment</b> | <b>Eau</b> | <b>Super-<br/>plastifiant</b> | <b>Sable</b> | <b>Gravier<br/>4/8</b> | <b>Gravier<br/>8/16</b> | <b>Liège<br/>0/4</b> | <b>Liège<br/>4/8</b> | <b>Liège<br/>8/16</b> |
|---------------|------------|-------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 350           | 171.4      | 2.8                           | 390.3        | 174.0                  | 364.7                   | 23,34                | 11.1                 | 26.6                  |

### 3.3.2. Mode de malaxage

Quant à la méthode de malaxage, nous avons adopté le mode de malaxage choisi dans les travaux de (Tedjditi et coll, 2018). Dans leur travail ils ont essayé plusieurs modes de malaxage et ils ont rendu compte que le mode de malaxage le plus adéquat est le suivant :

D'abord, dans un malaxeur à axe vertical (Fig 3.12), les granulats de liège traités et saturés pendant 48h ont été introduits et malaxés pendant 90secondes. Ensuite, le sable, le ciment et la moitié de l'eau super-plastifiée étaient ajoutés et mélangés pendant 4minutes. Puis, le gravier et la quantité d'eau super-plastifiée restante étaient versés et brassés pendant 60 secondes. A la fin, le malaxage de tout le mélange continuait pendant 90 secondes.



**Figure 3.12.** Malaxeur utilisé pour la formulation de bétons.

### 3.3.3. Préparation des éprouvettes

Une fois l'opération du malaxage est terminée, nous avons commencé le remplissage des moules cylindriques (110mm de diamètre et 220mm de hauteur) et prismatiques ( $100*100*400\text{mm}^3$ ). Le remplissage a été fait en utilisant la vibration à l'aide d'une table vibrante (Fig 3.13) comme moyen de serrage. Le démoulage a été effectué après 24 heures et les éprouvettes ont subi une cure mixte pendant 28 jours (14 jours dans l'eau et 14 jours dans le laboratoire à une humidité de 45% et une température  $23,6\text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Figure 3.13.** Table vibrante utilisée pour le serrage des échantillons de béton.

Il est aussi utile de dire qu'avant de commencer les essais après la fin de la période de cure, les éprouvettes ont été surfacées à l'aide d'une scie à béton comme le montre la Fig 3.14.



**Figure 3.14.** Rectification des surfaces des éprouvettes à l'aide de la scie à béton.

### **3.4. Caractérisation du béton à l'état frais :**

#### **3.4.1. Mesure de la consistance**

Une fois le malaxage est terminé, L'affaissement du béton a été mesuré à l'aide du cône d'Abrams selon la norme BS EN 12350-2 :2009. Le cône possédant des dimensions de 10cm\*20cm\*30cm, est rempli en trois couches. Après remplissage, le cône est levé et l'affaissement du béton est mesuré à l'aide d'une règle (Fig 3.15).



**Figure 3.15.** Essai d'affaissement au cône d'Abrams

### 3.5. Caractérisation du béton à l'état durci

#### 3.5.1. Masse volumique

La masse volumique à 1, 7, 14, 21 et 28 jours a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques de 110mm de diamètre et 220mm de hauteur selon les recommandations de la norme BS EN 12390-7 : 2009. L'échantillon est pesé (Fig 3.16), les dimensions de l'éprouvette ont été mesurées et la masse volumique a été calculée en utilisant l'éq 3.4:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.4)$$

**Avec :**

$\rho$  : Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>).

M : la masse de l'éprouvette en kilogrammes (kg).

V : volume de l'éprouvette en mètres cubes (m<sup>3</sup>).

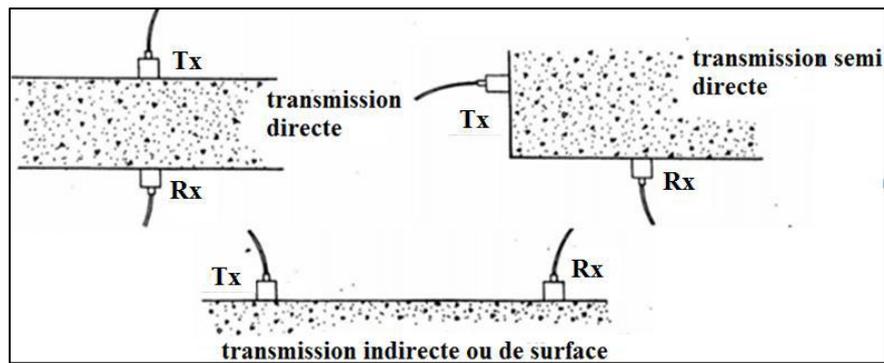


**Figure 3.16.** Essais de masse volumique des bétons.

#### 3.5.2. Transmission ultrasonique :

L'essai de détermination de la vitesse ultrasonore dans le béton est un test qui peut être utilisé pour évaluer certaines de ses propriétés tel que sa microstructure, sa porosité ou ses propriétés mécaniques. Il possède l'avantage d'être non destructif.

La mesure s'effectue en déplaçant manuellement les capteurs le long de l'éprouvette de mesure. Comme le montre la Fig 3.17, on peut disposer les capteurs de trois façons, à savoir : directe, semi-directe ou indirecte.



**Fig 3.17.** Différentes techniques de mesure avec l'ultrason (BS EN 12504-4 :2004).

Dans notre campagne expérimentale, cet essai est réalisé suivant les règles de la norme BS EN 12504-4 : 2004, en utilisant la méthode directe, sur des éprouvettes de 110 mm de diamètre et 220 mm de longueur.

Après avoir mesuré le temps ( $t$  en secondes) nécessaire pour qu'une onde traverse la longueur ( $L$  en mètre) de l'éprouvette cylindrique à l'aide d'un émetteur et enregistré le signal par un récepteur séparé (Fig 3.18), la vitesse ( $V$  en mètre par secondes (m/s)) ultrasonique est calculée en utilisant l'éq 3.5 :

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.5)$$



**Figure 3.18.** Essai à l'ultrason.

### 3.5.3. Absorption

La détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion totale a été effectuée sur des échantillons cubiques de 50mm de côté (Fig 3.19). L'essai est réalisé conformément à la norme ASTM C 642 – 06.

L'échantillon est premièrement séché à 60°C jusqu'à stabilisation de masse (Différence de masse inférieure ou égale à 0.5% entre 3 pesées espacées de 24h). L'échantillon est ensuite immergé pendant au moins 48h et jusqu'à stabilisation de masse. Il est utile de noter qu'avant

chaque mesure, la surface de l'échantillon est séchée à l'aide d'un papier absorbant pour enlever tout excès d'eau présent sur la surface. Le coefficient d'absorption d'eau est donc calculé selon l'éq 3.6 :

$$Ab (\%) = \frac{M_t - M_s}{M_s} * 100 \quad (3.6)$$

Avec :

$M_s$  : Masse sèche des échantillons (g).

$M_t$  : Masse des échantillons saturées à l'instant t (s).



Fig 3.19. Immersion totale des échantillons dans l'eau.

### 3.5.4. Résistance à la compression

Les mesures de la résistance à la compression ont été effectuées en utilisant les recommandations de la norme BS EN 12390-3 : 2009. L'essai a été conduit en utilisant une machine universelle hydraulique de Traction/compression pilotée par ordinateur et pouvant atteindre une force de 600 kN (Fig 3.20).

Vu la faible résistance de ce type de béton, nous avons utilisé une vitesse de 0.2 MPa/s. Une fois l'essai terminée, l'ordinateur affiche une courbe de capacité Force-déplacement et donne aussi la valeur de la force maximale. La résistance à la compression est calculée en utilisant l'éq 3.7 :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.7)$$

Avec :

$\sigma$  : La résistance à la compression en MPa.

$F$  : La force maximale (N).

$S$  : La surface de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).



Figure 3.20 : Presse de capacité 600 KN.

### 3.5.5. Résistance à la traction par flexion

L'essai de flexion sur trois points est réalisé conformément à la norme BS EN BS EN 12390-5 : 2009 en utilisant un portique didactique de capacité de 200 KN (Fig 3.21). Des éprouvettes prismatique  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$  sont préparées et testées après 28 jours. Pour chaque formulation de mélange, les valeurs obtenues correspondent à la moyenne de trois essais. La résistance à la flexion est calculée par l'éq 3.8 :

$$\sigma = \frac{3 P \cdot L}{2 b^3} \quad (3.8)$$

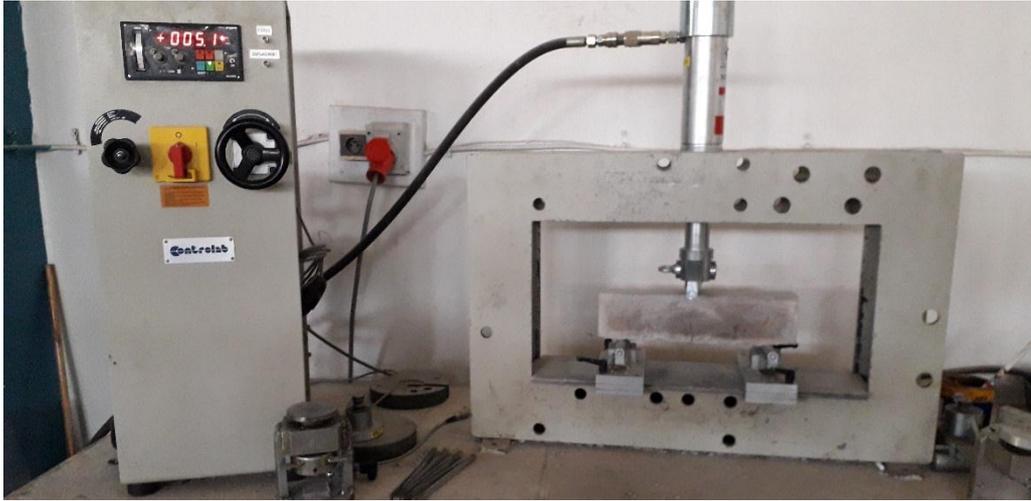
Avec :

$\sigma$  : La résistance à la flexion en MPa

P : La charge appliquée en MN.

