

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

Université Amar Téliidji Laghouat  
Faculté de Technologie  
Département d'architecture



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister  
Spécialité : Architecture  
Option : Constructions en environnements arides

## **Thème**

### **Contribution à l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments: Elaboration d'un composite plâtre-bois**

**Présenté par :**  
**Mr KASSOU Younes**

Devant les membres de jury composé de:

Pr. BEDERINA Madani	Professeur	UAT Laghouat	Président
Dr. BENCHEIKH Hamida	MCA	UAT Laghouat	Examineur
Dr. BOUCHAREB Zohra	MCB	UAT Laghouat	Examineur
Pr. KHENFER M <sup>ed</sup> Mouldi	Professeur	UAT Laghouat	Promoteur
Dr. DJOUDI Amina	MCB	UAT Laghouat	Co- Promotrice

**Soutenu publiquement le 16.01.2016**

## Remerciement.

Ce travail que j'ai l'honneur de présenter, a été effectué au laboratoire de recherche de génie civil à l'université AMAR TLIDJI – de Laghouat -

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance et mes remerciements au directeur de ma thèse Monsieur **KHENFER M<sup>ed</sup> Mouldi**, Professeur à l'université de Laghouat, d'avoir proposé et dirigé ce sujet ainsi que son assistance durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Mes sincères remerciements et respects vont également à mon co-promotrice Mademoiselle **DJOUDI Amina**, maître de conférence classe (B) à l'université de Laghouat, pour son acceptation d'encadrement, pour sa contribution dans la réalisation de ce travail, son soutien, ses conseils et sa confiance à mon égard durant toutes les années de ce travail de recherche.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur **BEDERINA Madani**, Professeur à l'université de Laghouat, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Mes plus vifs remerciements vont également à Monsieur **BENCHEIKH Hamida**, Maître de conférence classe (A) à l'université de Laghouat, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame **BOUCHARB Zohra**, Maître de conférence classe (B) à l'université de Laghouat, d'avoir accepté de faire partie de jury de ce mémoire.

J'adresse mes remerciements aux membres de département d'architecture à l'université de Laghouat et en particulier à l'ex-chef de département Mr **MERRAH.A**, et Mr **LAGHOUATIA**, pour leur soutien moral durant toutes les années de ce travail.

Je remercie vivement tous les enseignants qui ont contribué à ma formation architecturale à l'université de Béchar en particulier M<sup>me</sup> **SLIMANI Manel**, et M<sup>me</sup> **BENZIADA Radiah**.

Je profite l'occasion à remercier M<sup>me</sup> **Yasmine TERKI**, directrice du Centre Algérien du Patrimoine Culturel bâti en Terre (CAPTERRE), de m'avoir donné la chance a être un chef de département de la valorisation des architectures de terre, et d'être un aide-animateur au festival international de la promotion des architectures de terre (Archi'Terre-2015), sans oublier tous les fonctionnaires du centre (D.A.M, architectes, ingénieur, attachés de conservation...)

Je remercie également l'architecte Mr **ANSARI Ahmed** gérant de BET Arts-Adrar et son frère l'architecte Mr **ANSARI Mohamed Tidjani**.

Enfin, je désire remercier tous ceux qui n'ont pas été cités dans ces quelques lignes et qui ont contribué de près ou de loin par leur aide au bon déroulement de ce travail.

## **Dédicaces**

A mes très chers parents,  
à mon frère Dada Saïd,  
à mes sœurs,  
à ma grande famille,  
à mon frère Moulay Redouane,  
à tous mes amis.

## Sommaire

<b>Résumés</b>	
<b>Nomenclature</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
 <b>Chapitre I: Recherches bibliographiques</b> 	
<b>I. Introduction.....</b>	<b>03</b>
<b>II. Généralité sur l'isolation thermique.....</b>	<b>03</b>
II.1. Mécanismes d'échange thermique.....	03
II.2. Propriétés thermo-physiques des matériaux.....	05
II.3. L'isolation thermique en architecture.....	09
<b>III. Copeaux de bois.....</b>	<b>15</b>
III.1. Définition.....	15
III.2. Caractéristique chimique.....	15
III.3. Propriétés du bois.....	16
<b>IV. Plâtre.....</b>	<b>18</b>
IV.1. Définition.....	18
IV.2. Principe de fabrication.....	18
IV.3. Caractéristique physico-mécaniques du plâtre.....	20
IV.4. Variétés et normalisations des plâtres.....	24
IV.5. Règlementations du plâtre en Algérie.....	25
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>27</b>
 <b>Chapitre II: Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales</b> 	
<b>I. Introduction.....</b>	<b>28</b>
<b>II. Caractérisation des matériaux utilisés.....</b>	<b>28</b>
II.1. Sable.....	28
II.2. Copeaux de bois.....	32
II.3. Plâtre.....	35
II.4. Eau de gâchage.....	40
<b>III. Techniques de mesure expérimentales.....</b>	<b>41</b>
III.1. Porosité accessible à l'éthanol.....	41
III.2. Variation dimensionnelle.....	41
III.3. Essais mécaniques.....	42
III.4. Mesure des propriétés thermo-physiques.....	43
<b>IV. Conclusion.....</b>	<b>44</b>
 <b>Chapitre III: Formulation et caractérisation physico-mécanique des composites étudiés</b> 	
<b>I. Introduction.....</b>	<b>45</b>
<b>II. Formulation des composites.....</b>	<b>45</b>

<b>III. Mise en œuvre des composites et confection des éprouvettes.....</b>	<b>46</b>
<b>IV. Etude des propriétés physiques.....</b>	<b>48</b>
IV.1. Masse volumique.....	48
IV.2. Porosité.....	53
IV.3. Relation entre la porosité et la masse volumique.....	57
<b>V. Visualisation des surfaces de rupture des composites étudiés par le microscope optique.....</b>	<b>59</b>
<b>VI. Etude des propriétés mécaniques.....</b>	<b>62</b>
VI.1. Résistance à la flexion.....	62
VI.2. Résistance à la compression.....	68
<b>VII. Etude du retrait.....</b>	<b>72</b>
<b>VIII. Conclusion.....</b>	<b>78</b>

### Chapitre IV: Mesure des propriétés thermo-physiques des composites.

<b>I. Introduction.....</b>	<b>80</b>
<b>II. Grandeurs thermiques.....</b>	<b>80</b>
II.1. Conductivité thermique.....	81
II.2. Capacité calorifique.....	82
II.3. Chaleur spécifique.....	83
II.4. Résistance thermique.....	84
<b>III. Etude croisée des propriétés thermo-physiques.....</b>	<b>87</b>
III.1. Relation entre la conductivité thermique et la capacité thermique.....	87
III.2. Relation entre la conductivité thermique et la porosité.....	89
<b>IV. Conclusion.....</b>	<b>91</b>

### Chapitre V: Application théorique par simulation des propriétés thermo-physiques.

<b>I. Introduction.....</b>	<b>92</b>
<b>II. Présentation du logiciel de simulation.....</b>	<b>92</b>
II.1. Description d'EnergyPlus.....	92
II.2. Fichiers d'entrées d'EnergyPlus.....	93
<b>III. Raisons et choix des compositions idéales.....</b>	<b>94</b>
III.1. Description de la cellule.....	94
III.2. Evaluation des propriétés thermo-physiques.....	95
III.3. Choix de la composition optimale.....	97
<b>IV. Améliorations et correction thermique (cas d'été).....</b>	<b>104</b>
IV.1. Diagnostic du cas d'étude.....	104
IV.2. Description des configurations d'améliorations.....	108
IV.3. Evaluation de l'efficacité des configurations proposées.....	109
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>114</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>115</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>118</b>
<b>Annexes</b>	

## Résumé.

Ce mémoire s'inscrit dans la démarche de la réhabilitation thermique des maisons sahariennes habituellement bâtis avec des matériaux dits « étrangers de l'environnement aride ».

Le présent travail est une contribution à l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments par la conception d'un nouveau composite à base de plâtre et copeaux de bois.

Les propriétés physico-mécaniques et thermo-physiques du composite sont influencées par le rapport (**E/P**), le pourcentage en masse des copeaux de bois et la teneur en sable dunaire. Les résultats obtenus montrent que l'ajout du sable dunaire affaiblit les performances thermiques et mécaniques du composite.

La dernière partie de ce travail a été consacrée surtout à l'évaluation de l'efficacité des configurations de la réhabilitation thermique par ce composite, dans les différentes zones climatiques en Algérie (spécialement **E3**, **E4** et **E5**).

**Mots clés :** Plâtre, copeaux de bois, isolation thermique, formulation, résistance mécanique, simulation dynamique.

## Abstract

This study is insured under the step of the thermal rehabilitation of the Saharan building usually built with materials known as "strange of the arid environment".

This work is a contribution to the improvement of the thermal insulation of the building envelope by the design of a new composite based on plaster and shavings.

The composite are influenced by ratio (**E/P**), the percentage in mass of the shavings and the dunes sand. The results show that the addition of dunes sand weakens the thermals and mechanicals performances of the composite.

The last part of this work was devoted especially to the evaluation of the effectiveness of the configurations of the thermal rehabilitation by this composite, in various climatic zones in Algeria (especially **E 3**, **E4** and **E5**).

**Key words:** Plaster, shavings, thermal insulation, formulation, thermo-mechanical resistance, dynamic simulation.

## ملخص

يندرج هذا العمل في إطار إعادة التأهيل الحراري للبيوت الصحراوية المبنية عموما بمواد بناء يقال عنها أنها دخيلة عن البيئة الجافة والحارة.

هذا العمل عبارة عن مساهمة لتحسين العزل الحراري للبنىات عن طريق تصميم مواد بناء جديدة ذات الأساس: الجبس و نشارة الخشب .

إن الخصائص الميكانيكية و الحرارية للمواد المدروسة تتأثر مباشرة بنسبة (الماء/الجبس). نسبة نشارة الخشب نسبة رمل الكثبان. من خلال النتائج المحصل عليها يلاحظ إن زيادة رمل الكثبان يضعف من الخصائص الحرارية و كذا الميكانيكية للتركيب المدروسة .

لقد تم التركيز في الجزء الأخير من هذا العمل على تقييم مدى فعالية مختلف طرائق العزل الحراري المقترحة في إطار هذه الدراسة و ذلك في مختلف المناطق الحرارية القاحلة في الجزائر (**E3**, **E4** و **E5**) .

**كلمات مفتاحيه:** الجبس, نشارة الخشب, العزل الحراري, الصياغة, المقاومة الميكانيكية, محاكاة ديناميكية.

## Nomenclature.

Symboles	Désignations	Unités
$\gamma_s$	Masse volumique absolue.	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho$	Masse volumique apparente.	(kg/m <sup>3</sup> )
$M_f$	Module de finesse.	-
$E_s$	Equivalent de sable.	-
$C_p$	Compacité.	(%)
$P$	Porosité.	(%)
$C_{ab}$	Capacité d'absorption d'eau.	(%)
$A$	Surface spécifique de Blaine.	(cm <sup>3</sup> /g)
$F$	Finesse de mouture.	(%)
$E/P$	Consistance normal du plâtre.	-
$R_f$	Résistance à la flexion.	(MPa)
$R_c$	Résistance à la compression.	(MPa)
$\lambda$	Conductivité thermique.	(W/m.K)
$\rho c$	Capacité thermique.	(KJ/m <sup>3</sup> .K)
$c$	Chaleur spécifique.	(J/kg.K)
$R$	Résistance thermique.	(m <sup>2</sup> .k/W)
$e$	L'épaisseur.	(m)
$a$	Diffusivité thermique.	(m <sup>2</sup> /s)
$b$	Effusivité thermique.	(J/m <sup>2</sup> .k.s <sup>1/2</sup> )
$t$	Temps.	(s)
$f$	Facteur d'amortissement des ondes thermiques.	-
$\emptyset$	Temps de retard des ondes thermiques (déphasage).	(h)
$T_{ae}(\max)$	Température de l'air extérieure max.	(°C)
$T_{ae}(\min)$	Température de l'air extérieure min.	(°C)
$T_{se}(\max)$	Température de surface extérieure max.	(°C)
$T_{se}(\min)$	Température de surface extérieure min.	(°C)
$T_{si}(\max)$	Température de surface intérieure max.	(°C)
$T_{si}(\min)$	Température de surface intérieure min.	(°C)
$Q_{cond}$	Flux de chaleur par conduction.	(W)
$A$	Surface d'échange thermique.	(m <sup>2</sup> )
$\varphi c$	Flux de chaleur par convection.	(W)
$h$	Coefficient d'échange par convection.	(W/m <sup>2</sup> .K)
$Q_{ij}$	Flux de chaleur par rayonnement.	(W)
$\sigma$	Constante de Stéphane Boltzmann. ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ).	(W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )
$F_{ij}$	Facteur de forme entre les surfaces $i$ et $j$ .	-

## Liste des figures

### Chapitre I: Recherche bibliographiques

<b>Figure I.1</b> : Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux du bâtiment.....	<b>05</b>
<b>Figure I.2</b> : Déphasage et l'amplitude de l'onde incidente par une paroi homogène.....	<b>08</b>
<b>Figure I.3</b> : Ensemble des déperditions thermiques d'une maison non isolée.....	<b>09</b>
<b>Figure I.4</b> : Bardage sur ossature double.....	<b>11</b>
<b>Figure I.5</b> : Bardage sur ossature simple.....	<b>11</b>
<b>Figure I.6</b> : Système de vêtiture.....	<b>12</b>
<b>Figure I.7</b> : Système de vêtage.....	<b>12</b>
<b>Figure I.8</b> : Enduit hydraulique.....	<b>12</b>
<b>Figure I.9</b> : Système à panneaux isolants.....	<b>13</b>
<b>Figure I.10</b> : Système à structure.....	<b>13</b>
<b>Figure I.11</b> : Système d'isolation projetée.....	<b>14</b>
<b>Figure I.12</b> : Système avec contre-cloison.....	<b>14</b>
<b>Figure I.13</b> : Plan ligneux de Résineux: pin.....	<b>15</b>
<b>Figure I.14</b> : Plan ligneux des feuillus: frênes.....	<b>15</b>
<b>Figure I.15</b> : Anisotropie des bois.....	<b>16</b>
<b>Figure I.16</b> : Influence de la quantité d'eau sur les résistances.....	<b>23</b>
<b>Figure I.17</b> : Progression des résistances d'un plâtre dans le temps.....	<b>23</b>
<b>Figure I.18</b> : Influence du rapport S/P sur la résistance à la compression.....	<b>27</b>