L : Longueur de l'éprouvette en mètre (m).

b : Coté de l'éprouvette (m)



**Fig 3.21.** Portique didactique

### **3.5.6. Conductivité thermique**

Les essais de conductivité thermique ont été réalisés en régime transitoire en utilisant un conductivimètre Quicklinne TM 30 (Fig 3.22) qui permet de faire les mesures de conductivité thermique en régime transitoire. Les éprouvettes cylindriques de  $11 \times 22 \text{ cm}^2$  sont découpées avec une scie à béton pour en extraire, des échantillons cylindriques de diamètre et 5cm de hauteur. Afin d'assurer un meilleur contact entre la surface de l'appareil et la surface de l'échantillon, ces échantillons sont d'abord surfacés et rectifiés à l'aide d'une scie à béton. Ensuite, ils sont séchés à  $60 \text{ °C}$  jusqu'à stabilisation de masse.

La mesure de la conductivité thermique s'appuie sur la technique du fil chaud. Il s'agit d'une méthode qui mesure le transfert d'un flux de chaleur unidirectionnel. Le fil chaud était chauffé par une source d'alimentation externe, puis la température des échantillons augmentait en fonction de la chaleur dégagée par le fil chaud. En se basant sur la variation de cette température en fonction du temps, l'appareil calcul et affiche la valeur de la conductivité thermique de l'échantillon à la fin de l'essai.



**Figure 3.22.** Essai de conductivité thermique.

### 3.5.7. Microscopie électronique à balayage (MEB)

L'analyse microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique qui permet d'étudier la microstructure d'un échantillon. Cette analyse a été effectuée à l'aide d'un appareil microscopique électronique de type HIRACHI-TM1000 à 15 kV de tension d'accélération. Fig 3.23.

Dans notre travail expérimental, l'objectif du MEB, été d'étudier l'influence des différents traitements sur la microstructure l'évolution de la structure morphologique ainsi que l'état de surface des granulats de liège après leur traitement.



**Figure 3.23.** Analyse microscope électronique à balayage (MEB).

## 3.6. Conclusion

Ce chapitre, nous a permis, dans un premier temps, d'étudier les caractéristiques des constituant de notre béton. En effet, nous avons enregistré qu'il existe de grandes différences entre les propriétés des granulats minéraux et les granulats végétaux. Les principales différences peuvent être résumées dans les points suivants :

- Les granulats de liège utilisés présentent une répartition granulométrique similaire à celle des granulats minéraux usuels à l'exception de la classe 0/4mm qui ne comporte pratiquement pas de fines,
- Des masses volumiques qui sont inférieures au dixième de celles des minéraux
- Une absorption qui peut arriver jusqu'au double de leur masse initiale.

Dans cette partie, nous avons aussi déterminé la composition du béton de liège ainsi que la procédure de sa fabrication (Méthode de malaxage).

La deuxième partie a été simplement destinée à la description des méthodes de mesure des paramètres physico-mécaniques et de durabilité ainsi que la microstructure des bétons produits.

## Chapitre 4 :

### Apport du prétraitement sur les propriétés des granulats et des bétons de liège

#### 4. Apport du prétraitement sur les propriétés des granulats et des bétons de liège

##### 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, une évaluation de l'apport du traitement des particules végétales sur les performances d'un béton vert fabriqué en utilisant des granulats de liège, est réalisée. Le béton qui fait l'objet de notre travail est un béton contenant un taux de liège de 50% en volume, incorporé comme substituant des granulats minéraux. Avant leur incorporation, les granulats utilisés ont subi cinq différents traitements, en l'occurrence, un traitement par exposition à cinq cycles d'humidification/séchage (Hornification), ébullition, éthanol, NaOH et Ca(OH)<sub>2</sub>. Après l'application de ces traitements, les propriétés des granulats de liège ont été déterminées. Une fois les bétons sont durcis, ils étaient caractérisés en termes de : maniabilité (Affaissement au cône d'Abrams), Masse volumique, Vitesse ultrasonore, Absorption en eau, résistances à la compression et à la flexion, module d'Young, porosité et conductivité thermique.

##### 4.2. Traitements utilisés

Dans cette partie du chapitre, nous allons faire un rappel des traitements que nous avons utilisé (en se basant sur l'étude bibliographique réalisée dans les chapitres 1 et 2 (Ferreira et coll., 2015), (Achour et coll., 2017), (Traore et coll., 2018)) dans le cadre de ce travail. Après les avoir traités, les granulats de liège ont été saturés pendant 48h. Les traitements que nous avons utilisé sont regroupés dans le Tableau 4.1 :

**Tableau 4.1.** Différents traitements utilisés.

| Désignation du traitement | Description du traitement  | Photo |
|---------------------------|--|-------|
| Hornification             | Exposition des granulats de liège à 5 cycles d'immersion/séchage dans l'eau (16 heures d'immersion et 8 heures de séchage) | -     |

|                           |   |   |
|---------------------------|---|---|
| <p>Ebullition</p>         | <p>-Les granulats sont d'abord bouillis dans l'eau pendant 2h sous l'effet d'une source de chaleur.</p> <p>-Ils sont ensuite refroidis à l'air libre pendant 30 min et séchés dans le four pendant 24h à 60° C.</p> |    |
| <p>Ethanol</p>            | <p>-Immersion dans une solution composée de 95% d'eau distillée et 5% d'éthanol pendant 6h.</p> <p>-Séchage pendant 24h à 60°C).</p>  |   |
| <p>NaOH</p>               | <p>-Immersion dans une solution contenant 1% de NaOH pendant 2h et puis séchage pendant 24h à 60° C.</p>  |  |
| <p>Ca(OH)<sub>2</sub></p> | <p>Immersion dans une solution contenant 0.173% de Ca(OH)<sub>2</sub> pendant 2h et puis séchage pendant 24 à 60° C.</p>  |  |

### **4.3. Effets des traitements sur les propriétés des granulats**

Dans cette partie, on va d'abord présenter les résultats de l'effet du traitement sur la valeur de la masse volumique des granulats de liège. Par la suite, les principales remarques tirées d'une inspection visuelle et olfactive réalisée sur les granulats de liège après traitement sont présentées. A la fin, on compare les différentes microstructures obtenues à l'aide de photos réalisées par microscopie électronique à balayage (MEB).

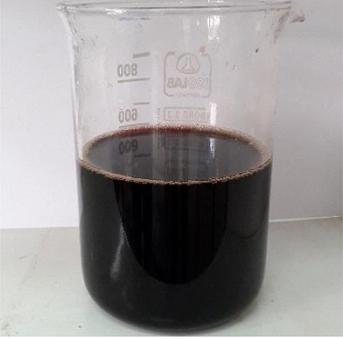
#### **4.3.1. Masse volumique et inspection visuelle**

Les résultats de l'impact des différents traitements sur la masse volumique des granulats de liège (classe 4/8mm prise à titre d'exemple puisque les autres classes granulaires ont donné des résultats similaires) sont présentés dans le Tableau 4.2. Les résultats sont présentés sous forme de rapport entre la masse volumique des granulats après et avant application du traitement. Ces résultats indiquent que la totalité des traitements que nous avons appliqué ont conduits à une réduction de la masse volumique apparente des granulats de liège. Les plus grandes diminutions ont été remarqué pour les cas des traitements à l'aide de chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) et d'hornification et étaient respectivement de 8.4 et 10% ; tandis que les autres traitements ont donné des baisses de valeurs qui ne dépassent pas les 4%. Les diminutions remarquées au niveau de la masse volumique sont peut-être dues à la quantité et à la nature des composés extraits en appliquant les traitements.

Les résultats de l'investigation visuelle ont montré que les solutions récupérées après traitements présentent des différences très claires au niveau de la couleur. Cette couleur varie du clair jusqu'au foncé. Il est à noter que la couleur la plus claire a été obtenue pour un traitement alcalin à la chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), tandis que la plus foncée a été obtenue pour un traitement à l'aide à la soude ( $\text{NaOH}$ ).

Afin d'obtenir d'autres indications sur la nature des composés extraits, une inspection olfactive a été aussi réalisée. Cette inspection a indiqué une grande divergence entre les odeurs des différentes solutions. La solution obtenue pour le traitement à la chaux présente une odeur qui ressemble à celle obtenue par épiluchement des pommes de terre (composée elle aussi de subérine principalement). En revanche, les granulats traités à la soude ont dégagé une odeur similaire à celle des olives.

**Tableau 4.2.** Masses volumiques et solutions récupérées des granulats traités

| Traitement    | MV Liège traité/MV Liège non traité | Solution récupérée  |
|---------------|-------------------------------------|---|
| Hornification | 89,92                               | -   |
| Ebullition    | 98,29                               |    |
| Ethanol       | 98,77                               |   |
| NaOH          | 96,04                               |  |

|                     |      |   |
|---------------------|------|---|
| Ca(OH) <sub>2</sub> | 91,6 |  |
|---------------------|------|---|

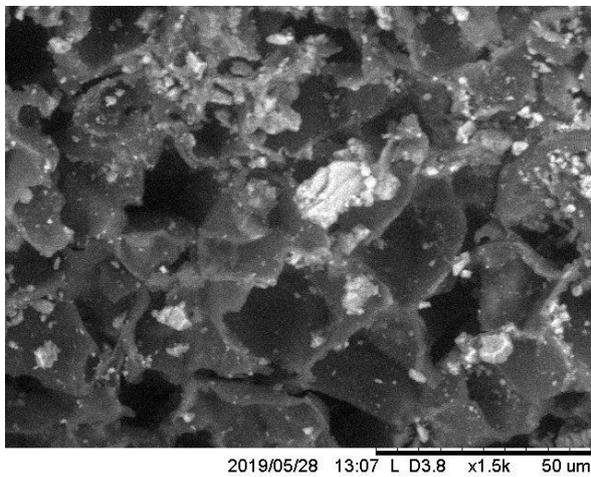
### 4.3.2. Microstructure

Pour pouvoir mieux comprendre les changements qui se sont opérés manifestés au niveau microscopique des granulats de liège traités, un passage au MEB nous permet une lecture de la microstructure de ces granulats (voir figures 4.1 à 4.6). Les résultats présentés dans ces figures montrent clairement l'existence d'un changement remarquable de la morphologie des granulats de liège après l'application des différents traitements. Suivant les traitements, cette structure peut être décrite comme suit :

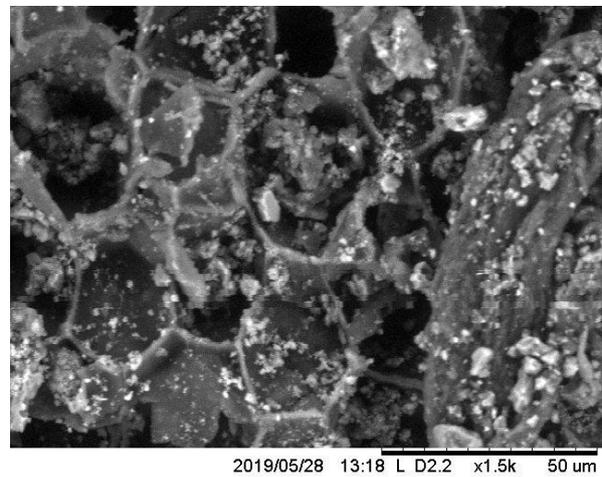
- **Liège non traité** : Dans ce cas, la structure morphologique visualisée ressemble à un nid d'abeille, et montre une grande cohérence avec les données de la littérature. L'une des remarques importantes relevées est la présence d'une fissure au niveau du granulat qui peut être expliquée par la grande variation dimensionnelle du granulat de liège non traité.
- **Hornification** : La forme géométrique des cellules est légèrement modifiée par rapport à celle enregistrée dans le cas du liège non traité. Elle est toujours polygonale. Aucune fissure n'est apparente cette fois. Ceci est peut-être dû au fait que l'exposition à des cycles d'immersion/séchage réduit considérablement les variations dimensionnelles au niveau des granulats (Fereira et coll, 2015).
- **Ebullition** : En appliquant ce traitement, nous avons remarqué que les cellules ont gardé leur forme géométrique polygonale.
- **Ethanol** : La forme géométrique obtenue après le traitement à l'éthanol est fortement modifiée par rapport au cas du liège non traité. Les cellules ont perdu leur forme polygonale. Ce résultat est expliqué par le fait que l'extraction des matières qui peuvent nuire à l'hydratation du ciment (hémicellulose et composés extractives) a été accompagnée par une libération des matières structurales tel que la lignine. La surface

des granulats de liège après traitement par éthanol est aussi améliorée : elle est devenue plus nette.

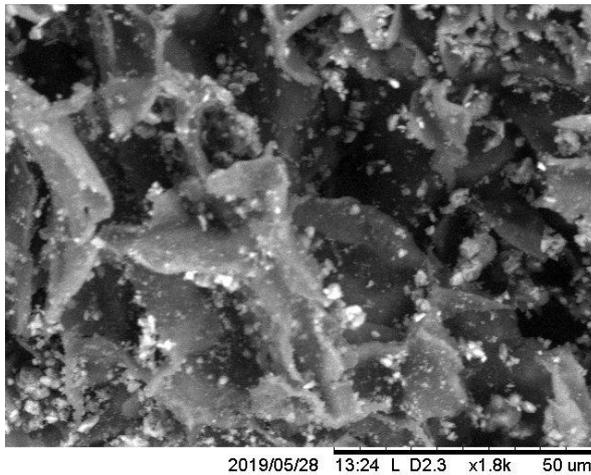
- Ca(OH)<sub>2</sub> : Dans ce cas, nous avons remarqué que la morphologie des granulats de liège a été complètement modifiée. L'extraction des composés celluloseux a engendré aussi une extraction des composés structurels qui, en se basant sur l'investigation olfactive peuvent être des subérines.
- NaOH : Le traitement à l'aide de la soude a aussi conduit à la déformation totale de la structure cellulaire du liège. Contrairement au traitement à la chaux, où on a remarqué des dépôts uniformes de particules de calcium sur la surface du liège, le traitement à la soude (NaOH) a provoqué des dépôts ponctuels au niveau de la surface des particules.



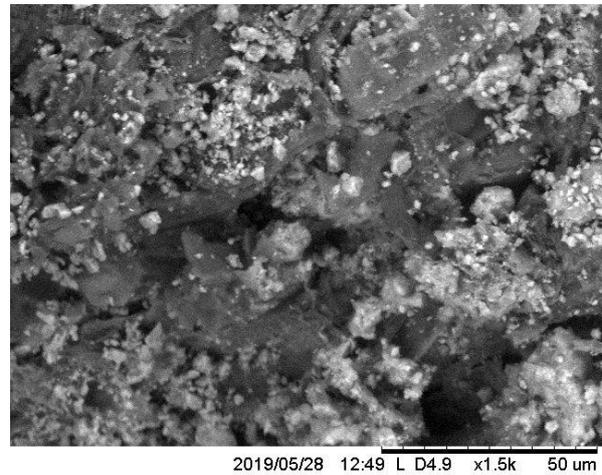
**Figure 4.1.** Liège traité par Hornification



**Figure 4.2.** Liège traité par Ebullition



**Figure 4.3.** Liège traité par l'Ethanol



**Figure 4.4.** Liège traité par NaOH

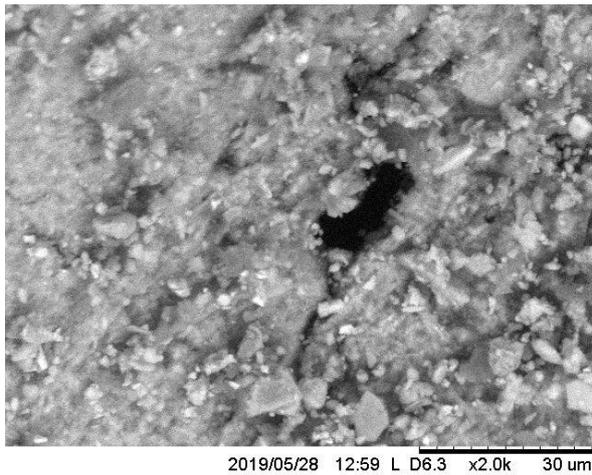


Figure 4.5. Liège traité par  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

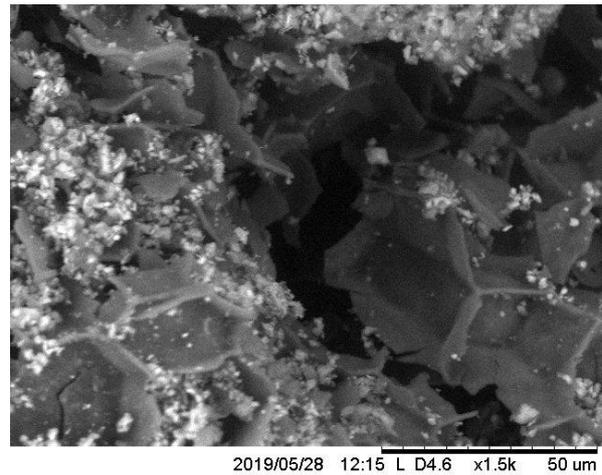


Figure 4.6. Liège non-traité

#### 4.4. Effet sur les propriétés des bétons de liège

##### 4.4.1. Affaissement

L'effet du traitement des granulats de liège sur les valeurs de l'affaissement du béton de liège est présenté dans la figure 4.7. L'analyse des résultats obtenus montre qu'à l'exception du traitement par ébullition, la totalité des traitements appliqués conduisent à une augmentation au niveau de l'affaissement du béton de liège par rapport au béton témoin. L'augmentation de l'affaissement dans le cas des traitements à l'aide de l'hornification et NaOH est modérée (4.6 et 6,2%) et les bétons dans ces cas sont restés dans la classe des bétons mous. Cependant, les bétons à base de granulats traités par l'éthanol et la chaux sont des bétons qui appartiennent à la gamme des bétons fluides. Ils présentent des hausses respectives de 22.1 et 14.2% par rapport au béton de référence. Ces résultats peuvent être expliqués par les améliorations enregistrées au niveau des surfaces des granulats traités à l'aide de l'éthanol et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Quant au béton formulé à partir des granulats bouillis, la maniabilité présente une diminution de 4.1% par rapport au béton témoin, tout en restant dans la gamme des bétons mous.

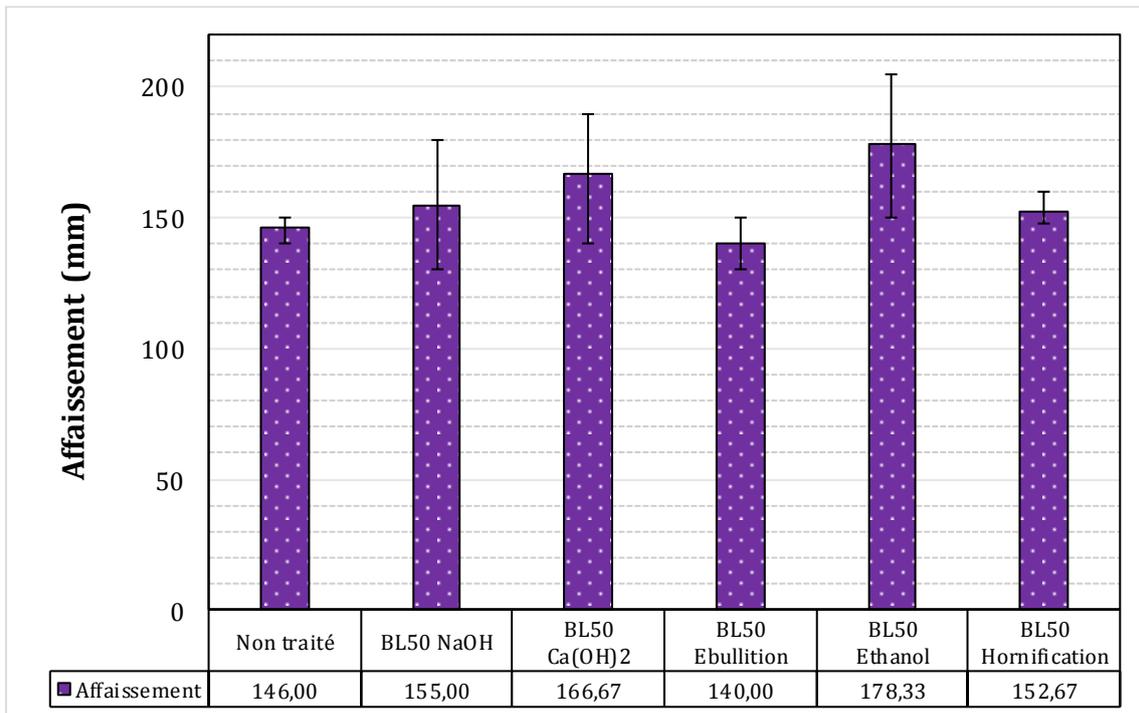


Figure 4.7. Affaissement des bétons de liège.