### Chapitre II: Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales

<b>Figure II.1</b> : Echantillon des (SD) utilisés.....	<b>28</b>
<b>Figure II.2</b> : Analyse granulométrique de sable de dune (SD).....	<b>30</b>
<b>Figure II.3</b> : Diffractogramme du sable de dune (SD).....	<b>32</b>
<b>Figure II.4</b> : Structure poreuse des copeaux de bois.....	<b>33</b>
<b>Figure II.5</b> : Echantillon des copeaux de bois.....	<b>33</b>
<b>Figure II.6</b> : Analyse granulométrique des copeaux de bois.....	<b>34</b>
<b>Figure II.7</b> : Sac du plâtre utilisé.....	<b>35</b>
<b>Figure II.8</b> : Appareil de Blaine de l'université de Laghouat.....	<b>37</b>
<b>Figure II.9</b> : Diffractogramme du plâtre de Ghardaïa.....	<b>39</b>
<b>Figure II.10</b> : Dispositif de mesure de retrait.....	<b>41</b>
<b>Figure II.11</b> : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	<b>42</b>
<b>Figure II.12</b> : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.....	<b>43</b>
<b>Figure II.13</b> : Dispositif pour l'essai de la caractérisation thermique au LRGC.....	<b>44</b>

### **Chapitre III: Formulation et caractérisation physico-mécanique des composites étudiés**

<b>Figure III.1</b> : Variation de la masse volumique de la composition plâtre + copeaux de bois avec le temps.....	<b>50</b>
<b>Figure III.2</b> : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en copeaux de bois de la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>50</b>
<b>Figure III.3</b> : Variation de la masse volumique de la composition plâtre + sable dunaire avec le temps.....	<b>51</b>
<b>Figure III.4</b> : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en sable de la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28jours.....	<b>51</b>
<b>Figure III.5</b> : Variation de la masse volumique de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois avec le temps.....	<b>52</b>
<b>Figure III.6</b> : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en copeaux de bois de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>52</b>
<b>Figure III.7</b> : Variation de la porosité en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>55</b>
<b>Figure III.8</b> : Variation de la porosité en fonction de la teneur en sable pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28jours.....	<b>55</b>
<b>Figure III.9</b> : Variation de la porosité en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28jour.....	<b>56</b>
<b>Figure III.10</b> : Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>57</b>
<b>Figure III.11</b> : Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28jours.....	<b>58</b>
<b>Figure III.12</b> : Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>58</b>
<b>Figure III.13</b> : Microscope utilisé.....	<b>60</b>
<b>Figure III.14</b> : Aspect général des compositions.....	<b>61</b>
<b>Figure III.15</b> : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + copeaux de bois avec le temps.....	<b>64</b>
<b>Figure III.16</b> : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>64</b>
<b>Figure III.17</b> : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + sable dunaire avec le temps.....	<b>65</b>
<b>Figure III.18</b> : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en sable pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28jours.....	<b>65</b>
<b>Figure III.19</b> : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois avec le temps .....	<b>66</b>
<b>Figure III.20</b> : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.....	<b>66</b>

<b>Figure III.21</b> : Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + copeaux de bois à avec le temps .....	<b>69</b>
<b>Figure III.22</b> : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.....	<b>69</b>
<b>Figure III.23</b> : Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + sable dunaire avec le temps.....	<b>70</b>
<b>Figure III.24</b> : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en sable pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28 jours.....	<b>70</b>
<b>Figure III.25</b> : Variation de la résistance à la compression de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois avec le temps .....	<b>71</b>
<b>Figure III.26</b> : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en copeaux de bois de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.....	<b>71</b>
<b>Figure III.27</b> : Variation du retrait au cours du temps de la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>74</b>
<b>Figure III.28</b> : Variation du retrait en fonction de la teneur en copeaux de bois de la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.....	<b>74</b>
<b>Figure III.29</b> : Variation du retrait au cours du temps de la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>75</b>
<b>Figure III.30</b> : Variation du retrait en fonction de la teneur en sable de la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28 jours.....	<b>75</b>
<b>Figure III.31</b> : Variation du retrait au cours du temps de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>76</b>
<b>Figure III.32</b> : Variation du retrait en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.....	<b>76</b>

#### **Chapitre IV: Mesure des propriétés thermo-physiques des composites.**

<b>Figure IV.1</b> : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>85</b>
<b>Figure IV.2</b> : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>86</b>
<b>Figure IV.3</b> : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>86</b>
<b>Figure IV.4</b> : Relation entre la conductivité thermique et la porosité de la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>89</b>
<b>Figure IV.5</b> : Relation entre la conductivité thermique et la porosité de la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>90</b>
<b>Figure IV.6</b> : Relation entre la conductivité thermique et la porosité de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>90</b>

## **Chapitre V: Application théorique par simulation des propriétés thermo-physiques.**

<b>Figure V.1</b> : EnergyPlus (extrait du manuel d'utilisateur d'EnergyPlus).....	<b>93</b>
<b>Figure V.2</b> : Situation de la maison.....	<b>94</b>
<b>Figure V.3</b> : Plan de la cellule.....	<b>94</b>
<b>Figure V.4</b> : Vue sur la façade Est.....	<b>95</b>
<b>Figure V.5</b> : Vue sur la façade Ouest.....	<b>95</b>
<b>Figure V.6</b> : Déphasage et amortissement de la température extérieure.....	<b>96</b>
<b>Figure V.7</b> : L'effet de l'épaisseur du mur en $P_{ref}$ sur la température de surface intérieure pour le 21-07-2013.....	<b>100</b>
<b>Figure V.8</b> : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 50 % copeaux de bois $P_{cp}$ (50%) sur la température de surface intérieure pour le 21-07-2013.....	<b>101</b>
<b>Figure V.9</b> : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 50 % sable dunaire $P_s$ (50%) sur la température de surface intérieure pour le 21-07-2013.....	<b>101</b>
<b>Figure V.10</b> : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 75 % sable dunaire $P_s$ (75%) sur la température de surface intérieure pour le 21-07-2013.....	<b>102</b>
<b>Figure V.11</b> : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois $P_{s-cp}$ (50%) sur la température de surface intérieure pour le 21-07-2013.....	<b>102</b>
<b>Figure V.12</b> : Rayonnement solaire direct, cas de la ville d'El-Goléa.....	<b>105</b>
<b>Figure V.13</b> : Rayonnement solaire direct, cas de la ville de Laghouat.....	<b>105</b>
<b>Figure V.14</b> : Rayonnement solaire direct, cas de la ville Béchar.....	<b>106</b>
<b>Figure V.15</b> : Rayonnement solaire direct, cas de la ville Adrar.....	<b>106</b>
<b>Figure V.16</b> : Comparaison des températures de surface des quatre villes (El-Goléa, Laghouat, Béchar, Adrar) .....	<b>107</b>
<b>Figure V.17</b> : Variation des températures de surface sous la configuration (C-02), Cas de la ville d'El-Goléa.....	<b>111</b>
<b>Figure V.18</b> : Variation des températures de surface sous la configuration (C-01), Cas de la ville de Laghouat.....	<b>111</b>
<b>Figure V.19</b> : Variation des températures de surface sous la configuration (C-01), Cas de la ville de Béchar.....	<b>112</b>
<b>Figure V.20</b> : Variation des températures de surface sous la configuration (C-02), cas de la ville d'Adrar.....	<b>112</b>

## Liste des tableaux

### Chapitre I: Recherche bibliographiques.

<b>Tableau I.1</b> : Valeurs de la chaleur spécifique, densité et capacité thermique de différents matériaux.....	<b>07</b>
<b>Tableau I.2</b> : Avantages et inconvénients de l'isolation par l'extérieur.....	<b>11</b>
<b>Tableau I.3</b> : Avantages et inconvénients de l'isolation par l'intérieur.....	<b>13</b>
<b>Tableau I.4</b> : Caractéristiques chimiques de bois.....	<b>16</b>
<b>Tableau I.5</b> : Densité de quelques essences du bois.....	<b>17</b>
<b>Tableau I.6</b> : Conductivité thermique et masse volumique de quelques essences de bois.....	<b>18</b>
<b>Tableau I.7</b> : Déshydratation du gypse par la chaleur.....	<b>19</b>
<b>Tableau I.8</b> : Masses volumiques absolue des différents produits.....	<b>20</b>
<b>Tableau I.9</b> : Valeurs de la densité apparent.....	<b>21</b>
<b>Tableau I.10</b> : Facteurs influent sur la prise.....	<b>21</b>
<b>Tableau I.11</b> : Valeurs de la conductivité thermique.....	<b>22</b>
<b>Tableau I.12</b> : Classes des matériaux selon le degré de l'inflammabilité.....	<b>24</b>
<b>Tableau I.13</b> : Finesse des plâtres de construction normalisés.....	<b>24</b>
<b>Tableau I.14</b> : Temps de prise des plâtres de construction normalisés.....	<b>25</b>
<b>Tableau I.15</b> : Résistances des plâtres de construction normalisés.....	<b>25</b>
<b>Tableau I.16</b> : Normes Algérienne sur les plâtres.....	<b>26</b>

### Chapitre II: Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales.

<b>Tableau II.1</b> : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue du sable.....	<b>29</b>
<b>Tableau II.2</b> : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente du sable.....	<b>30</b>
<b>Tableau II.3</b> : Caractéristiques physique du sable de dune.....	<b>31</b>
<b>Tableau II.4</b> : Analyse chimique du sable de dune.....	<b>32</b>
<b>Tableau II.5</b> : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue des copeaux de bois.....	<b>33</b>
<b>Tableau II.6</b> : Coefficient d'absorption des copeaux de bois.....	<b>34</b>
<b>Tableau II.7</b> : Principaux constituants organiques des copeaux de bois.....	<b>35</b>
<b>Tableau II.8</b> : Résultats de l'essai la masse volumique apparente du plâtre.....	<b>36</b>
<b>Tableau II.9</b> : Détermination de la finesse du plâtre normalisé.....	<b>38</b>
<b>Tableau II.10</b> : Temps de prise du plâtre normalisé.....	<b>38</b>
<b>Tableau II.11</b> : Résistances mécaniques du plâtre.....	<b>39</b>
<b>Tableau II.12</b> : Analyse chimique du plâtre utilisé.....	<b>40</b>
<b>Tableau II.13</b> : Analyse chimique de l'eau de gâchage.....	<b>40</b>

### Chapitre III: Formulation et caractérisation physico-mécanique des composites étudiés.

<b>Tableau III.1</b> : Compositions pondérales de la composition plâtre pur.....	<b>46</b>
<b>Tableau III.2</b> : Compositions pondérales de la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>47</b>
<b>Tableau III.3</b> : Compositions pondérales de la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>47</b>
<b>Tableau III.4</b> : Compositions pondérales de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>48</b>
<b>Tableau III.5</b> : Variation de la masse volumique pour la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>49</b>
<b>Tableau III.6</b> : Variation de la masse volumique pour la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>49</b>
<b>Tableau III.7</b> : Variation de la masse volumique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>49</b>
<b>Tableau III.8</b> : Variation de la porosité pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>54</b>
<b>Tableau III.9</b> : Variation de la porosité pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28jours.....	<b>54</b>
<b>Tableau III.10</b> : Variation de la porosité pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28jours.....	<b>54</b>
<b>Tableau III.11</b> : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>63</b>
<b>Tableau III.12</b> : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>63</b>
<b>Tableau III.13</b> : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>63</b>
<b>Tableau III.14</b> : Variation de la résistance à la compression pour les compositions plâtre + copeaux de bois.....	<b>68</b>
<b>Tableau III.15</b> : Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>68</b>
<b>Tableau III.16</b> : Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>68</b>
<b>Tableau III.17</b> : Variation du retrait pour la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>73</b>
<b>Tableau III.18</b> : Variation du retrait de la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>73</b>
<b>Tableau III.19</b> : Variation du retrait de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>73</b>

## Chapitre IV: Mesure des propriétés thermo-physiques des composites.

<b>Tableau IV.1</b> : Variation de la conductivité thermique pour la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>81</b>
<b>Tableau IV.2</b> : Variation de la conductivité thermique pour la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>81</b>
<b>Tableau IV.3</b> : Variation de la conductivité thermique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>81</b>
<b>Tableau IV.4</b> : Variation de la capacité thermique pour la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>82</b>
<b>Tableau IV.5</b> : Variation de la capacité thermique pour la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>82</b>
<b>Tableau IV.6</b> : Variation de la capacité thermique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>82</b>
<b>Tableau IV.7</b> : Variation de la chaleur spécifique pour la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>83</b>
<b>Tableau IV.8</b> : Variation de la chaleur spécifique pour la composition plâtre + sable dunaire .....	<b>84</b>
<b>Tableau IV.9</b> : Variation de la chaleur spécifique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>84</b>
<b>Tableau IV.10</b> : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>85</b>
<b>Tableau IV.11</b> : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>85</b>
<b>Tableau IV.12</b> : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>85</b>
<b>Tableau IV.13</b> : Diffusivité et effusivité thermique de la composition plâtre + copeaux de bois.....	<b>88</b>
<b>Tableau IV.14</b> : Diffusivité et effusivité thermique de la composition plâtre + sable dunaire.....	<b>88</b>
<b>Tableau IV.15</b> : Diffusivité et effusivité thermique de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.....	<b>88</b>

## Chapitre V: Application théorique par simulation des propriétés thermo-physiques.

<b>Tableau V.1</b> : Propriétés thermo-physiques du mur de 5 cm.....	<b>98</b>
<b>Tableau V.2</b> : Propriétés thermo-physiques du mur de 6cm.....	<b>98</b>
<b>Tableau V.3</b> : Propriétés thermo-physiques du mur de 7cm.....	<b>99</b>
<b>Tableau V.4</b> : Propriétés thermo-physiques du mur de 10cm.....	<b>99</b>
<b>Tableau V.5</b> : Diagnostic du cas d'étude.....	<b>104</b>
<b>Tableau V.6</b> : Description des configurations.....	<b>108</b>
<b>Tableau V.7</b> : Caractéristiques des villes étudiées.....	<b>109</b>
<b>Tableau V.8</b> : Evaluation de l'efficacité des configurations proposées.....	<b>110</b>

## Introduction générale

La question de l'utilisation rationnelle de l'énergie s'est imposée, ces dernières années, pour faire face à l'accroissement de son coût et aux conséquences catastrophiques sur l'environnement d'une utilisation abusive [Wackermann G, (2005)]. Tous les secteurs sont concernés et doivent être impliqués. Les installations de chauffage ou de climatisation dévorent d'importantes quantités d'énergie pour assurer des conditions de confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Le calcul des besoins énergétiques dépend fortement des propriétés thermiques de l'enveloppe du bâtiment, qui sont souvent supposées constantes. Les parois sont constituées de matériaux de construction qui sont, généralement, des milieux poreux capables d'absorber, de contenir et d'échanger de l'humidité en plus de la chaleur. Une interaction se développe entre le transfert de chaleur et d'humidité et les différentes propriétés de transport.

Le problème de l'absence de données détaillées, sur les propriétés thermo-physiques des matériaux locaux, peut impliquer des anomalies d'exploitation. De nombreux travaux montrent que les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction sont liées aux conditions d'utilisation, notamment, à la température et à la teneur en eau.

Le laboratoire de recherche de génie civil (LRGC) à l'université de Laghouat a débuté depuis **juillet 2000** des recherches sur la valorisation des matériaux locaux composites. Ces travaux sont axés essentiellement sur l'idée d'étudier de nouveaux composites que ce soit en béton ou en plâtre renforcé avec des matériaux de différentes natures (fibres végétales ou métalliques, copeaux de bois, billes de polystyrène...). Ces produits sont destinés à l'amélioration des performances hygrothermiques des bâtiments surtout dans les environnements arides.

Notre étude s'inscrit dans le cadre du développement durable. En valorisant les copeaux de bois issus de la menuiserie et le sable dunaire qui occupe 60% de la superficie de l'Algérie [Djoudi A, (2002)].

Les objectifs visés par ce travail sont :

- **En premier lieu** : Exploitation des matériaux locaux et valorisation des déchets industriels par l'élaboration d'un nouveau matériau composite à base de plâtre et des copeaux de bois. Ceci va effectivement dans le sens de développement durable [Hetzl J, (2007)].

• **En deuxième lieu** : Conception des bâtiments confortables permettent d'économiser l'énergie, notamment en environnements arides.

Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire a été subdivisé en cinq chapitres :

**Le premier chapitre** est consacré à une recherche bibliographique orientée sur les plâtres, l'isolation thermique en architecture et les copeaux de bois.

**Le deuxième chapitre** étudie la caractérisation physico-chimique et mécanique des matières premières utilisées pour la préparation des composites étudiés.

**Dans le troisième chapitre** on a procédé à la formulation, la mise en œuvre des composites étudiés et l'étude de l'influence de différents ajouts (copeaux de bois, sable, les deux ajouts simultanément) sur les performances physico-mécaniques des composites concernées.

**Le quatrième chapitre** est réservé à la mesure des propriétés thermo-physiques à savoir la conductivité thermique et la capacité thermique, et la diffusivité thermique au laboratoire de recherche de l'université.

**Le cinquième chapitre** étudie la simulation de propriétés thermo-physiques obtenues durant ce travail. La simulation a été faite dans les conditions climatiques de la région d'El-Goléa wilaya de Ghardaïa. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer le degré de l'efficacité de l'isolation de l'enveloppe du bâtiment par l'utilisation des composites étudiés et de connaître l'avantage et l'inconvénient de l'allègement des pâtes végétales sur l'amélioration des performances thermiques.

Enfin, une conclusion générale sur l'étude élaborée et des recommandations à prendre en considération dans les prochaines recherches.



# C H A P I T R E I



***Recherches bibliographiques***



## I. Introduction

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques à travers diverses documentations relatives à l'effet des isolants à base de plâtre et copeaux de bois sur le transfert de chaleur au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Pour l'isolation thermique, nous avons essayé de synthétiser et récapituler, par la description des modes d'échanges thermiques, les propriétés thermo-physiques essentielles.

Ensuite pour les copeaux de bois, nous avons essayé de comprendre le comportement du bois à travers les différentes recherches réalisées dans ce sens.

Enfin pour le plâtre comme étant le constituant de base des composites d'étude, nous avons dressé un état de l'art sur ses composants, ses procédés de fabrication, ses caractéristiques physico-mécaniques et ses typologies.

## II. Généralité sur l'isolation thermique

### II.1. Modes d'échange thermique

La conception d'une maison, qui profite des transferts naturels d'énergie, présente des avantages sur le plan du confort thermique. Au lieu d'avoir recours à nos systèmes mécaniques de chauffage/ventilation, nous pouvons les utiliser d'une manière plus douce comme complément à des moyens naturels. Nous mentionnons les modes d'échanges thermiques brièvement comme suit.

#### II.1.1. Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température [Bekkouche M, (2008)]. L'échange thermique par conduction est donné par la formule suivante :

$$Q = -\lambda \text{ grad}T \quad \dots\dots\dots (\text{I. 1})$$

Avec

**Q** : Flux de chaleur transmis par conduction (**W**).

**λ** : Conductivité thermique du matériau considère (**W/m.K**).

### II.1.2. Convection

C'est la transmission d'énergie calorifique entre un corps et un fluide (gaz ou liquide) par déplacement de celui-ci comme fluide, c'est surtout l'air qui nous intéresse ici. Les mouvements de l'air peuvent être dus aux variations de densité accompagnant les variations de température à l'effet du vent. Ce mode d'échange thermique est donné par la relation suivante :

$$\varphi_c = hs (T_p - T_f) \dots\dots\dots (\text{I. 2})$$

Avec :

$\varphi_c$ : Flux thermique traversant la paroi (W).

$h$  : Coefficient d'échange par convection (W/m<sup>2</sup>.K).

$S$  : Surface d'échange (m<sup>2</sup>).

$T_p$  : Température de la paroi du solide (°C).

$T_f$  : Température du fluide loin de la paroi (°C).

### II.1.3. Rayonnement

C'est la transmission d'énergie calorifique entre deux corps à des températures différentes, sans déplacement de matière, mais par échange d'ondes électromagnétiques (par exemple rayonnement infrarouge). Le rayonnement n'est pas affecté par la température de l'air ou un phénomène de convection thermique simultané entre les deux corps. Ce phénomène peut donc être considéré indépendamment de la convection thermique. D'après [Bekkouche M, (2008)] le rayonnement pur à grande longueur d'onde entre deux surfaces  $i$  et  $j$  est donné par la relation suivante :

$$Q_{ij} = F_{ij} S_i \sigma (T_{Si}^4 - T_{Sj}^4) = F_{ji} S_j \sigma (T_{Si}^4 - T_{Sj}^4) \dots\dots\dots (\text{I. 3})$$

Avec

$T_s$ : Température de la surface (°K).

$F_{ij}$ : Facteur de forme entre les surfaces  $i$  et  $j$ .

$\sigma$  : Constante de Stéphane Boltzmann. ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$S$  : Superficie de la surface (m<sup>2</sup>)

$Q_{ij}$ : Flux de rayonnement a grande longueur d'onde entre les surfaces  $i$  et  $j$  (W).

**II.2. Propriétés thermo-physiques des matériaux**

**II.2.1. Conductivité thermique**

La conductivité thermique d'un matériau est égale à la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface. Lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de **1 °K**, elle s'exprime en (W/m.K). La conductivité thermique est donnée par la relation :

$$Q = A \times \frac{\lambda}{e} \times \Delta T \quad \dots\dots\dots (I. 4)$$

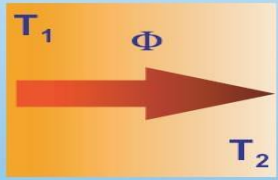
- Avec**
- Q** : Quantité de chaleur (W).
  - A** : Surface (m<sup>2</sup>).
  - λ** : Conductivité thermique (W/m.K).
  - e** : Epaisseur (m).
  - ΔT**: Différence de température (t<sub>2</sub>–t<sub>1</sub>).

D'après [Liebard A, (2005)] la conductivité thermique d'un matériau est influencée par :

- Son poids volumique.
- Sa teneur en eau.
- La taille de ses pores d'air.
- La nature du solide les renfermant.
- La présence d'eau à l'intérieur du matériau

La figure (I.1) indique les valeurs de la conductivité thermique en condition sèche et en condition humide pour quelques matériaux du bâtiment.

	sec	hum.		Conductivité thermique λ des matériaux en W/m.K
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane	
	0,040		laine minérale, liège	
	0,058		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1 000 kg/m <sup>3</sup>	
	0,54	0,75	briques 1 000-1 600 kg/m <sup>3</sup>	
	0,90	1,1	briques 1 600-2 100 kg/m <sup>3</sup>	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux		45	acier	
		203	aluminium	
		384	cuivre	



**Figure I.1** : Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux du bâtiment [Liebard A, (2005)].

### II.2.2. Coefficient de transmission surfacique

Le coefficient de transmission surfacique (U) mesure l'aptitude d'un système à laisser passer la chaleur et s'exprime en  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ . Il remplace la notation **K** utilisée dans les précédentes réglementations et s'évalue à l'aide des règles Th-U. Le coefficient de transmission surfacique est donné par la relation suivante : ..... (I. 5)

$$U = 1/(\text{Rsi} + \sum R + \text{Rse})$$

Avec **Rsi** : Résistance superficielle vis-à-vis de l'intérieur.

**Rse** : Résistance superficielle vis-à-vis de l'extérieur.

$\sum R$  : Somme des résistances thermiques de différentes couches égale à  $\sum R = R_1 + R_2 + R_N$ , notons que la résistance thermique (R) est donnée par la formule suivante :

$$R = e/\lambda \quad \text{..... (I. 6)}$$

Avec **e** : Epaisseur en ( $\text{m}^2$ ).

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ).

### II.2.3. Chaleur spécifique

C'est la quantité de chaleur requise pour provoquer une variation de température d'une unité par une unité de masse. C'est une constante caractéristique de chaque matériau et s'exprime en ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ) [Wright D, (2004)]. Elle est donnée par la relation suivante :

$$c = Q/(m \times \Delta T) \quad \text{..... (I. 7)}$$

Avec **Q** : Quantité de chaleur (W) ou J.

**m** : Masse de l'entité (kg).

$\Delta T$  : Différence de température ( $t_2 - t_1$ ).

### II.2.4. Capacité thermique

C'est l'aptitude d'un matériau à stocker la chaleur, elle est exprimée par le produit de la densité du matériau ( $\rho$  en  $\text{kg/m}^3$ ) et de sa chaleur spécifique (**c** en  $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ). Elle est donc notée  $\rho c$ , et exprimée en ( $\text{J/m}^3\cdot\text{K}$ ) [Mazari M, (2012)]. Plus la capacité thermique est grande, plus le matériau est capable de stocker de la chaleur. Elle est donnée par la relation ci-dessous :

$$\rho c = \rho \times c \quad \dots\dots\dots (I. 8)$$

Avec  $\rho$ : Densité du matériau.

$c$  : Chaleur spécifique (J/kg.K).

Le tableau (I.1) indique les valeurs de la chaleur spécifique, de la densité et de la capacité thermique de quelques matériaux de construction.

**Tableau I.1** : Valeurs de la chaleur spécifique, densité et capacité thermique pour différents matériaux [Mazria E, (2005)].

Matériaux de construction	Chaleur spécifique (c en MJ/ kg.K)	Densité	Capacité thermique ( $\rho c$ en J/m <sup>3</sup> .K)
Eau	1	1	1
Bois de chêne	0.57	0.75	0.43
<b>Polyuréthane expansé</b>	<b>0.38</b>	<b>0.024</b>	<b>0.009</b>
Tissu de laine	0.32	0.11	0.035
Air	0.24	0.0012	0.00029
<b>Brique</b>	<b>0.20</b>	<b>1.97</b>	<b>0.40</b>
<b>Béton</b>	<b>0.156</b>	<b>2.31</b>	<b>0.35</b>
Acier	0.12	7.85	0.95

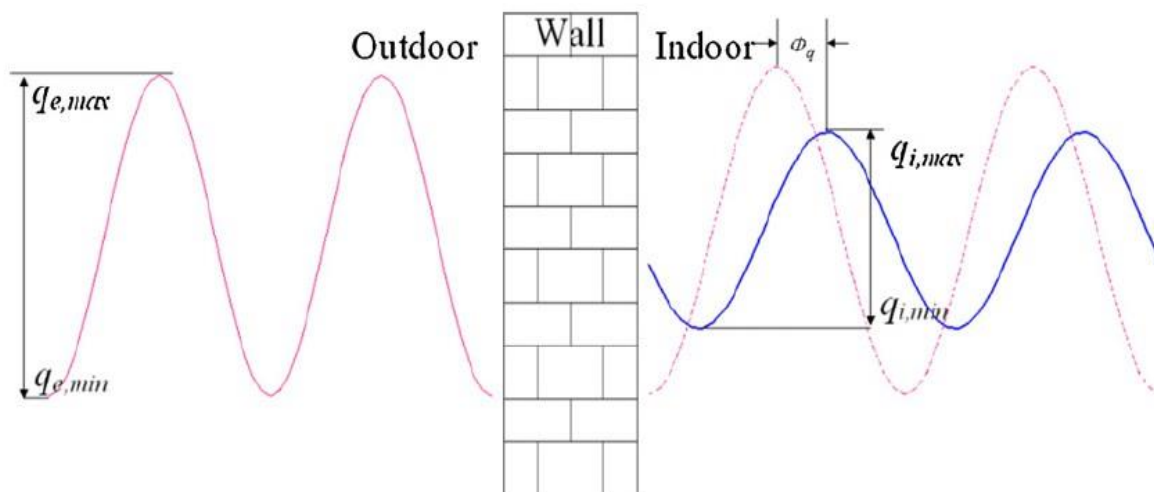
D'après [Mazria E, (2005)] la brique et le béton ont une chaleur spécifique représentant la moitié de celle du polyuréthane expansé, leur densité est presque cent fois supérieure. Donc leur possibilité de stockage thermique par m<sup>3</sup> est de 40 à 50 fois supérieure.

### II.2.5. Inertie thermique

En effet l'inertie thermique d'un matériau mesure sa capacité à accumuler de la chaleur et à en différer la restitution après un certain temps. En été l'inertie thermique de différents matériaux permet d'amortir l'onde quotidienne de température grâce à des déphasages dans les parois. C'est une technique d'économie d'énergie simple et peu coûteuse qui est souvent ignorée dans la construction moderne.

L'amortissement est plutôt le rapport de l'amplitude de la variation quotidienne de la température extérieure sur l'amplitude de la variation quotidienne de la température intérieure [Xing J, (2012)].

Si les parois de l'enveloppe ne contiennent pas d'isolant, le matériau joue un rôle important avec son épaisseur sur le déphasage variant que sur l'amortissement. Cette influence est d'autant importante si le matériau a une masse volumique et chaleur spécifique importantes. Or le matériau isolant joue un rôle important sur l'amortissement des ondes incidentes et assez faible sur le déphasage. La figure (I.2) indique le déphasage et l'amplitude des ondes incidente.