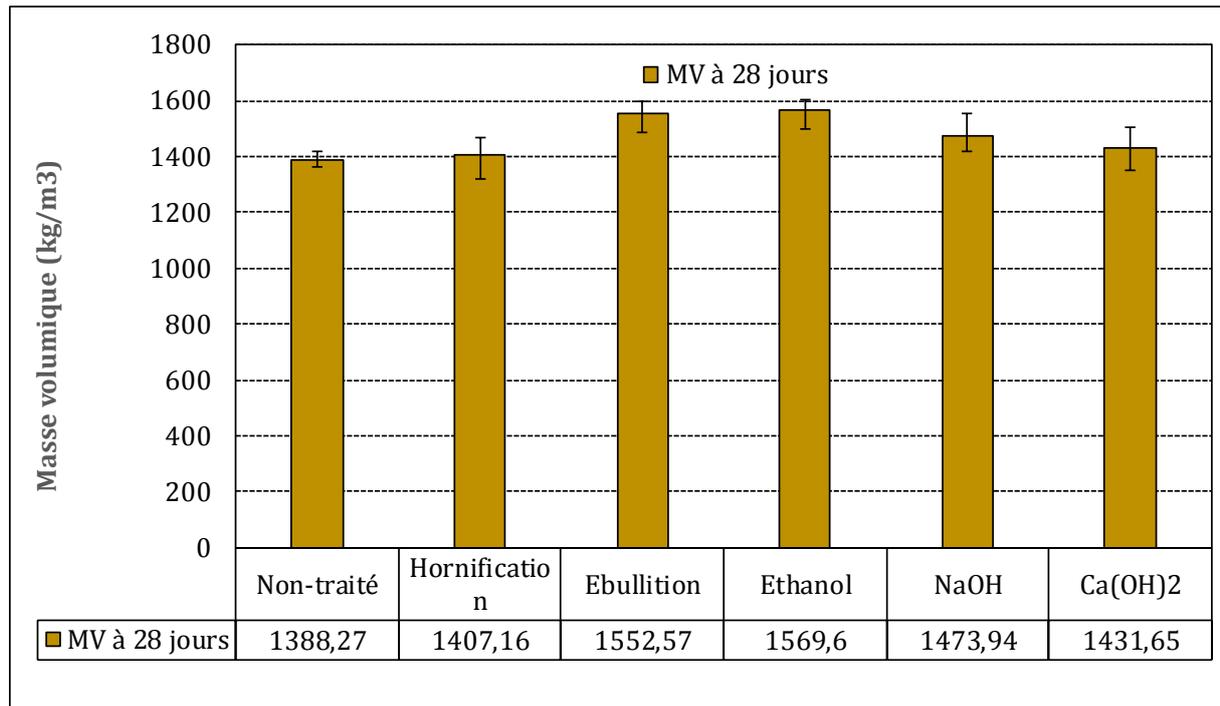
## 4.4.2. Propriétés physiques

### 4.4.2.1. Masse volumique

La figure 4.8 présente la variation des masses volumiques des bétons de liège à 28 jours, en fonction des traitements appliqués aux particules de liège, préalable à leur incorporation dans le béton. Il est à noter que tous les traitements que nous avons appliqués ont engendré une augmentation au niveau de la masse volumique du béton.

Les résultats obtenus montrent clairement que les bétons à base de granulats traités par ébullition et éthanol présentent les plus grandes masses volumiques. Ces masses volumiques dépassent de 11.8 et 13.1 % celle obtenue pour le béton de granulats non-traités. Les différences enregistrées étaient respectivement de 1.4, 3.1 et 6.1% pour des traitements par hornification, Ca(OH)<sub>2</sub> et NaOH.

Les résultats des masse volumiques obtenues pour le béton concordent bien avec ceux obtenus pour les granulats de liège seuls où les traitements à l'ébullition et l'éthanol ont donné les diminutions les plus faibles.



**Figure 4.8.** Masse volumique des bétons de liège à 28 jours.

Le suivi de l'évaluation des masses volumiques pour les différents bétons à 1, 7, 14, 21 et 28 jours a été aussi effectué dans la cadre de cette campagne expérimentale. Les résultats sont présentés dans la figure 4.9 sous forme de rapport entre la masse volumique à l'instant (t) et la masse volumique initiale. Ce rapport présente une allure progressive entre le premier et le 14<sup>ème</sup> jour pour tous les bétons, évolution logique puisque ces bétons sont immergés dans l'eau pendant cette période. À 14 jours, la plus grande valeur a été enregistrée pour le béton contenant des granulats non traités. Les courbes obtenues montrent aussi que ce rapport prend un chemin inverse et tend à diminuer entre 14 et 28 jours. Les rapports obtenus l'âge de 28 jours indiquent que ce rapport présente sa valeur la plus élevée pour un traitement par Ca(OH)<sub>2</sub>. Pour les traitements à l'aide de l'ébullition, Ca(OH)<sub>2</sub>, et NaOH ce rapport dépasse l'unité, ce qui indique que le béton a gardé une partie de l'eau absorbée pendant sa cure. En revanche, les bétons incorporant des granulats non traités ou même traités par hornification ou éthanol présente des rapports qui sont inférieures à l'unité.

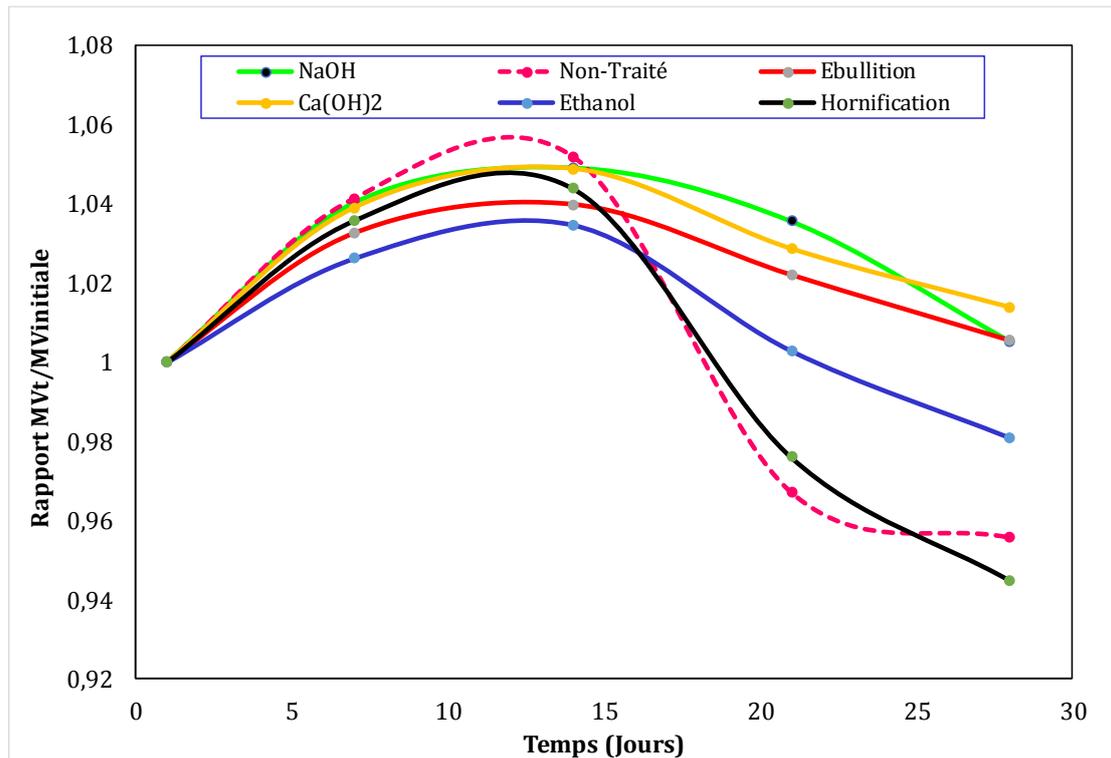
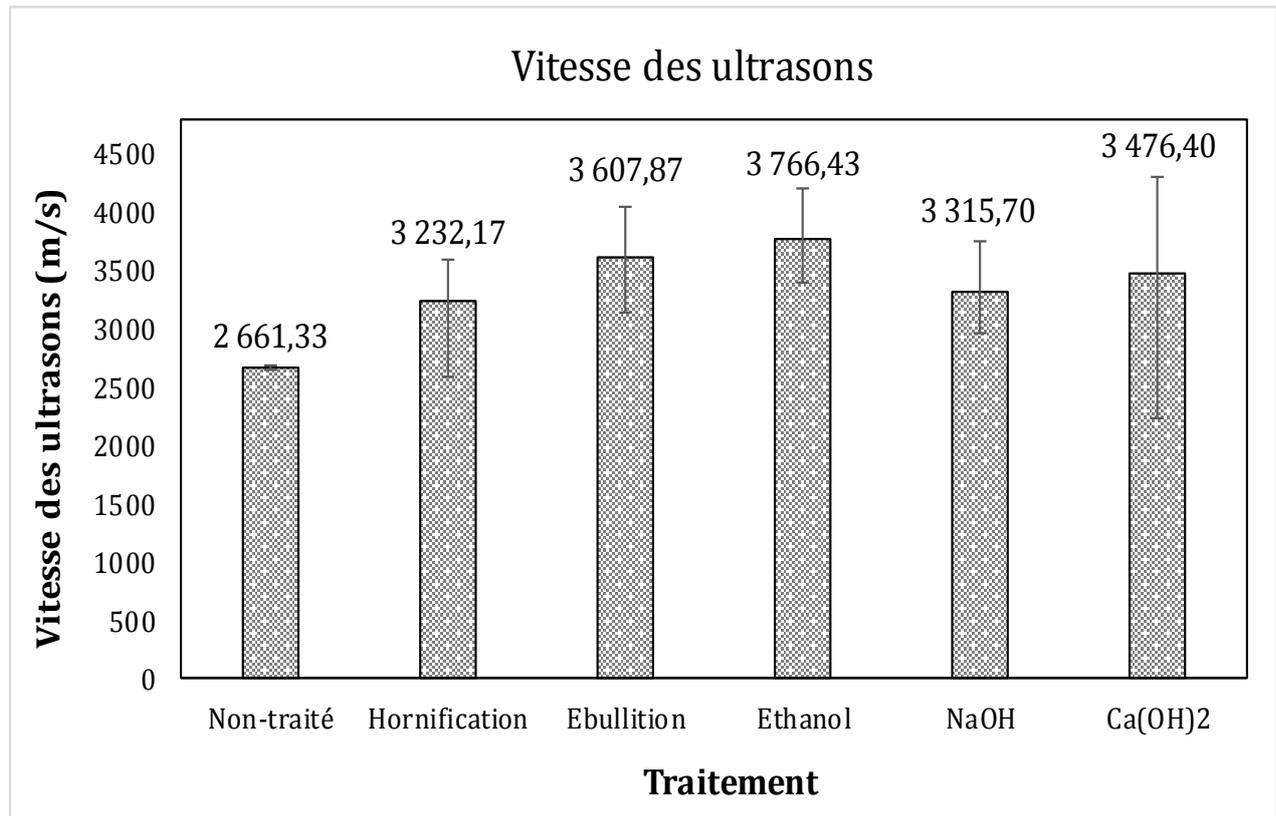


Figure 4.9. Masse volumique des bétons de liège à différents âges.

#### 4.4.2.2. Vitesse des ultrasons

La figure 4.10 illustre la variation de la vitesse des ultrasons des bétons de liège en fonction des traitements appliqués. Les résultats trouvés montrent que les vitesses des ultrasons des bétons à base des granulats traités sont nettement supérieures à celle des bétons contenant des granulats non traités. Néanmoins, l'augmentation enregistrée diffère en allant d'un traitement à un autre. La plus grande valeur a été relevée pour un traitement par l'éthanol et est de l'ordre de 3766,43m/s. Cette valeur est plus grande respectivement de 4.4, 8.3, 13.6, 16.5 et 41.5% par rapport aux bétons contenant des granulats traités par ébullition, NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, Hornification et non traités.

Les augmentations de la vitesse ultrasonore au niveau des bétons traités par rapport au béton de référence peuvent être justifiées par le changement qui s'est opéré au niveau de la microstructure des granulats traités, tandis que les différences enregistrées entre les valeurs des bétons pour différents traitements sont principalement associées à la différence de masse volumiques entre les granulats après application des traitements.



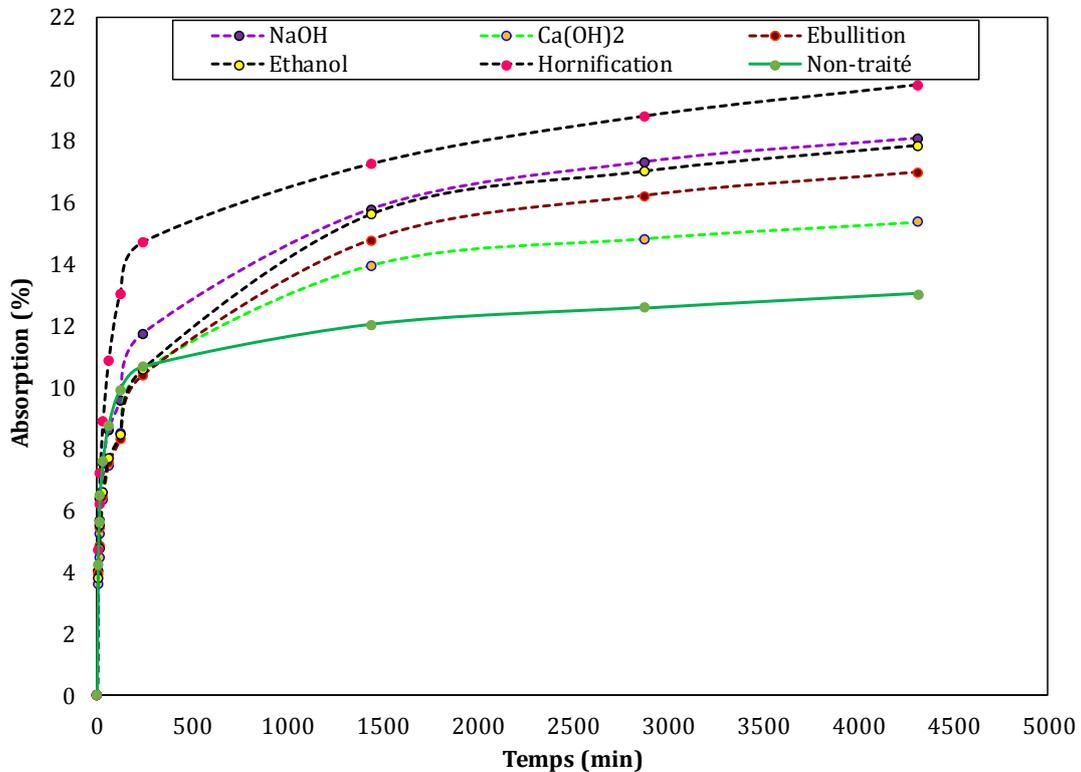
**Figure 4.10.** Vitesses des ultrasons des bétons de liège traité.

#### 4.4.2.3. Absorption

L'absorption par immersion totale des bétons de liège pour différents traitements est illustrée dans la figure 4.11 et le Tableau 4.3. Les courbes d'absorption obtenues commencent par une partie linéairement progressive pendant les premières quatre heures. L'absorption, pendant cette période atteint plus de 60% de sa valeur maximale. Après ce seuil, l'évolution est linéaire mais moins pentue et tend à se stabiliser après 48 heures. Il convient de noter que les absorptions des bétons de liège varient entre 13 et 19.9%. Les résultats indiquent que tous les traitements appliqués conduisent à une augmentation remarquable de l'absorption. La plus grande valeur a été obtenue pour un béton à base de granulats traités par Hornification (19,81) tandis que la plus basse a été constatée dans le cas du béton de granulats non traité (13,04). Les augmentations obtenues sont de l'ordre de 51.9, 38,6, 36.6, 30.1 et 17.8% quand les granulats sont respectivement traités par Hornification, NaOH, Ethanol, Ebullition et Ca(OH)<sub>2</sub>.

**Tableau 4.3.** Absorption des bétons de liège pour différents traitements.

| Temps (min) | Non traité | Hornification | Ebullition | Ethanol | NaOH  | Ca(OH) <sub>2</sub> |
|-------------|------------|---------------|------------|---------|-------|---------------------|
| 0           | 0          | 0,00          | 0,00       | 0,00    | 0,00  | 0,00                |
| 5           | 4,26       | 4,70          | 3,95       | 3,83    | 4,06  | 3,60                |
| 10          | 5,61       | 6,23          | 4,87       | 4,77    | 5,69  | 4,49                |
| 15          | 6,51       | 7,21          | 5,44       | 5,54    | 6,39  | 5,25                |
| 30          | 7,62       | 8,88          | 6,44       | 6,60    | 7,57  | 6,33                |
| 60          | 8,77       | 10,85         | 7,53       | 7,70    | 8,63  | 7,48                |
| 120         | 9,90       | 13,03         | 8,32       | 8,47    | 9,57  | 8,53                |
| 240         | 10,66      | 14,70         | 10,40      | 10,59   | 11,75 | 10,54               |
| 1440        | 12,03      | 17,24         | 14,77      | 15,61   | 15,77 | 13,96               |
| 1880        | 12,58      | 18,79         | 16,21      | 17,00   | 17,30 | 14,82               |
| 4320        | 13,04      | 19,81         | 16,97      | 17,84   | 18,07 | 15,36               |



**Figure 4.11.** Absorption des bétons de liège

### 4.4.3. Propriétés mécaniques

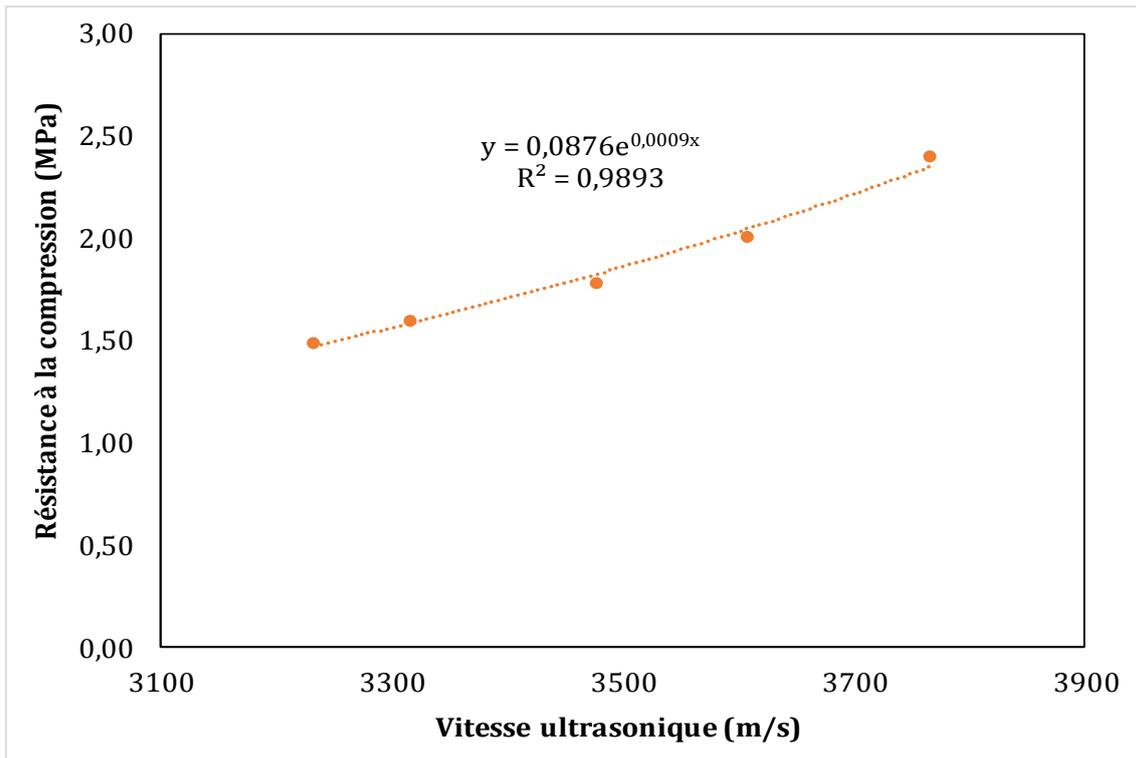
#### 4.4.3.1. Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression en fonction de la vitesse des ultrasons, pour les différents bétons fabriqués sont résumés dans la figure 4.12. Au regard des résultats obtenus, on peut remarquer que la résistance à la compression des bétons de liège est proportionnelle à la vitesse des ultrasons.