**Figure I.2 :** Déphasage et l'amplitude de l'onde incidente par une paroi homogène [Xing J, (2012)].

D'après [Liebard A, (2005)] l'inertie thermique se caractérise par deux grandeurs, essentielles, qui sont :

**II.2.5.1. Diffusivité thermique (a)**

La diffusivité exprime la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. Il correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau. Elle s'exprime en (m<sup>2</sup>/h) elle est donnée par la relation suivante :

$$a = \lambda / (\rho \times c) \dots\dots\dots (I. 9)$$

**II.2.5.2. Effusivité thermique (b)**

L'effusivité exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou a resituer) une puissance thermique. Elle s'exprime en (W/m<sup>2</sup>.K)<sup>1/2</sup> elle est donnée par la relation suivante :

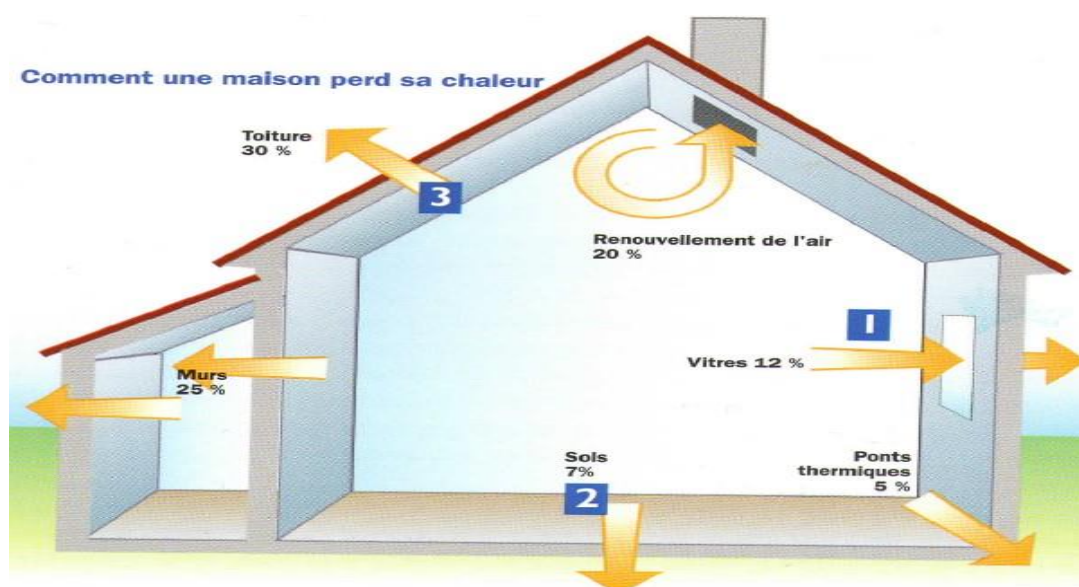
$$b = \sqrt{(\lambda \times \rho \times c)} \dots\dots\dots (I. 10)$$

Pour conclure, l'efficacité du stockage (accumulation) thermique dépend de plusieurs paramètres tel que les propriétés thermo-physiques des matériaux, la surface d'échange, l'épaisseur, le positionnement et l'orientation dans le bâtiment.

## II.3. L'isolation thermique en architecture

### II.3.1. Définition

L'isolation thermique est la propriété que possède un matériau de construction pour diminuer le transfert de chaleur entre deux ambiances. Elle a pour but de protéger les bâtiments et leurs occupants contre les effets de variations de températures et des conditions atmosphériques [Bonhomme A, (1979)]. D'après la norme française NF P75-101, l'appellation "isolant thermique" dans le bâtiment est réservée aux produits dont la résistance thermique ( $R \geq 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) et la conductivité thermique ( $\lambda \leq 0.065 \text{ W/m.K}$ ). La figure (I.3) présente en pourcentages les pertes de chaleur d'une maison traditionnelle non isolée.



**Figure I.3 :** Ensemble des déperditions thermiques d'une maison non isolée  
[Dominguez C, (2009)].

### II.3.2. Classification

Il existe plusieurs types d'isolants thermiques dont le critère de classification, suivant la norme française NF P75-101, repose sur la structure de leur matrice solide et la nature chimique de la substance qui la constitue.

### **A. Isolants fibreux**

Nous distinguons, dans cette catégorie, les isolants fibreux minéraux manufacturés à partir de matières amorphes fondues tel que le basalte, le verre et la silice vitreuse. Les principaux isolants sont les laines minérales, les isolants en fibres céramiques. Les isolants fibreux organiques, d'origine naturelle, comme la laine de bois, la laine animale ou manufacturés à partir de matières plastiques comme les fibres de polyester.

### **B. Isolants cellulaires**

Ce sont des matériaux poreux à matrice solide contenant des cellules fermées, ouvertes ou partiellement ouvertes, contenant de l'air ou un autre gaz ayant servi à l'expansion du matériau initial. Parmi les isolants cellulaires d'origine minérale, on retrouve le béton cellulaire léger et le verre cellulaire. Parmi les isolants cellulaires organiques manufacturés on compte le polystyrène expansé et extrudé, le polyuréthane, le polychlorure de vinyle, la mousse phénolique et les mousses souples d'élastomère.

### **C. Isolants pulvérulents, nodulaires ou granulaires**

Les matériaux d'origine minérale sont la perlite et la vermiculite qui se présentent respectivement sous forme de grains et de paillettes obtenus à partir de l'expansion à chaud de roches volcaniques et de mica, le granulats de verre cellulaire. Les flocons de laine de roche ou de verre. Les isolants d'origine organique sont les granulats de liège, les copeaux de mousse rigide de polychlorure de vinyle.

### **D. Supers isolants**

Ce sont des matériaux manufacturés, c'est-à-dire des matériaux microporeux de type cellulaire comme des plaques aérogels de silice monolithique, ou pulvérulents comme les poudres aérogels ou les poudres ultrafines (nanomatériaux) de silice [Langlais C, (2009)].

-L'application de l'isolation contient deux méthodes essentielles :

#### **II.3.3. L'isolation par l'extérieur**

C'est un procédé d'isolation thermique qui positionne l'isolant coté extérieur à la structure porteuse comme un "manteau thermique" enveloppant le bâtiment. D'après [Rougeron C, (1979)] l'isolation par l'extérieur constitue la solution la plus efficace et rationnelle, mais sa mise en œuvre est délicate. Elle exige une maîtrise technique plus avancée.

Le tableau (I.2) indique les avantages et les inconvénients de l'isolation par l'extérieur.

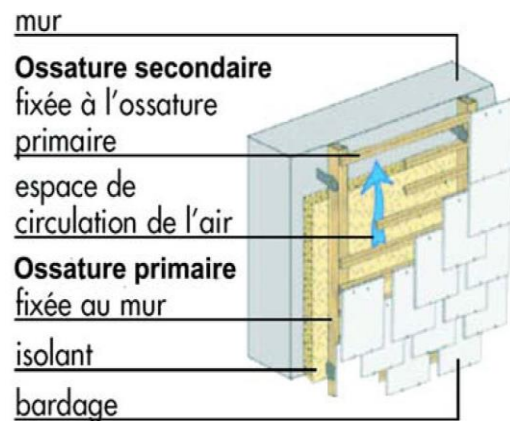
**Tableau I.2 :** Avantages et inconvénients de l'isolation par l'extérieur [www.ageden.org].

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Diminution importante des ponts thermiques.</li> <li>-Absence de diminution des surfaces habitables</li> <li>-Protection des murs des variations climatiques</li> <li>-Remise à neuf de la façade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Plus difficile à réaliser (faire appel à une entreprise spécialisée).</li> <li>-Coût généralement plus élevé.</li> <li>-Modifie le look extérieur.</li> </ul>

[Rougeron C, (1979)] distingue trois typologies de la réalisation de l'isolation par l'extérieur sont :

**a) Bardage**

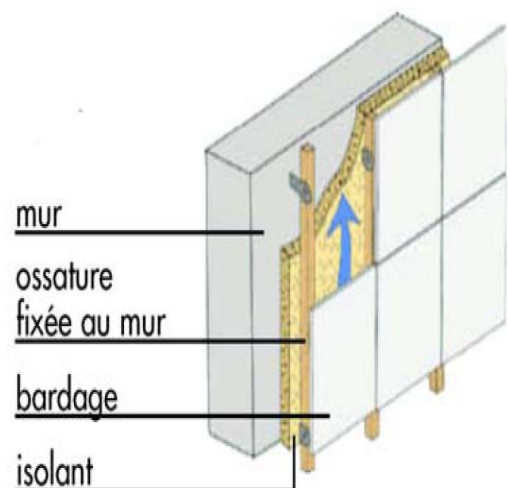
Le bardage constitué de revêtements (bois en bardeaux ou clins, tuiles, ardoises, plaques synthétiques...) posés sur une ossature fixée au mur. Il recouvre l'isolant qui peut être collé ou fixé mécaniquement au mur à l'aide des chevilles ou d'attaches métalliques spécifiques. Une lame d'air doit être ménagée entre l'isolant et le revêtement. Les figures (I.4) et (I.5) présentent les deux types de la mise en place du système de bardage.



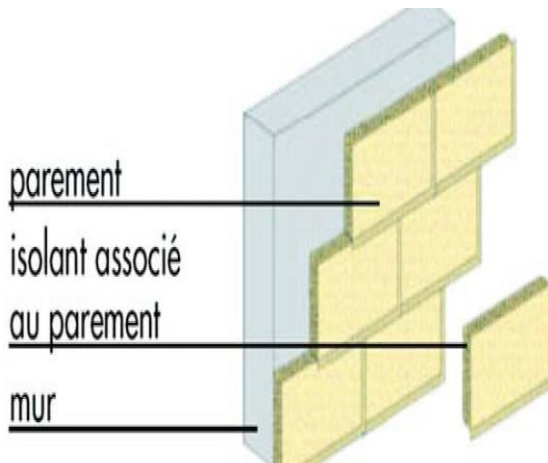
**Figure I.4 :** Bardage sur ossature double [www.ageden.org].

**b) Vêtire ou vêtages**

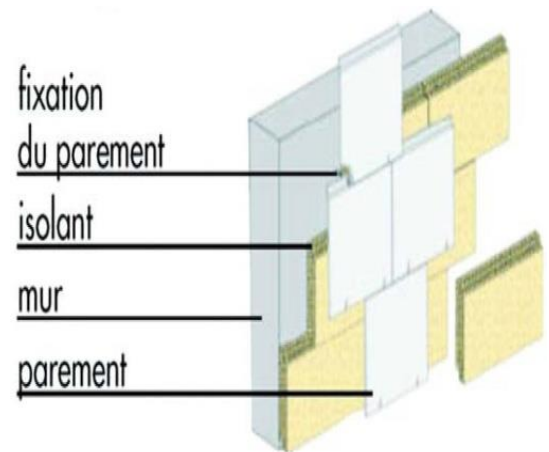
Le système est composé d'un isolant avec un parement incorporé et des ossatures sur lesquelles sont posées les vêtures. Dans le cas des vêtages, l'isolant est collé ou fixé mécaniquement sur le mur par des chevilles. Les figures (I.6) et (I.7) présentent la mise en place du système.



**Figure I.5 :** Bardage sur ossature simple [www.ageden.org].



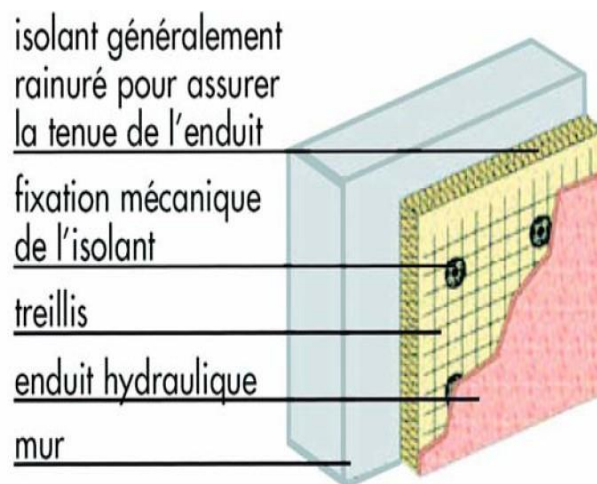
**Figure I.6 :** Système de vêture  
[www.ageden.org].



**Figure I.7 :** Système de vêtage  
[www.ageden.org].

### c) L'enduit hydraulique

C'est un enduit à base de sable, de ciment ou de chaux comprenant un peu de résine qui forme une pellicule d'une épaisseur de **15 à 20 mm**. La figure (I.8) présente la mise en place de l'enduit hydraulique.



**Figure I.8 :** Enduit hydraulique  
[www.ageden.org].

### II.3.4. L'isolation par l'intérieur

Très peu utilisée, ceci étant lié au mode de vie de ménages ainsi qu'aux pratiques courantes de nettoyage (à l'eau) et de peinture. Le tableau (I.3) indique les avantages et les inconvénients de l'isolation par l'intérieur.

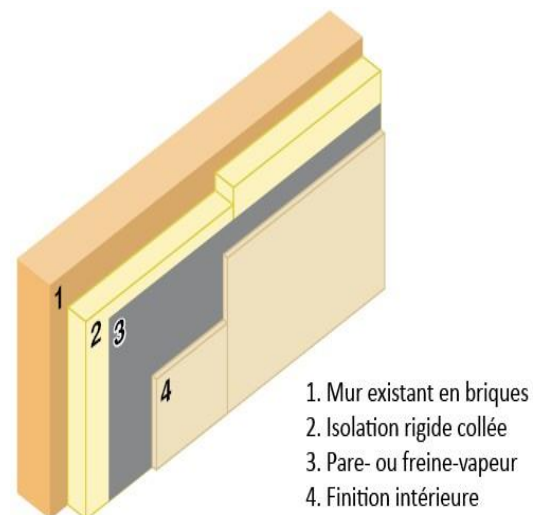
**Tableau I.3 :** Avantages et inconvénients de l'isolation par l'intérieur [www.ageden.org].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation sans échafaudages.</li> <li>- Grande diversité de choix au niveau des isolants</li> <li>- Coût moindre.</li> <li>- Réalisation possible pièce par pièce : phasage du chantier et des dépenses.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la surface habitable.</li> <li>- Augmentation des sollicitations hygrothermiques dans le mur : risque de condensation interne, de gel.</li> <li>-Ponts thermiques difficiles à résoudre.</li> </ul>

[Rougeron C, (1979)] distingue quatre typologies de la réalisation de l'isolation par l'extérieure sont :

**a) Système à panneaux isolants collés**

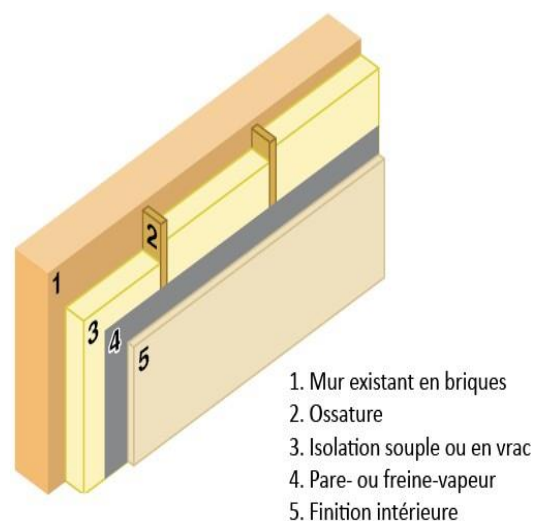
Ce système est généralement le plus simple à mettre en œuvre, mais la surface intérieure du mur doit être relativement plane. Les défauts de planéité ne peuvent pas dépasser **15 mm** sur une règle de **2 m**. Les matériaux utilisés sont, le polystyrène expansé ou extrudé, le polyuréthane, fibres de bois. La figure (I.9) présente la mise en place du système à panneaux.