Il est aussi très utile de noter que la plus grande valeur a été enregistrée pour le traitement à l'aide de l'éthanol (2.4 MPa) ; elle présente une augmentation de 34.8% par rapport à la résistance du béton de liège non-traité (voir Tableau 4.4). À l'exception des traitements par l'Éthanol et par ébullition, tous les traitements ont engendré une chute au niveau de la résistance à la compression. Cette diminution était maximale dans le cas du traitement par Hornification et est de l'ordre de 16.3%. Les augmentations remarquées peuvent être interprétées, d'une part, par l'élimination des matières qui peuvent nuire à l'hydratation du ciment et d'autre part par l'amélioration de la surface des granulats de liège (remarquée dans le cas du traitement par l'éthanol). En revanche, les diminutions de la résistance à la compression peuvent être expliquées par le fait que l'élimination des composés extractives a été accompagné d'une forte libération des composés structurels (subérine et lignine), ce qui a engendré la rupture de la structure morphologique du liège et donc a conduit à une diminution des résistances à la compression des composites.

**Tableau 4.4.** Valeurs des résistances à la compression à 28 jours des bétons testés en MPa.

| Traitement                  | Non-traité | NaOH | Ebullition | Ca(OH) <sub>2</sub> | Ethanol | Hornification |
|-----------------------------|------------|------|------------|---------------------|---------|---------------|
| Résistance à la compression | 1,78       | 1,78 | 2,01       | 1,60                | 2,40    | 1,49          |



**Figure 4.12.** Résistance à la compression en fonction de la vitesse des ultrasons.

#### 4.4.3.2. Résistance à la traction par flexion

La figure 4.13 présente les résultats de la résistance à la flexion des bétons confectionnés en fonction des traitements appliqués aux particules de liège. Comme l'indique cette figure, l'application des traitements des granulats de liège conduit à la diminution des résistances à la flexion des bétons. Ce constat a été remarqué pour tous les traitements que nous avons appliqués.

Les diminutions enregistrées au niveau de la résistance à la flexion peuvent être expliquées par la modification de la structure morphologique des granulats de liège en appliquant différents traitements. En revanche, les divergences entre les résistances des bétons de granulats traités sont associées à la modification de la surface des granulats, cette dernière a montré les meilleures performances pour les traitements à l'Ethanol et la chaux.

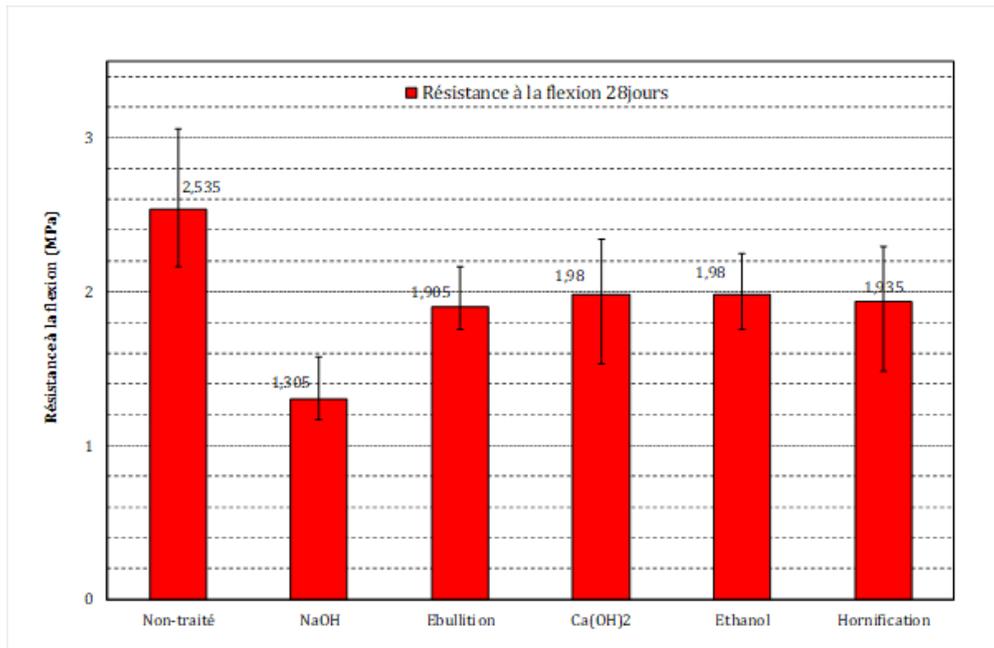


Figure 4.13. Résistance à la flexion pour les bétons de liège.

#### 4.4.3.3. Courbes de capacité

La figure 4.14 affiche les courbes de capacités (contrainte-déformation), qui définissent le comportement des bétons de liège fabriqués, en fonction des traitements qui leur correspondent. L'analyse de ces résultats montrent que la totalité des courbes tracées commencent par une partie dont l'augmentation de la contrainte se fait de façon linéaire avec l'augmentation de la déformation, c'est la partie élastique. Le point qui définit la fin de cette partie est connu sous le nom de la limite d'élasticité. Ce point a une abscisse (déformation) qui est presque égale pour la majorité des courbes quelque soit le traitement appliqué. Cependant, les valeurs ordonnées qui leur correspondent diffèrent en allant d'une courbe à une autre et donc, d'un traitement à un autre. Cela indique que le traitement influe directement sur la valeur du module d'élasticité des bétons. Après la partie élastique, les courbes obtenues présentent des comportements différents. Celles relatives au traitement par Ethanol et par Ebullition montrent une diminution brusque au niveau des contraintes, indiquant ainsi la rupture suite à un comportement fragile. En revanche, celles qui correspondent au traitement par Hornification, NaOH et Ca(OH)<sub>2</sub> montrent l'existence d'un palier où la déformation augmente mais la contrainte reste presque constante, c'est le palier de plasticité. Ces résultats montrent donc que ces traitements offrent aux bétons un comportement ductile. Cette ductilité a montré sa valeur maximale pour un traitement à l'aide de Ca(OH)<sub>2</sub>.

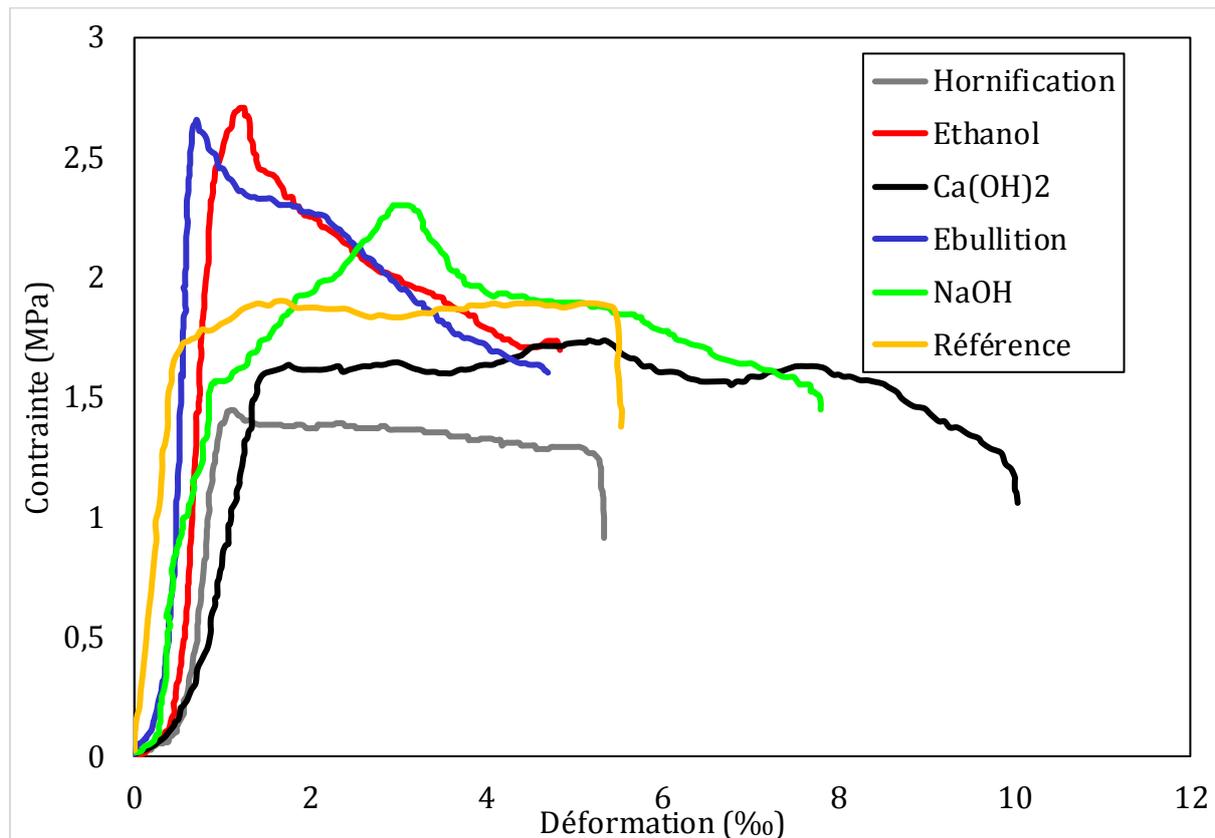


Figure 4.14. Courbes de capacité des différents bétons de liège.

#### 4.4.4. Conductivité thermique

La variation de la conductivité thermique des bétons de liège en fonction des différents traitements est montrée par la figure 4.15. Chaque valeur tracée représente la moyenne de deux valeurs. Les résultats obtenus montrent que le traitement des granulats avant leur incorporation affecte considérablement la conductivité thermique des bétons de liège. Les valeurs de cette conductivité varient entre 0.33 et 0.66 W/m.°K. A l'exception du traitement à l'éthanol, tous les traitements que nous avons appliqués ont engendré une diminution au niveau de la conductivité thermique. Ces diminutions sont de l'ordre de 14.8, 22.1 et 42 % pour les bétons traités à Hornification, NaOH et Ca(OH)<sub>2</sub>. A l'opposé, l'augmentation obtenue en utilisant un traitement par Ethanol est de 14.3%. Il est important de noter que le traitement des granulats de liège a conduit à la production de bétons qui présentent des conductivités thermiques très encourageantes qui permettent au béton d'être utilisé comme matériau d'isolation par excellence dans de multiples applications de bâtiments (Mur, chapes, sols...).