**Figure I.9 :** Système à panneaux isolants [www-climat.arch.ucl.ac.be].

**b) Système à structure**

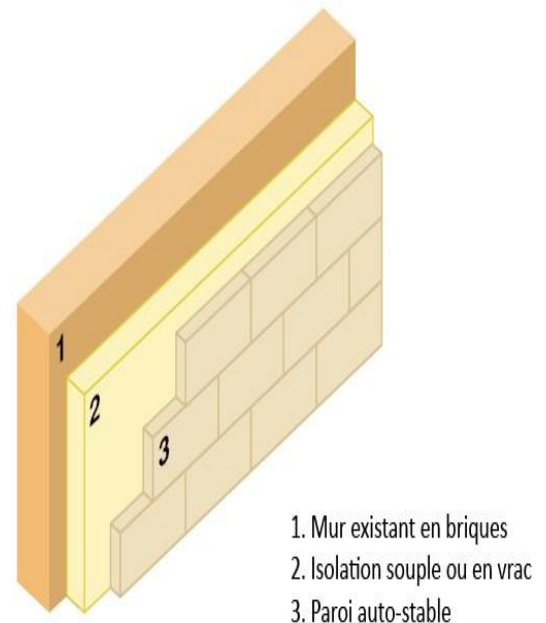
Ce système permet de rattraper les défauts de planéité du mur. Un isolant souple est posé dans une ossature bois ou métallique fixée au mur et formant des caissons. Un isolant en vrac peut également être insufflé dans l'ossature. Les matériaux utilisés le plus couramment sont les rouleaux de laine minérale ou végétale, ou les isolants projetés comme la cellulose. La figure (I.10) présente la mise en place du système à structure.



**Figure I.10 :** Système à structure [www-climat.arch.ucl.ac.be].

### c) Système avec contre-cloison maçonnée

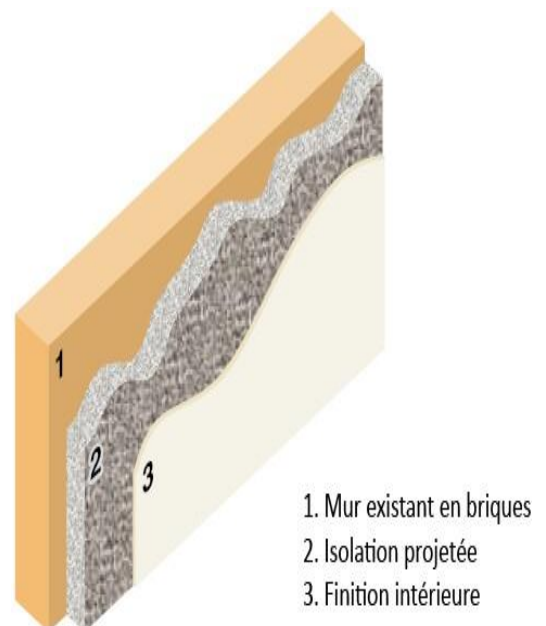
Ce système permet de rajouter un matériau lourd devant l'isolant et donc de récupérer au moins une partie de l'inertie thermique perdue. Cette solution est toutefois rarement envisageable étant donné la perte d'espace qu'elle engendre. Le poids de la contre-cloison peut également poser un problème. Les matériaux utilisés sont, une paroi autostable est réalisée à l'intérieur, parallèlement et à une certaine distance du mur. Les matériaux les plus utilisés sont les briques de terre cuite (ou de terre crue), les carreaux de plâtre et les blocs de béton. L'isolant est incorporé entre la contre-cloison et le mur. Il peut être en vrac, ou en panneaux. La figure (I.11) présente la mise en place du système avec contre-cloison



**Figure I.11 :** Système avec contre-cloison  
[[www-climat.arch.ucl.ac.be](http://www-climat.arch.ucl.ac.be)].

### d) Système d'isolation projetée

Certains isolants peuvent être directement projetés sur le mur existant en brique. Les matériaux utilisés sont les enduits isolants à base de billes de polystyrène expansé ou de vermiculite et la mousse de polyuréthane. La figure (I.12) présente la mise en place du système d'isolation projetée.



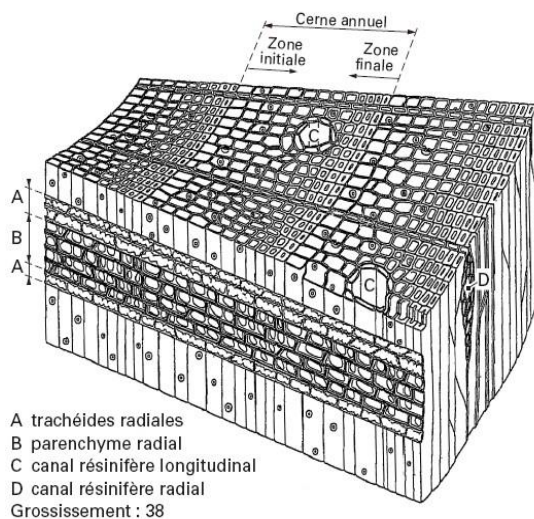
**Figure I.12 :** Système d'isolation projetée  
[[www-climat.arch.ucl.ac.be](http://www-climat.arch.ucl.ac.be)].

### III. Copeaux de bois

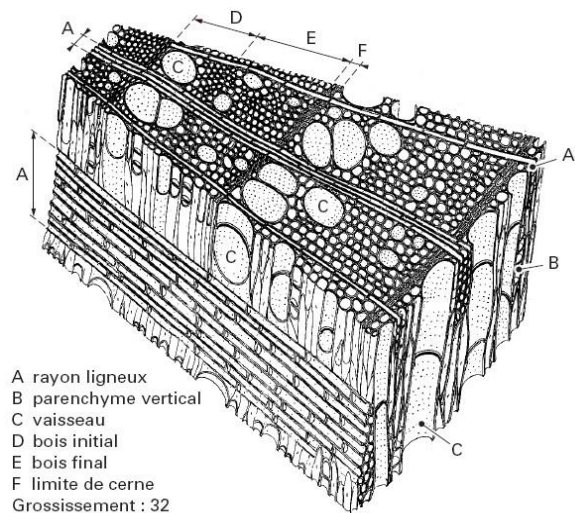
#### III.1. Définition

Le bois est un matériau organique naturel, il est fourni par deux grandes catégories regroupant des milliers d'espèces d'arbres. Ces deux appellations désignent également leurs bois respectifs [Cherait Y, (2006)].

Le **résineux** nom donné aux arbres à aiguilles (Sapin, Pin, Epicéa...) par extension. Dans le bois résineux, les vaisseaux sont imparfaits et on les appelle alors des trachéides. La figure (I.13) présente le plan ligneux des feuillus.



**Figure I.13 :** Plan ligneux des résineux : pin [Triboulot P, (2009)].



**Figure I.14 :** Plan ligneux des feuillus frênes [Triboulot P, (2009)].

Le **feuillu** nom couramment donné aux arbres à feuilles plates (Chêne, Hêtre, Peuplier et Frêne...). Dans les bois feuillus, les vaisseaux sont parfaits et forment de grandes cellules creuses placées bout à bout. Avec le temps, les cellules se colmatent. La figure (I.14) présente le plan ligneux de résineux.

#### III.2. Caractéristique chimique

Le bois est une matière organique, fibreuse, et biodégradable. Le bois anhydre est composé d'environ de: 40 % de cellulose, 10 % d'hémicellulose, 50 % de lignine [Viton R, (2006)].

Le tableau (I.4) indique les caractéristiques chimiques de bois.

Tableau I.4 : Caractéristiques chimiques de bois [Viton R, (2006)].

Composants	Carbone	Oxygène	Hydrogène	Azote	matières minérales diverses
Pourcentage	50 %	42 %	6 %	1 %	1 %

### III.3. Propriétés du bois

#### III.3.1. L'Anisotropie

La complexité du matériau bois exige alors pour son étude une modélisation qui, sans s'éloigner des grands traits de sa structure, facilite cette étude. Les propriétés physico-mécaniques dépendent de la direction. Elle est due dans le cas du bois essentiellement à la disposition concentrique des cernes et à la structure de fibres. La figure (I.15) présente l'anisotropie des bois.

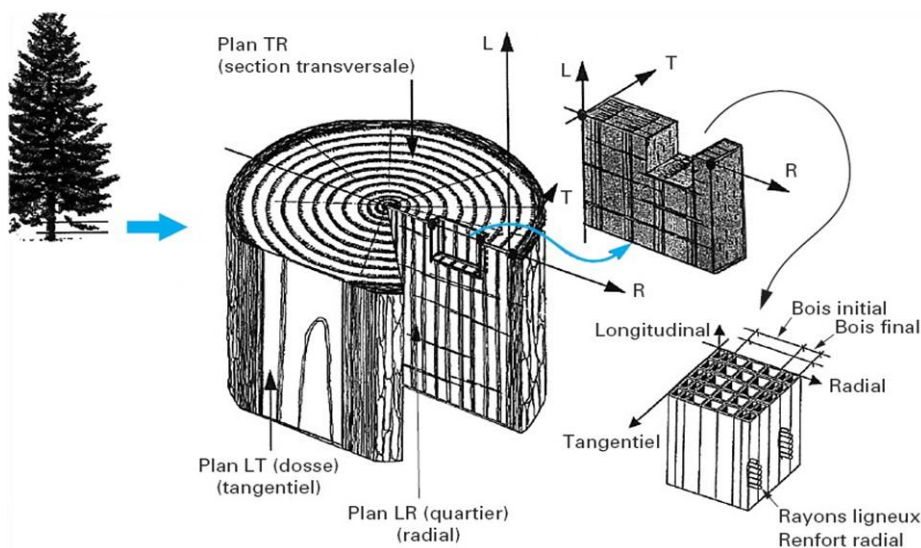


Figure I.15 : L'anisotropie des bois [Triboulot P, (2009)].

#### III.3.2. L'hygroscopie

Le bois est fortement hygroscopique, son taux d'humidité interne s'équilibre en fonction des conditions climatiques de l'environnement. L'eau absorbée sous forme «d'eau libre» n'a probablement pas une influence notable sur le comportement mécanique en petites déformations. Par contre la partie de l'eau absorbée dite "liée" interagit dans la paroi cellulaire sur les polymères constitutifs de la matière ligneuse.

### III.3.3. La densité

La densité d'un bois est un paramètre très important dont la plupart des propriétés mécaniques et technologiques sont influencés directement par elle-même. La densité du bois représente une grandeur particulière dans la mesure où le matériau est poreux, hétérogène et hygroscopique. La densité d'un bois sera toujours précisée pour un degré d'humidité donné. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$dh = Mh/Vh \quad \dots\dots\dots (I.12)$$

Avec

**Mh** et la **Vh** étant la masse et le volume de l'échantillon à l'état humide.

Le tableau (I.5) présente la densité de quelques essences du bois.

**Tableau I.5 : Densité de quelques essences du bois [Triboulot P, (2009)].**

Classes de densité et de dureté	Densité	Essences
Bois très lourds et très durs.	> 0,85	Azobé, ipé
Bois lourds et durs.	0,70 à 0,85	Charme, movingui, chêne dur
Bois mi-lourds et mi-durs.	0,56 à 0,70	Niangon, iroko, châtaignier, chêne tendre
Bois légers et tendres.	0,45 à 0,55	Framiré, douglas, épicéa, sapin, pins
Bois très légers et très tendres.	< 0,45	Western Red Cedar, séquoia, peuplier

### III.3.4. La masse volumique

Tous les bois n'ont pas la même masse volumique certains sont légers (peuplier, épicéa...) d'autres très lourds (chêne, ébène...). La masse volumique varie non seulement d'une essence à l'autre, mais au sein d'une même espèce [Gotteicha M, (2005)].

### III.3.5. La conductivité thermique

Les valeurs de la conductivité thermique du bois sont largement inférieures à celles de la plupart des matériaux de construction utilisés à cause de sa structure poreuse.

Dans le bois sec, les pores sont remplis d'air, qui est un mauvais conducteur de chaleur.

La conductivité thermique du bois dépend directement de sa densité et du taux d'humidité (La teneur en humidité augmente la conductivité thermique car l'eau en comparaison avec l'air conduit mieux la chaleur) [Benmansour N, (2011)]. Le tableau (I.6) présente la conductivité thermique et la masse volumique de quelques essences de bois en fonction de la teneur en humidité.

**Tableau I.6 :** Conductivité thermique et masse volumique de quelques essences de bois [Gotteicha M, (2005)].

Désignation	Conductivité thermique (W/m°C)	Masse volumique à 15% d'humidité (kg/dm <sup>3</sup> )
<b>Résineux :</b>		
-Pin sylvestre, pin maritime.	0.15	0.5 à 0.6
-Epicéa, sapin.	0.12	0.4 à 0.5
<b>Feuillus :</b>		
-Frêne, hêtre, chêne.	0.23	0.6 à 0.7
<b>Autre matériaux de construction :</b>		
-Béton plein.	1.75	2.4
-Acier.	50	7.8
-Plâtre.	0.36	1.06

#### IV. Plâtre

Le plâtre est l'un des plus anciens matériaux de construction utilisés par l'homme après transformation. Son utilisation remonte peut être au huitième millénaire avant Jésus Christ, où le plâtre servait déjà à réaliser des sols, des fresques décoratifs et même des récipients.

Du point de vue environnemental, le plâtre permet d'économiser le ciment qui exige beaucoup d'énergie pour sa fabrication, il faut en effet de **80 à 90 kg** de charbon pour fabriquer 1tonne de plâtre, alors qu'il faut **400 kg** pour 1tonne de ciment portland [Réunion D, (1968)].

##### IV.1. Définition

La norme NF B 12-300 donne la définition du plâtre : « Le plâtre est le produit obtenu par déshydratation et pulvérisation plus ou moins poussées du gypse constitue par du sulfate de calcium di-hydrate. »

##### IV.2. Principe de fabrication

On distingue trois étapes principales de fabrication du plâtre :

- ❖ Extraction et préparation du cru.
- ❖ Cuisson.
- ❖ Mouture, mélange et distribution.

### IV.2.1. Extraction et préparation du cru

Le gypse est extrait de carrières à ciel ouvert ou de carrières souterraines. La roche est concassée, criblée, puis stockée sous des hangars ou elle subit lors de son déversement une première homogénéisation. Elle est ensuite séchée à une température ne dépassant pas **90°C** (la roche peut contenir plus de **10 %** d'humidité) et réduite en éléments plus fins, enfin stockée dans les trémies d'alimentation des fours.

D'après [Daligand D, (2004)] le plâtre est un sulfate de calcium qui se trouve dans la nature sous deux formes :

- ❖ L'anhydrite, ou sulfate de calcium anhydre, assez rare sous la formule chimique ( $\text{CaSO}_4$ )
- ❖ Le gypse, ou sulfate de calcium à deux molécules d'eau di-hydrate. Très abondant qui répond à la formule chimique ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ).

### IV.2.2. Cuisson

Le phénomène de déshydratation du gypse en fonction de la température est assez complexe et dépend non seulement de cette température mais aussi de la pression de la vapeur d'eau au contact de la matière, de la finesse du gypse et de la présence d'impuretés en faible proportion. Le tableau (I.7) présente la déshydratation du gypse par la chaleur.

**Tableau I.7 : Déshydratation du gypse par la chaleur [Papadakis M, (1970)].**

Nom du produit	Variété chimique	Température	Caractéristique
Gypse	$\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	Naturelle	Densité (d) = 2.31
Semi-hydrate	$\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$	110 à 120 °C	Selon procédé de cuisson, ❖ $\alpha$ : (vapeur saturante), forte résistance, d= 2.76 ❖ $\beta$ : (vapeur sèche), résistance plus faible, d= 2.62
Anhydrite soluble	$\text{CaSO}_4$ III	170 à 250 °C	Variété instable à la température ordinaire. d = 2.58
Anhydrite insoluble	$\text{CaSO}_4$ II	400 à 600 °C	Identique à l'anhydrite naturelle, appelé : plâtre hydraulique. Prise lente, d = 2.93 à 2.97
Plâtre de plancher	$\text{CaSO}_4$ I	600 à 1200 °C	Prise très lente

Avec

**$\alpha$** : Obtenue par chauffage en atmosphère humide. Le corps est compact, cristallin et possède de fortes résistances mécaniques.

**$\beta$** : Obtenue par chauffage en atmosphère sèche. Ce corps est floconneux et présente des fissures; il est métastable et possède des résistances mécaniques assez faibles.

Il existe une grande variété de fours, soit fixes, rotatifs fonctionnant en atmosphère sèche ou en atmosphère saturée.

### IV.2.3. Mouture, mélange et distribution

Les différentes sortes de sulfate de chaux sont mélangées (semi-hydrate"  $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$ " et surcuits"  $\text{CaSO}_4$ ") et broyées à la finesse voulue. La poudre finale est stockée dans des silos d'où elle est reprise pour être livrer, soit en sacs papier à valve de **40 kg**, soit en vrac dans des récipients plombes.

## IV.3. Caractéristiques physico-mécaniques du plâtre

### IV.3.1. Caractéristiques physiques

#### IV.3.1.1. La masse volumique absolue

Pour la mesure de la masse volumique du plâtre, on pourra utiliser la méthode du pycnomètre. Le tableau (I.8) présente la masse volumique absolue des différents plâtres.

**Tableau I.8** : Masses volumiques absolues des différents produits [Cherait Y, (2006)].

Produit	Variété chimique	Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Gypse	$\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	2.30
Semi-hydrate « $\alpha$ »	$\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$ var $\alpha$	2.65
Semi-hydrate « $\beta$ »	$\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$ var $\beta$	2.75
Anhydrite	$\text{CaSO}_4$	2.90

#### IV.3.1.2. La densité

La densité apparente diminue régulièrement lorsque la finesse du plâtre augmente. En effet plus les grains sont fins plus le pourcentage du vide est important lors du remplissage d'un même volume. Le tableau (I.9) présente les valeurs de la densité apparente des différents plâtres.

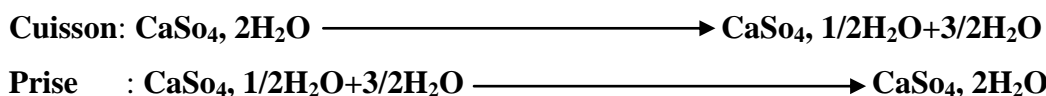
**Tableau I.9 :** Valeurs de la densité apparente [Papadakis M, (1970)].

Catégorie du plâtre	Densité apparente
Plâtre gros de construction.	1.00
Plâtre fin de construction.	0.90
	0.80
Plâtre à mouler ordinaire.	0.60
Plâtre à mouler ordinaire très fin à projeter.	0.40

Les chiffres de la densité apparente sont relatifs au plâtre non tassé, car le tassement augmente la densité de **25 à 50%**. Enfin, on considère que la masse volumique du plâtre est de l'ordre de **2.3g/cm<sup>3</sup>**.

#### IV.3.1.3. Prise et durcissement

Lorsque le plâtre est gâché avec de l'eau de façon à obtenir une pâte fluide, cette pâte devient rapidement plus épaisse puis après des durées variables cesse d'être utilisable (fin de prise). Le plâtre est caractérisé par un temps de prise court et un durcissement rapide accompagné d'une forte élévation de température. La prise est la réaction inverse de la réaction de cuisson.



Les facteurs agissant sur la prise sont résumés sur le tableau (I.10) ci-après :

**Tableau I.10 :** Facteurs influents sur la prise [Festa J, (1995)].

Retardateur de prise	Accélérateur de prise
1. Quantité d'eau de gâchage.	1. Présence du plâtre déjà durci, lorsque le gâchage est effectué dans des récipients ayant déjà servi pour la confection des plâtres.
2. Mode et durée de malaxage $t \leq 1\text{min}$ .	-
3. Présence des retardateurs : -Les phosphates. -Borax "Sel de sodium". -La chaux.	2. Présence des accélérateurs : -Le sulfate hydraté (CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O). -Le sulfate d'alumine et de potasse. -Le chlorure de sodium.

#### IV.3.1.4. Expansion

L'hydratation du plâtre provoque un dégagement de chaleur accompagné d'une augmentation de volume due à la cristallisation rapide. Ce gonflement est de l'ordre de **0,3 à 1,5 %** suivant les plâtres ; rapide au début de la prise, est par la suite atténué par un léger retrait de l'ordre du dixième de la valeur du gonflement.

#### IV.3.1.5. L'adhérence aux matériaux

Le plâtre adhère bien aux briques et aux pierres, ainsi qu'aux métaux. D'après [Réunion D, (1968)] le plâtre corrode le fer et l'acier surtout s'il est maintenu humide. Pour le gâchage et le moulage du plâtre, on ne peut pas armer le plâtre comme le ciment, mais on le fait parfois avec des armatures galvanisées. De même on ne peut clouer le plâtre qu'avec des clous de cuivre ou de fer galvanisé. Par contre il adhère mal aux surfaces lisses.

#### IV.3.1.6. L'isolation thermique

Comme tous les corps poreux le plâtre est un excellent isolant thermique, il est employé seul ou en association avec d'autres matériaux «copeaux de bois». Le tableau (I.11) donne les valeurs de la conductivité thermique qui sont variées avec la densité.

**Tableau I.11** : Valeurs de la conductivité thermique [Festa J, (1995)].

Catégorie du plâtre	Densité	Conductivité thermique (W/m°C)
Plâtres gâchés serrés à très serrés, des plâtres THD et projetés.	1100 à 1300	0.50
Les carreaux de plâtre à parements lisses.	900 à 1000	0.35
Pâtres allèges à la perlite.	600 à 900	0.30 à 0.25

#### IV.3.2. Caractéristiques mécaniques

Les résistances varient beaucoup avec la nature et la finesse du plâtre donné. Les résistances sont en fonction :

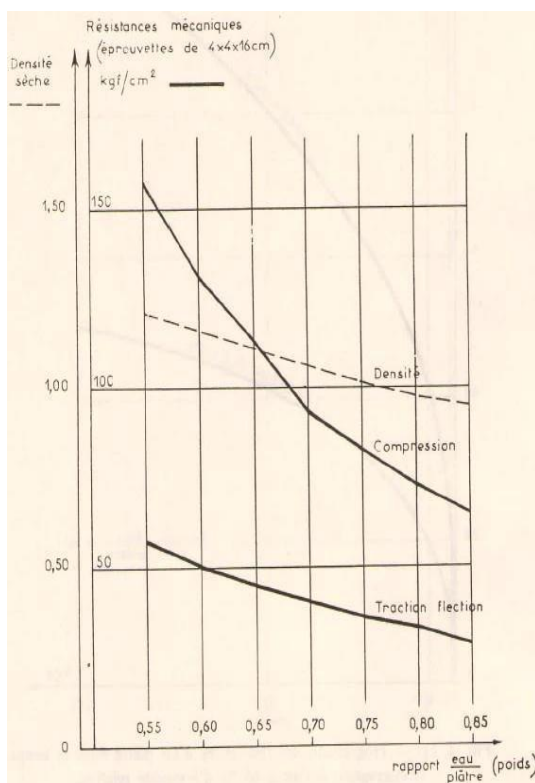
- ❖ Du pourcentage d'eau de gâchage.
- ❖ Du temps.
- ❖ Du milieu de conservation.

#### IV.3.2.1. Résistance à la compression

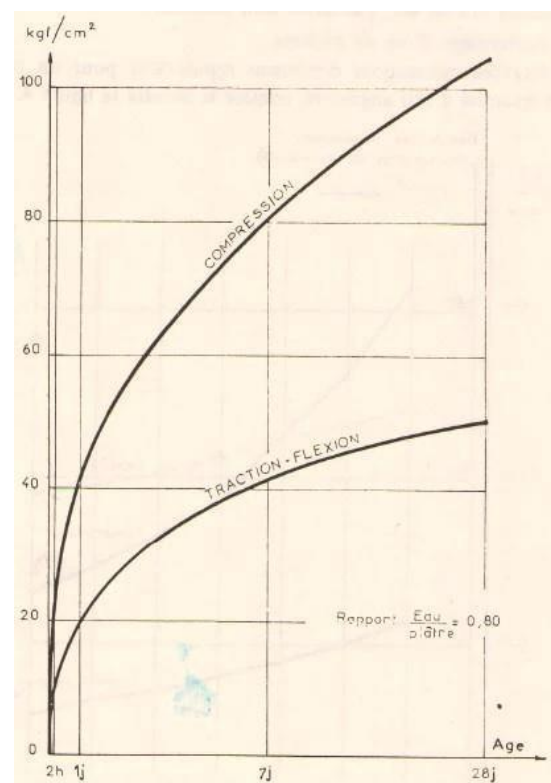
La résistance à la compression du plâtre diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage (eau/plâtre).

La figure (I.16) montre que celle-ci est divisée par 2 lorsque le rapport (E/P) passe de 0,55 à 0,80. Elle montre également que les résistances sont en relation avec la densité. Elles diminuent régulièrement lorsque la teneur en eau augmente.

La figure (I.17) montre que pour une conservation en atmosphère sèche les résistances sont doublées entre 2 heures et 1 jour, quadruplés entre 2 et 7 jours. Après 28 ou 90 jours les résistances n'augmentent pratiquement plus.



**Figure I.16 :** Influence de la quantité d'eau sur les résistances [Papadakis M, (1970)].



**Figure I.17 :** Progression des résistances d'un plâtre dans le temps [Papadakis M, (1970)].

#### IV.3.2.2. Résistance au feu

Sous l'action de la chaleur, le plâtre absorbe une quantité considérable d'énergie calorifique par ses transformations chimiques internes, c'est-à-dire libération puis vaporisation d'une fraction importante de son eau de constitution qui est de l'ordre de 18 à 20% [Festa J, (1995)].

Le plâtre non revêtu, incombustible par nature, est classé lors d'un incendie  $M_0$ . Alors le plâtre est un excellent matériau pour la protection contre l'incendie et la résistance au feu. Le tableau (I.12) montre brièvement les classes des matériaux selon le degré de l'inflammabilité.

**Tableau I.12** : Classes des matériaux selon le degré de l'inflammabilité [Festa J, (1995)].

Catégorie	$M_0$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$
Matériaux	incombustible	Non inflammable	Difficilement inflammable	Moyennement inflammable	Facilement inflammable

#### IV.4. Variétés et normalisations des plâtres

On distingue plusieurs variétés de plâtre qu'on classe en deux grandes familles ; les plâtres courants et les plâtres spéciaux :

##### IV.4.1. Plâtres courants

###### IV.4.1.1. Plâtres de construction

Sont normalisés et classés en fonction de :

- ❖ La granularité.
- ❖ La durée de prise.

On distingue quatre qualités de plâtre :

- ❖ Le plâtre gros de construction, à prise rapide, symbole : **PGC 1**.
- ❖ Le plâtre gros de construction, à prise retardée, symbole : **PGC 2**.
- ❖ Le plâtre fin de construction, à prise rapide, symbole : **PFC 1**.
- ❖ Le plâtre fin de construction, à prise retardée, symbole : **PFC 2**.

Ces plâtres doivent satisfaire aux caractéristiques (normalisation) suivantes :

- a) Finesse par tamisage sur un échantillon de **100 g**, comme elle est désignée au tableau (I.13).

**Tableau I.13** : Finesse des plâtres de construction normalisés [Papadakis M, (1970)].

Tamis		Refus r (en %) de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	PGC	PFC
0.8	30	$5 \leq r < 20$	$r \leq 2$
0.4	27	$20 \leq r < 40$	$r \leq 15$
0.2	24	-	$r \leq 35$

b) Temps de prise, mesuré suivant le processus indiqué dans le tableau (I.14).