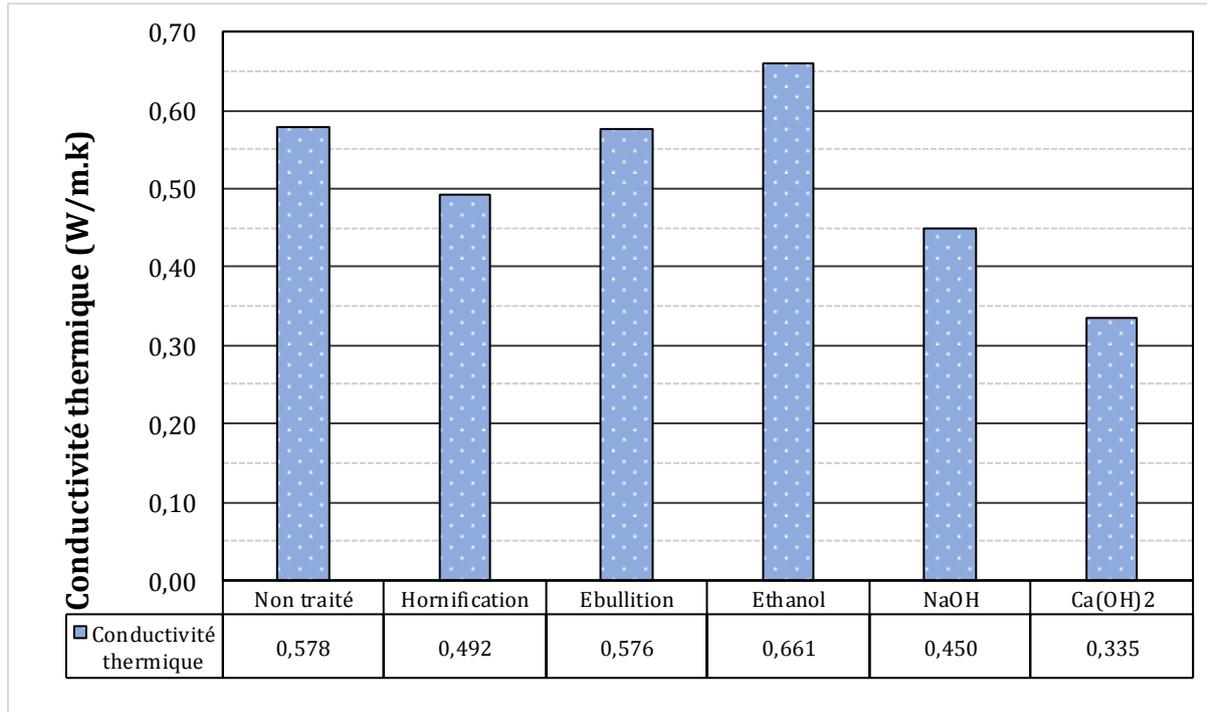


Figure 4.15. Conductivité thermique des bétons de liège.

La figure 4.16 montre l'évolution de la conductivité thermique des bétons fabriqués en fonction de leurs masses volumiques. Cette figure montre clairement qu'il existe une relation quasi linéaire entre les deux paramètres. Ce constat est expliqué par le fait que plus le matériau est léger, plus sa conductivité thermique est faible et plus il est isolant.

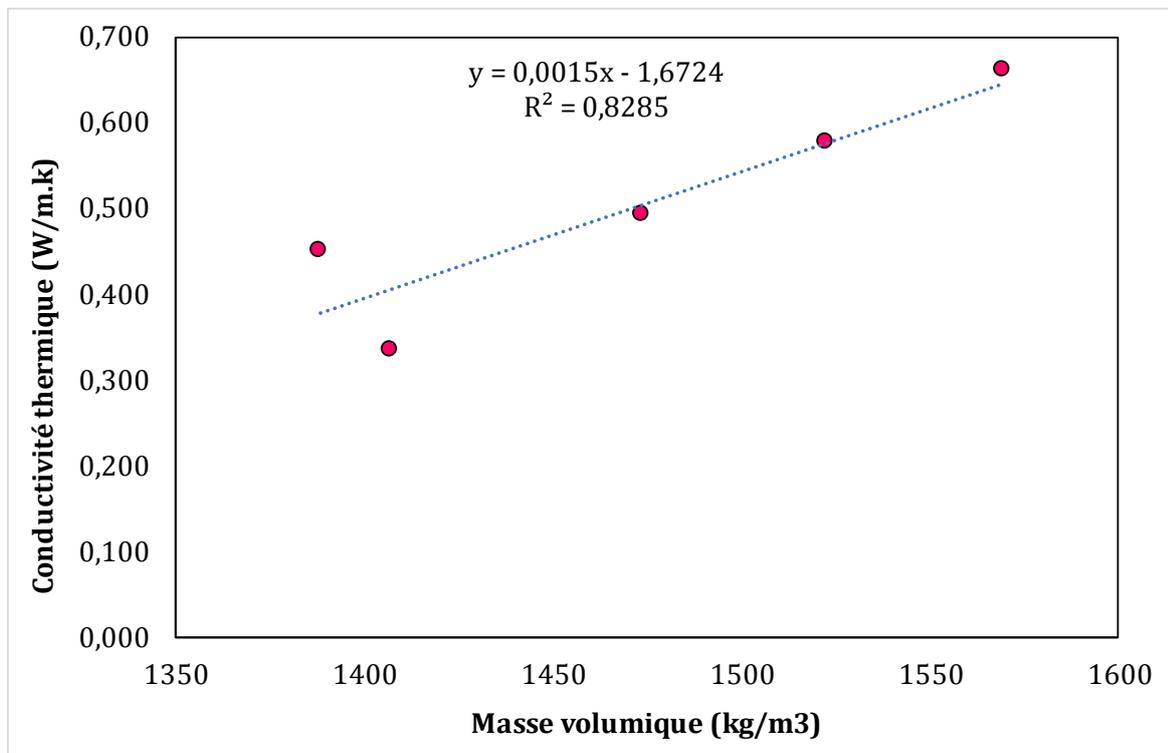


Figure 4.16. Relation entre la conductivité thermique du béton et sa masse volumique

## 4.5. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une évaluation de l'apport du prétraitement des granulats végétaux sur les propriétés d'un béton de liège. Les granulats de liège ont été traités en utilisant cinq différents traitements : par Hornification, Ebullition, Ethanol, NaOH et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Dans un premier temps, les propriétés des granulats de liège ainsi que leur microstructure après traitement ont été évaluées. Ensuite, les propriétés physiques, mécaniques, ainsi que la conductivité thermique des bétons ont été mesurées.

Les résultats que nous avons obtenus ont montré l'impact du prétraitement sur les propriétés des granulats ainsi que sur les performances des bétons.

Les différents traitements que nous avons appliqués ont conduit à une diminution de la masse volumique des granulats de liège, élimination de quelques composés chimiques et des modifications remarquables au niveau de la structure morphologique des granulats.

Les traitements à l'aide de l'Ethanol et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  permettent de passer d'un béton à consistance molle à un béton fluide.

La totalité des traitements utilisés ont engendré une augmentation de la masse volumique, la vitesse des ultrasons ainsi que l'absorption en eau des bétons de liège.

Les bétons fabriqués à base de granulats traités par Ebullition et Ethanol présentent des résistances à la compression meilleures que celles des bétons contenant des granulats non-traités. À l'exception du traitement par l'Ethanol, la totalité des traitements utilisés ont conduit à une diminution de la conductivité thermique des bétons de liège.

Pour résumer, le Tableau 4.5 regroupe l'impact des différents traitements sur les performances du béton de liège : Un émoticône vert signifie une bonne performance, un émoticône jaune indique une performance moyenne, tandis qu'un émoticône rouge veut dire : performance compromise. En se basant sur les résultats trouvés dans ce travail, on peut donc conclure que le traitement à la chaux offre les meilleures performances et peut donc être choisi pour la suite des travaux sur ce béton de liège.

**Tableau 4.5.** Influence des traitements sur les différentes performances du béton de liège.

| Propriétés                              | Non-traité | Hornification  | Ebullition   | Ethanol   | NaOH   | Ca(OH) <sub>2</sub>  |
|---|------------|--|--|---|--|--|
| Maniabilité<br>(mm)                     | 146        | <br>152,67  | <br>140,00  | <br>178,33  | <br>155,00  | <br>166,67  |
| Masse volumique<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 1388,27    | <br>1407,16 | <br>1552,57 | <br>1569,6  | <br>1473,94 | <br>1431,65 |
| Absorption<br>(%)                       | 13,04      | <br>19,81   | <br>16,97   | <br>17,44   | <br>18,07   | <br>15,36   |
| Résistance à la compression<br>(Mpa)    | 1,78       | <br>1,49  | <br>2,01  | <br>2,40  | <br>1,78  | <br>1,60  |
| Résistance à la flexion<br>(Mpa)        | 2,535      | <br>1,935 | <br>1,905 | <br>1,980 | <br>1,305 | <br>1,980 |
| Ductilité                               | -          | <br>-     | <br>-     | <br>-     | <br>-     | <br>-     |
| Conductivité thermique<br>(W/m.K)       | 0,578      | <br>0,492 | <br>0,576 | <br>0,661 | <br>0,450 | <br>0,335 |

## Conclusion générale et perspectives

Dans ce manuscrit, une évaluation de l'apport du prétraitement des granulats de liège a été réalisée. Le béton de liège utilisé dans le programme expérimental réalisé a été formulé en effectuant, en volume, une substitution de la moitié des granulats minéraux par son équivalent en granulats de liège. Cinq bétons contenant des granulats de liège traités par Hornification, Ebullition, Ethanol, NaOH ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ont été fabriqués. La masse volumique des granulats de liège traités ainsi que leur évolution microstructurale ont été évalués dans un premier temps. Une fois fabriqués et durcis, l'affaissement, les propriétés physiques (Masse volumique, Vitesse ultrasonique et absorption), mécanique (Résistance à compression et à la flexion) ainsi que la conductivité thermique des bétons ont été évalués. Les principales conclusions tirées à l'issue de cette étude sont les suivantes :

- Le traitement des granulats de liège engendre une diminution de leur masse volumique, un changement au niveau de leur composition chimique et une modification remarquable de leur structure morphologique.
- Le béton composé à base de granulats non-traités est un béton à consistance plastique. Cependant ceux fabriqués à base de granulats traités par Ethanol ou Ebullition sont des bétons à consistance fluide.
- Par rapport celles des bétons de granulats non-traité, les bétons contenant des granulats traités présentent des masses volumiques, des vitesses ultrasoniques et des absorptions supérieures.
- Les traitements à l'aide de l'Ebullition et l'Ethanol conduisent à une augmentation de la résistance à la compression. Cependant, les autres traitements conduisent à une chute au niveau des résistances à la compression.
- La totalité des traitements utilisés conduit à la diminution des résistances à la flexion des bétons de liège
- Les traitements à l'aide d'une Hornification, NaOH ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  offrent des bétons ductiles tandis que l'application des autres traitement engendrent des bétons à comportement fragile.
- La conductivité thermique du béton de liège est fortement affectée par le traitement des granulats de liège. Cette dernière varie entre 0.33 et 0.66 W/m.°K et offre au béton de liège (contenant 50% de liège) la possibilité d'être utilisé comme matériau d'isolation.