**Tableau I.14 :** Temps de prise des plâtres de construction normalisés [Papadakis M, (1970)].

-	Plâtre 1	Plâtre 2
Début de prise (d, en mn)	$3 < d < 8$	$6 < d < 15$
Fin de prise (f, en mn)	$10 < f < 20$	$15 < f < 45$

c) Contraintes minimales en traction par flexion sur éprouvettes prismatiques de (4×4×16cm<sup>3</sup>). Le tableau (I.15) présente les résistances des plâtres normalisés.

**Tableau I.15 :** Résistances des plâtres de construction normalisés [Papadakis M, (1970)].

Essais	Résistance en bars	
	PGC	PFC
2 h en atmosphère humide	3	5
7 j en atmosphère humide	6	10
7 j en atmosphère humide puis séchés à 50% d'humidité relative jusqu'à poids constant.	12	20

#### IV.4.1.2. Plâtres à haute dureté (THD)

Encore appelés plâtres à mouler, ou fleur de plâtre plus purs, plus fins et plus lents à faire prise. Ils sont constitués de surcuits (cuisson jusqu'à 500°). Ils servent en décoration, enduits par projection mécanique.

#### IV.4.1.3. Plâtres pour agglomère

Sont des plâtres grossiers, principalement formés de semi-hydrate. Ils servent ;

- ❖ A confectionner des carreaux de plâtre.
- ❖ A fixer des revêtements de cheminées et des poteries.
- ❖ A effectuer des remplissages de forte épaisseur.

### IV.5. Règlements du plâtre en Algérie

Ces recommandations sont spécifiques à l'Algérie, elles viennent de compléter les règles et les usages du plâtre connus universellement. Ces recommandations sont valables pour les ouvrages construits en blocs de plâtre dont les caractéristiques techniques sont régulières et connues. Sachant que les plâtres utilisés sont des plâtres de construction (PGC, PFC) avec une contrainte de rupture  $R > 40 \text{ kgf/cm}^2$  à l'état sec et à 28 jours. Le tableau (I.16) présente les normes Algériennes sur les plâtres.

Tableau I.16 : Normes Algériennes sur les plâtres [Cherait Y, (2006)].

Références	Intitulé
NA 524	Plâtre - conditions générales des essais.
NA 525	Plâtre - détermination de masse volumique en poudre.
NA 526	Plâtre - détermination des caractéristiques mécaniques.
NA 527	Plâtre - détermination de la finesse de mouture du produit en poudre.
NA 528	Plâtre - détermination de la teneur en eau de cristallisation.

Les constructions en murs porteurs de plâtre ne sont autorisées que pour les ouvrages simples à un ou deux niveaux quel que soit leur usage. Nous mettons dans ce qui suit les conditions d'utilisation et de mise en œuvre de plâtre pur et mortier de plâtre comme étant des produits principaux entrant dans la confection des éléments en plâtre:

#### IV.5.1. Plâtres purs

Toutes les instructions connues sont recommandées par le centre national d'études et de recherche intégrées au bâtiment (**CNERIB**) et préconise en plus, une addition de **2 à 5%** de chaux pour faciliter la mise en œuvre et pour retarder sa prise rapide.

- ❖ Le stockage du plâtre doit se faire en lieu sec dans les silos ou sacs fermés pour éviter qu'il ne soit éventé.

- ❖ Les plâtres de construction ont une composition minéralogique très sensible.

#### IV.5.2. Mortier de plâtre

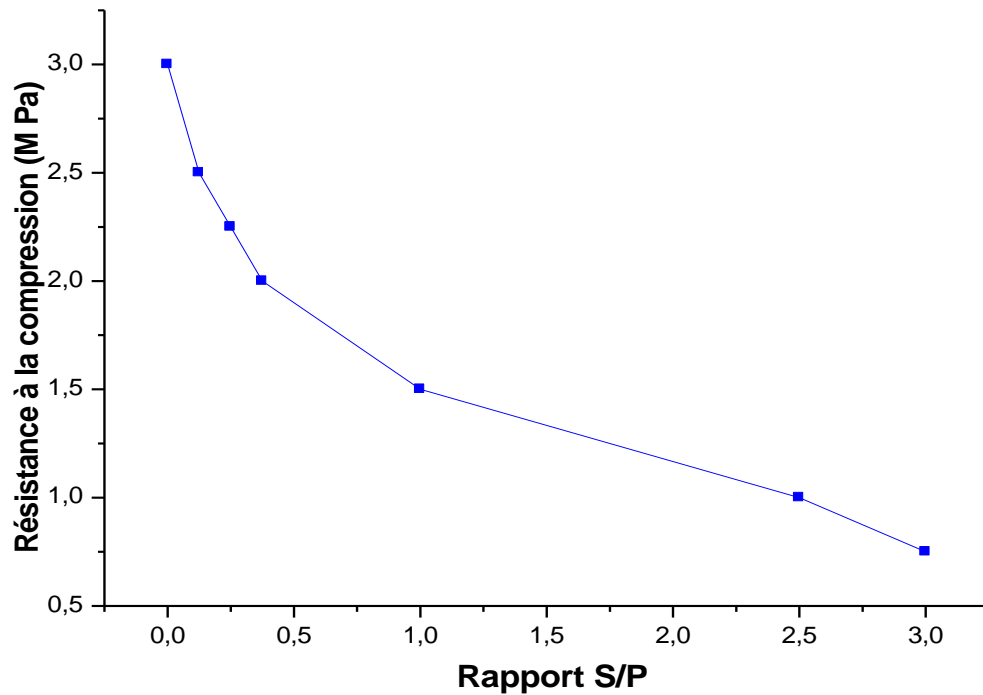
Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogène du plâtre, de sable et d'eau. Le [**CNERIB, (1993)**] recommande les limites des caractéristiques que doit observer, le sable utilisé, il recommande également un mode opératoire pour la confection du mortier de plâtre.

- ❖ Les sables utilisés doivent être propres et exempts de matières gypseuses et de matières organiques.

- ❖ Le sable siliceux doit être préféré au sable calcaire en raison de sa moindre capacité d'absorption d'eau.

- ❖ Il doit être à granulométrie régulière et continue, et contenir un faible pourcentage de fines.

Le graphe de la figure (I.18) donne les résistances de mortier de plâtre en fonction de Sable/Plâtre, avec un rapport (**S/P=0.5**) en poids.



**Figure I.18 :** Influence du rapport S/P sur la résistance à la compression [CNERIB, (1993)].

On remarque sur la figure (I.18) que plus le rapport (S/P) augmente, la résistance diminue ceci être expliquée que l'ajout du sable dunaire change la structure des pores.

## V. Conclusion

En effet l'étude bibliographique nous a permis de faire comprendre les applications des matériaux de génie civil notamment les plâtres dans les domaines du bâtiment, et de faire connaître les comportements des matériaux dite poreux et leurs utilisations lors de la conception ou de la réhabilitation thermique des constructions existantes.

Nous avons eu une idée générale sur les propriétés physiques et mécaniques des plâtres de construction et leurs normalisations nationales ou/et internationales.

Nous avons aussi renforcé notre chapitre par une étude approfondie des copeaux de bois et nous profitons de leurs caractéristiques physiques pour l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment.

Nous notons que l'étude des phénomènes thermiques est superficielle et dirigée vers la simulation des paramètres par l'outil d'informatique.

# CHAPITRE

II

**Caractérisations des matériaux  
et techniques expérimentales**

## I. Introduction

La première partie de ce chapitre est réservée à la caractérisation physico-chimique de différentes matières premières utilisées pour la préparation des composites étudiés, à savoir :

- ☞ Sable de dune ramené de la région nord de la ville de Laghouat.
- ☞ Copeaux de bois issus de déchets de la menuiserie.
- ☞ Plâtre : Spa Oasis Plâtre provenance de la zone industrielle de Bounoura wilaya de Ghardaïa.

Les caractérisations physico-mécaniques sont faites au laboratoire de recherche de génie civil de l'université de Laghouat, contrairement à la caractérisation chimique des copeaux de bois qui a été faite à l'université de Béchar.

Par contre la deuxième partie est consacrée à la présentation descriptive de différentes techniques de mesures expérimentales, ces techniques sont comme suit :

- ☞ Mesure de la porosité accessible à l'éthanol.
- ☞ Variation dimensionnelle.
- ☞ Essais mécaniques.
- ☞ Mesure des propriétés thermo-physiques.

## II. Caractérisation des matériaux utilisés

### II.1. Sable

Le sable est une masse pulvérulente de grains minéraux qu'on l'utilise généralement pour la confection des mortiers de plâtre. Selon sa composition minéralogique, on distingue le sable de quartz, sable de feldspath et le sable de carbonate. Selon sa provenance on distingue le sable naturel et le sable artificiel. Le sable utilisé dans ces études issues de la région nord de la ville de Laghouat est un sable de dune (**SD**). La figure (I.1) présente un échantillon de sable utilisé.



**Figure II.1 :** Echantillon de sable de dune utilisé.

**II.1.1. Caractérisations physiques**

**II.1.1.1. Masse volumique**

**a) Masse volumique absolue**

Selon la norme NF P18-555, c'est la masse de l'unité de volume absolue du corps, c'est-à-dire la matière constituée le corps sans tenir compte du volume des vides. Elle est déterminée par la méthode de l'éprouvette graduée, elle est donnée par la relation :

$$\gamma_s = Ms / Vs \quad \dots\dots\dots (\text{II. 1})$$

- Avec Ms :** Masse d'échantillon.
- Vs :** Volume absolue avec  $Vs=V_2-V_1$ .
- V1 :** Volume initial.
- V2 :** Volume final.

Les mesures sont effectuées sur trois échantillons de sable, les résultats de la masse volumique absolue du sable sont récapitulés dans le tableau (II.1).

**Tableau II.1 :** Résultats de l'essai de la masse volumique absolue du sable.

Essais	Ms (g)	V1 (g)	V2 (g)	Vs (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Moyenne (kg/m <sup>3</sup> )
01	200	300	380	80	2500	<b>2517 ± 24,05</b>
02	250	300	398	98	2551,02	
03	300	300	420	120	2500	

**b) Masse volumique apparente**

C'est la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient. Elle est déterminée par la méthode du récipient standard de volume connu, il s'agit de remplir un volume de 1000 cm<sup>3</sup> et on pèse la masse totale. La masse volumique apparente est donnée par la relation suivante :

$$\rho = M / V \quad \dots\dots\dots (\text{II. 2})$$

- Avec M :** Masse d'échantillon.
- V :** Volume apparent.

Les mesures sont effectuées sur trois échantillons de sable, les résultats de la masse volumique apparente du sable utilisé sont récapitulés dans le tableau (II.2).

Tableau II.2 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente du sable utilisé.

Essais	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Moyenne (kg/m <sup>3</sup> )
01	2396,6	3889	1000	1492,4	<b>1489,4 ± 2,34</b>
02	2396,6	3883,3	1000	1486,7	
03	2396,6	3885,7	1000	1489,1	

**II.1.1.2. Analyse granulométrique**

L'essai est réalisé selon la norme Française NF P18-560. Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. D'une manière générale l'analyse granulométrique d'un matériau a pour but de déterminer les dimensions des grains qui le constituent. La figure (I.2) présente l'analyse granulométrique du sable de dune utilisé.

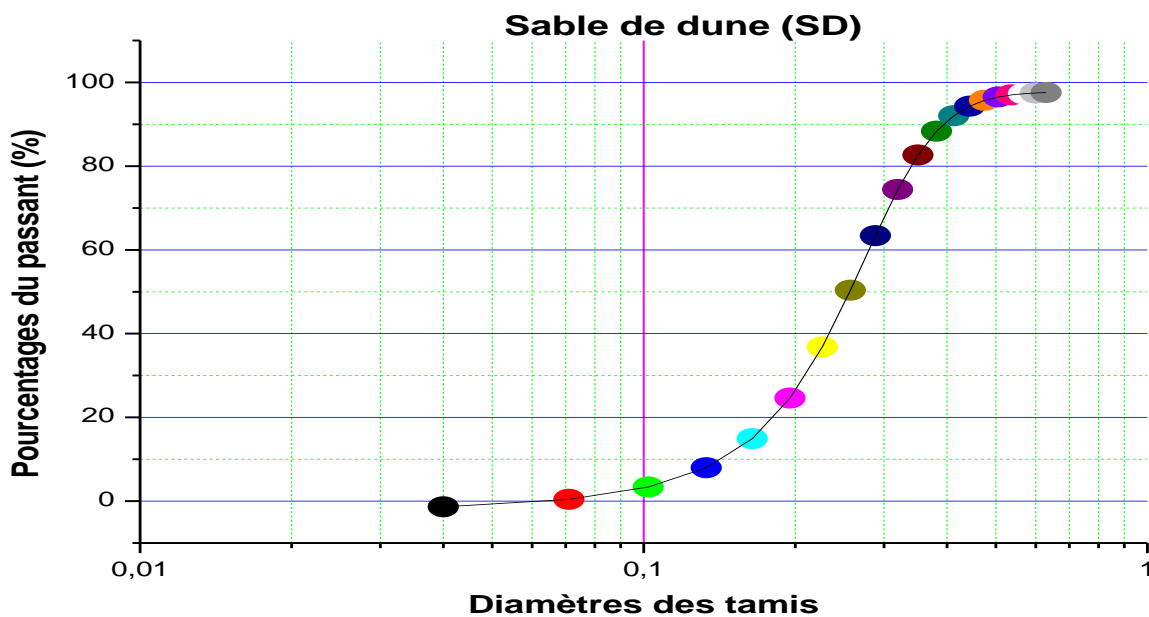


Figure II.2 : Analyse granulométrique de sable de dune (SD).

La courbe granulométrique de sable montre que le sable est d'une granulométrie serrée et continuée.