A l'issu de ce travail, nous avons aussi rendu compte que les pistes suivantes peuvent être envisagées dans nos prochains travaux :

- Extension de l'effet du prétraitement à d'autres bétons de liège contenant différents pourcentages de liège.
- Utilisation de conditions de cure différentes.
- Utilisation d'autres traitements plus économiques tel que les déchets minéraux.

## Références bibliographiques

### Articles et communications

- Achour, A., Ghomari, F., & Belayachi, N. (2017).** Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(17), 1938-1962. doi: 10.1080/01694243.2017.1290572
- 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
- Bederina, M., Laidoudi, B., Gouilleux, A., Khenfer, M. M., Bali, A., & Quéneudéc, M. (2009).** Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1311-1315. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.029
- Cabral, M. R., Nakanishi, E. Y., dos Santos, V., Palacios, J. H., Godbout, S., Savastano Junior, H., & Fiorelli, J. (2018).** Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1092-1102. doi: 10.1016/j.acme.2018.02.012
- Diana Ü.-V., Aleksandra N. (2008).** Potentials and cost of carbon dioxide mitigation in the world's buildings. *Energy Policy*, vol. 36, 642 – 661.
- Ferreira, S. R., Silva, F. d. A., Lima, P. R. L., & Toledo Filho, R. D. (2015).** Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. *Construction and Building Materials*, 101, 730-740. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120
- Gil, L. (2009).** Cork Composites: A Review. *Materials*, 2(3), 776-789. doi: 10.3390/ma2030776
- Gil, L. (2015).** New Cork-Based Materials and Applications. [Review]. *Materials (Basel)*, 8(2), 625-637. doi: 10.3390/ma8020625
- 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)
- Laoud, B. (2013).** Caractérisation mécanique et physique d'un béton léger à base de sable calcaire et des granulats de liège. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. Vol. 3 No. 3. 739-748.

- Maalouf, C., Boussetoua H., Moussa T., Lachi M., Belhamri A. (2015).** Experimental and numerical investigation of the Hygrothermal behaviour of cork concrete panels in north Algeria. *14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, 7-9.*
- Rosa, M. E., Fortes, M. A. (1991).** *J. Mater. Sci.* 26, 341–348.
- Sellami, A., Merzoud, M., & Amziane, S. (2013).** Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. *Construction and Building Materials*, 47, 1117-1124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>.
- Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., & Reis, R. L. (2005).** Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, 50(6), 345-365. doi: 10.1179/174328005x41168
- Tedjdti A.K., Ghomari F., Taleb O., Bouhraoua R.T., Dib M.R., Amara A. (2018).** Evaluation 10 of the mixing mode effect on properties of cork concrete. Séminaire International 11 de Génie Civil, Oran, Algeria.
- 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 lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 452-460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.155
- Ziregue, A., Khenfer, M. M., Quéneudec-t’Kint, M., & Montrelay, N. (2016).** Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(9), 934-946. doi: 10.1080/01694243.2015.1129882

### **Thèses et mémoires**

- 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.
- Benhalilou, K. (2008).** Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment cas du climat semi-aride. Mémoire de magistère en architecture bioclimatique. Université de Constantine, Algérie. 263 pages.

- Cérézo, 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 National des travaux publics de L'Etat, Lyon, France, 225 pages.
- Chabannes, M. (2015).** *Design and mechanical properties of lightweight insulating bio-based concretes using rice husk and hemp hurd for green building.* Thèse de doctorat. Matériaux composites et construction. Université Montpellier, France, 226 pages.
- Chamoïn, J. (2015).** 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.
- Gourlay E., and Arnaud L. (2011).** Des matières premières au béton de chanvre : optimisation des propriétés thermiques et mécaniques, 20ème Congrès Français de Mécanique, pp. 1–6.
- Nozahic, V. (2012).** *Towards a new approach to the design of lignocellulosic plant concretes based on understanding and improving the binder / plant interface : application to chenevot and sunflower stem aggregates combined with a pumice / lime binder.* Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont II, France, 334 pages.
- Sotehi, N. (2010).** Caractéristique thermique des parois de bâtiments et amélioration de l'isolation. Thèse de doctorat. Universités Mentouri, Constantine, Algérie, 157 pages.
- 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.

## Normes

- AFPC-AFREM (2007).** Durabilité des bétons « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité ».
- NF P18-558 (Décembre 1981).** Granulats. Détermination de la masse volumique absolue des fines.
- BS EN 1097-3 (Avril 1998).** Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids.
- BS EN 12504-4 (Octobre 2004).** Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.
- ASTM C 1585-06 (Juillet 2006).** Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

- ASTM C 1585-04 (Décembre 2007).** Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes.
- BS EN 12390-3 (Février 2009).** Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.
- BS EN 12390-5 (Février 2009).** Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens.
- BS EN 12350-2 (Mars 2009).** Testing fresh concrete - Part 2: Slump-test.
- BS EN 12390-7 (Mai 2009).** Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete.
- BS EN 933-1 (Janvier 2012).** Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.
- BS EN 1097-6 (Juillet 2012).** Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption.

### **Ouvrages et rapports**

- ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (2018).** Isoler sa maison. Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE). Consommation énergétique finale de l'Algérie. 2015.
- Béguin, D. (2006).** Guide de l'éco construction, Imprimis communication. 2006.
- International Energy Agency (IEA).** Key World Energy Statistics. 2018.
- International Energy Agency (IEA).** Key World Energy Statistics. 2017.
- Jayr, E. (2010).** Nouvelles matières premières d'origine animale ou végétale pour la construction. Technical report, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).
- Pereira, H. (2007).** Cork: Biology, production and uses. Elsevier.
- Rapport Brundtland – Notre avenir à tous.** « Commission mondiale sur l'environnement et le développement ». Présidée par Gro Harlem Brundtland, 1987.
- World Wildlife Fund. Living planet report.** Technical report. World Wildlife Fund. 2010.

### **Sites web**

<https://www.zephirenr.com/essentiel-023/>. Dernière consultation : le 15/06/2019.

## Résumé

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons conduit au laboratoire EOLE, l'étude à la fois de l'influence du prétraitement des granulats de liège sur leurs propriétés intrinsèques ainsi que sur l'affaissement, les propriétés physiques (masses volumiques, vitesse ultrasonore et absorption en eau), mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) et thermiques (conductivité thermique) du béton de liège. Le squelette granulaire de ce dernier est composé de 50 % de granulats de liège.

Le prétraitement des granulats de liège avant leur incorporation dans le béton, est réalisé grâce à cinq méthodes : Hornification, Ebullition, Ethanol, NaOH et Ca(OH)<sub>2</sub>. Les résultats obtenus ont montré que le traitement des granulats de liège amène la diminution de leur masse volumique et une modification importante au niveau de leur structure morphologique. En revanche, pour les bétons, les prétraitements des granulats de liège à l'aide de l'éthanol et l'ébullition améliorent l'affaissement du béton. Aussi, ces prétraitements conduisent à l'augmentation de la masse volumique, de la vitesse ultrasonore et l'absorption en eau des bétons de liège. De plus, la majorité de ces traitements conduisent à l'affaiblissement de la résistance à la flexion et la baisse de la conductivité thermique.

### Mots clés

Liège, Béton vert, prétraitement, propriétés physico-mécaniques, conductivité thermique.

### Abstract

In this manuscript, an evaluation of the impact of treatment on properties of cork particles as well as slump, physical properties (density, Ultrasonic velocity and absorption), mechanical properties (compressive and flexural strength) and the thermal conductivity of cork concrete is carried out. The concrete in question contains, in volume of aggregates, 50% of cork granules. Five concretes containing cork granules treated with Hornification, boiling, Ethanol, NaOH and Ca(OH)<sub>2</sub> were prepared. The obtained results showed that the treatment of cork granules results decrease in their density and an important modification in their microstructural morphology. Treatments by using the Ethanol and boiling enhance the slump of cork concrete. All the applied treatments induce an increase in the density, ultrasonic velocity and absorption of concrete. However, most of used treatments decrease the flexural strength and the thermal conductivity of cork concrete.

### Keywords

Cork, green concrete, treatment, physico-mechanical properties, Thermal conductivity.

### ملخص

يهدف العمل المقدم في هذا التقرير إلى تقييم تأثير المعالجة على مختلف خصائص حبيبات الفلين بالإضافة إلى معاينة تأثيرها على الهبوط، الخصائص الفيزيائية (الكتلة الحجمية، سرعة انتقال الصوت والامتصاص)، الخصائص الميكانيكية (مقاومة الانضغاط والانحناء) وكذا الناقلية الحرارية الخاصة بخرسانة الفلين. تحتوي الخرسانة المعنية بالدراسة على 50%، كحجم، من حبيبات الفلين كبديل للحبيبات الكلسية. بغرض الوصول إلى الهدف المنشود، قمنا بصنع خمس خرسانات مختلفة تحتوي على حبيبات فلين معالجة عن طريق: التعريض إلى خمسة دورات من الغمر والتجفيف، التغليف، الإيثانول، هيدروكسيد الصوديوم أو الجير المميه. لقد برهنت النتائج التي تحصلنا عليها أن معالجة حبيبات الفلين تؤدي إلى انخفاض في كتلتها الحجمية وكذا إلى تغيير محسوس على مستوى تركيبها المجهري. إن معالجة حبيبات الفلين عن طريق التغليف أو الإيثانول يحسن هبوط خرسانة الفلين في مخروط أبرامس. لقد أدت جميع المعالجات المختارة إلى ارتفاع في قيم الكتلة الحجمية، سرعة انتقال الصوت وكذا قدرة الخرسانة على الامتصاص. في المقابل، تمكنا من ملاحظة أن أغلبية المعالجات المطبقة أدت إلى تناقص في قيم المقاومة للانحناء وكذا الناقلية الحرارية.

### الكلمات المفتاحية

الفلين، الخرسانة الخضراء، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، المعالجة، الناقلية الحرارية.