**II.1.1.3. Module de finesse**

Elle est définie comme étant la somme des refus cumulés et exprimés en pourcentage sur les tamis de la série (0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 3.5 et 5mm). A noter que plus le module de finesse est élevé plus le sable est grossier [Ddreux G, (1995)]. Le module de finesse est donné par la formule suivante :

$$M_f = [\sum \text{des refus (en \%)} \text{ sur les tamis } 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 \text{ et } 5.0] / 10 \dots\dots\dots (\text{II. 3})$$

#### II.1.1.4. Equivalent de sable

Cet essai référencé par la norme NF P18-598, il permet de mettre en évidence la proportion relative de poussières fines ou d'éléments argileux présents dans le sable. Le but de l'essai est l'évaluation de l'indice quantifiant la propreté d'un sable entrant dans la composition du mortier de plâtre. Deux indices sont déterminés : **ES<sub>v</sub>** visuel et **ES<sub>p</sub>** au piston. L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E_S = (h_2 / h_1) \times 100 \quad \dots\dots\dots (\text{II. 4})$$

Avec

**h<sub>1</sub>** : Sable propre + éléments fins.

**h<sub>2</sub>** : Sable propre seulement.

#### II.1.1.5. Compacité et Porosité

C'est le rapport du volume de matière pleine au volume total. Il est défini par la relation.

$$C_p = V_s / V = 1 - p = \rho / \gamma_s \quad \dots\dots\dots (\text{II. 5})$$

Avec

**P** : est la porosité.

**C<sub>p</sub>** : est la compacité.

Le tableau (II.3) regroupe l'ensemble des résultats des essais physiques effectués sur le sable de dune utilisé.

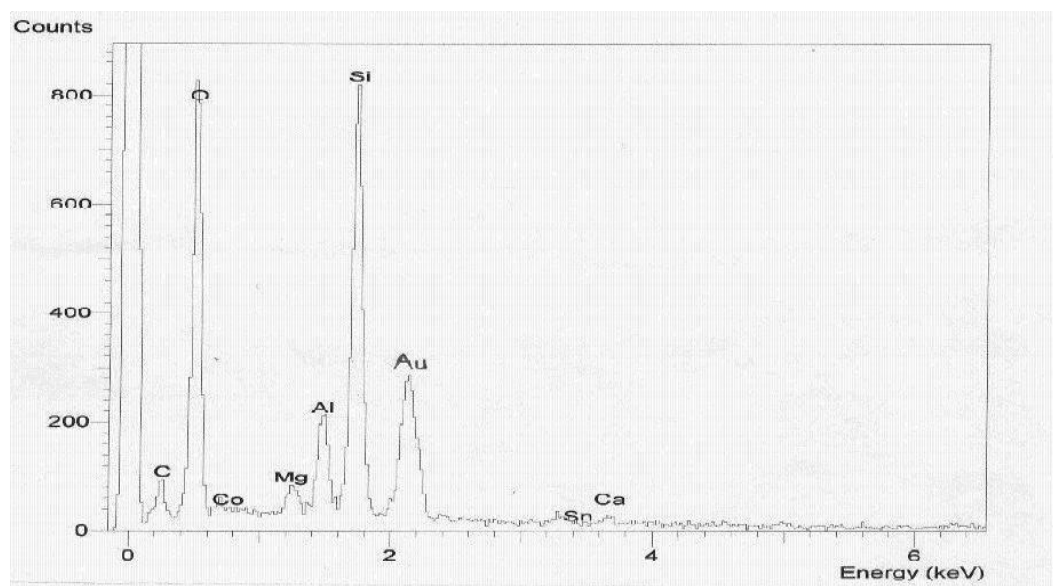
**Tableau II.3** : Caractéristiques physiques du sable de dune.

Caractéristiques	$\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$M_f$	<b>ES<sub>v</sub></b> (%)	<b>ES<sub>p</sub></b> (%)	<b>C<sub>p</sub></b> (%)	<b>P</b> (%)
Sable de dune	2517	1489,4	1,2	86,5	84,2	59	41

#### II.1.2. Caractérisations chimiques

##### a) Diffraction des rayons X (DRX)

D'après [Dakhlaoui R, (2006)] ces techniques ne peuvent être utilisées que pour les matériaux cristallins. La DRX de sable utilisé est faite au laboratoire LTI d'Amiens en France par [Bederina M, (2000)]. Cette analyse révèle la présence prépondérante de l'espèce SiO<sub>2</sub> (silice), ce qui montre que le sable est essentiellement de nature siliceuse. La figure (I.3) présente l'analyse chimique de sable dunaire.



**Figure II.3 :** Analyse chimique de sable dunaire [Bederina M, (2000)].

### b) Analyse chimique

Ces analyses concernent la détermination des proportions des composants organiques contenus dans le sable et la teneur de chacun de ces composants. Cet essai référencé par la norme NF EN 196-2, stipule que ces éléments présents au-delà de certain seuil peuvent être nuisibles. Le tableau (II.4) regroupe les résultats de l'analyse chimique du (SD) utilisé.

**Tableau II.4 :** Analyse chimique du sable de dune.

Désignation	Insolubles (SiO <sub>2</sub> )	Sulfates (SO <sub>3</sub> )	Carbonates (CaCO <sub>3</sub> )	Chlorures
(%)	95,90%	0,89%	2,6%	Traces

Les analyses chimiques montrent que le sable analysé présente un fort pourcentage d'insoluble (SiO<sub>2</sub>), ce qui montre que le matériau est issu d'une roche dure de nature siliceuse.

## II.2. Copeaux de bois

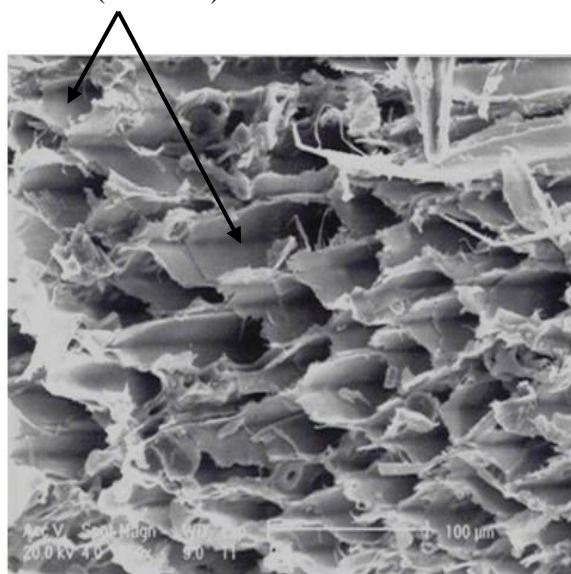
L'idée d'introduire des copeaux de bois vient dans le but de les valoriser et de profiter de certaines de leurs caractéristiques physico-thermiques (allègement, isolation thermique).

La figure (I.4) présente un échantillon des copeaux de bois utilisés. La figure (I.5) présente l'aspect général des copeaux de bois, visualisés par le microscope électronique à balayage.



**Figure II.4 :** Echantillon des copeaux de bois.

Pores (alvéoles)



**Figure II.5 :** Structure poreuse des copeaux de bois [Benmalek M.L, (2000)].

## II.2.1. Caractérisations physiques des copeaux de bois

### II.2.1.1. Masse volumique

#### a) Masse volumique absolue

La masse volumique absolue des copeaux de bois a été assimilée à la masse volumique apparente du bloc massif séché à l'étuve à une température de 60°C pour ne pas modifier les propriétés chimiques et physiques du bois. Les résultats de la masse volumique absolue sont récapitulés dans le tableau (II.5).

**Tableau II.5 :** Résultats de la masse volumique absolue des copeaux de bois.

Essais	M <sub>0</sub> (g)	a×b×c (cm)	V <sub>0</sub> (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Moyenne (kg/m <sup>3</sup> )
01	38,2	6,9×3,3×3,2	72,86	524,29	<b>574,62 ± 35,6</b>
02	47,6	6,9×3,6×3,2	79,48	598,89	
03	46,5	6,9×3,3×3,4	77,41	600,69	

#### b) Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des copeaux de bois est très délicate à déterminer car elle dépend de la granulométrie, de la teneur en eau et l'empilement des copeaux (état lâche ou compacté). Elle est de l'ordre de **133,46 kg/m<sup>3</sup>**.

**II.2.1.2. Capacité d'absorption d'eau**

Cette caractéristique permet la connaissance des quantités d'absorption d'eau de mouillage des copeaux, l'essai a été effectué conformément à la norme NF P18-554. La capacité d'absorption d'eau donnée par la relation suivante :

$$C_{ab} \text{ (en \%)} = [(M_h - M_s) / M_s] \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{(II. 6)}$$

Avec

$M_s$  : Masse des copeaux secs (en kg)

$M_h$  : Masse des copeaux après immersion pendant au moins 48 h (en kg)

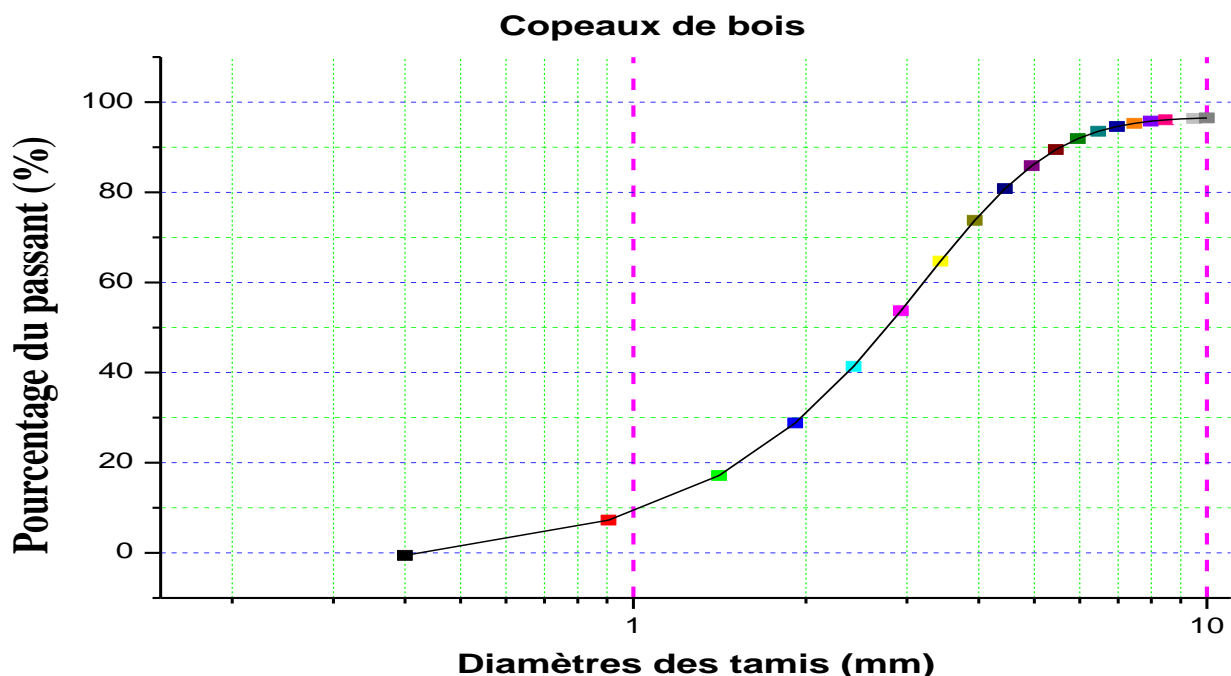
Les résultats de coefficient d'absorption en eau ( $C_{ab}$ ) récapitulés dans le tableau (II.6)

**Tableau II.6 :** Coefficient d'absorption des copeaux de bois.

Essais	$M_s$ (g)	$M_h$ (g)	$C_{ab}$ (%)	Moyenne (%)
01	40	172	330	<b>375 ± 36,75</b>
02	30	156	420	
03	35	166	374	

**II.2.1.3. Analyse granulométrique**

Les copeaux de bois utilisés dans cette étude proviennent des déchets résultants des travaux de rabotage et de défonçage de la menuiserie. La figure (I.6) présente l'analyse granulométrique des copeaux de bois.



**Figure II.6 :** Analyse granulométrique des copeaux de bois.

D'après la figure (I.6) on remarque que la courbe granulométrique des copeaux de bois est d'une granulométrie serrée et continuée, avec une limite granulométrique supérieure est voisine de 10 mm et une limite granulométrique inférieure voisine de 0,4mm.

### II.2.2. Caractérisation chimique des copeaux de bois

La composition chimique du bois est complexe. Une première distinction peut être faite entre les principaux composants macromoléculaires des parois cellulaires et ceux minoritaires à bas poids moléculaires tels que les substances minérales et extractibles.

L'Analyse des matières organiques des copeaux de bois (Sapin) a été effectuée au laboratoire de biologie de l'université de Béchar et la description de la méthode est présentée dans l'annexe (01). Les résultats sont récapitulés dans le tableau (II.7).

**Tableau II.7 :** Principaux constituants organiques des copeaux de bois.

composants	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Cendre	Substance protéique
Pourcentage (%)	48,2	20,5	26,9	0,66	0,6

Les analyses chimiques montrent que les copeaux de bois analysés présentent un fort pourcentage de cellulose, elle est le constituant majoritaire du bois 48,2%, ce qui prouve que le Sapin est une essence résineuse.

### II.3. Plâtre

Le plâtre utilisé est commercialisé par l'usine «Spa Oasis Plâtre-Ghardaïa» de la zone industrielle de Bounoura wilaya de Ghardaïa, il est très disponible dans le marché dans des sacs de 40kg. La figure (II.7) présente un sac du plâtre utilisé dans ce travail.



**Figure II.7 :** Sac du plâtre utilisé.

### II.3.1. Caractérisations physiques

#### II.3.1.1. Masse volumique

##### a) Masse volumique absolue

Elle est mesurée par la méthode de déplacement de l'éthanol absolu en utilisant le densimètre Le Chatelier [Degallaix S, (2007)]. La masse volumique absolue est déterminée par la relation :

$$\gamma_s = (M_2 - M_1) / (V_2 - V_1) \quad \dots\dots\dots (II. 7)$$

**Avec**  $M_1$  : Masse de (cellule + éthanol absolu)

$M_2$  : Masse de (cellule + éthanol absolu + plâtre (M=60g)).

$V_1$  : Volume initial du liquide (l'éthanol absolu).

$V_2$  : Volume final du liquide (après l'introduction du plâtre)

La masse volumique absolue du plâtre utilisé est de **2577,58 kg/m<sup>3</sup>**, cette valeur est en accord avec les travaux de techniques de l'ingénieur [Daligand D, (2004)].

##### b) Masse volumique apparente

Elle est déterminée par la méthode de récipient standard de volume connu, les résultats récapitulés dans le tableau (II.8).

**Tableau II.8** : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente du plâtre.

Essais	M <sub>0</sub> (g)	M <sub>1</sub> (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Moyenne (kg/m <sup>3</sup> )
<b>01</b>	2396,6	3236,6	1000	840	<b>838,93 ± 1,87</b>
<b>02</b>	2396,6	3232,9	1000	836,3	
<b>03</b>	2396,6	3237,1	1000	840,5	

#### II.3.1.2. Surface spécifique de Blaine

Le plâtre se présente sous forme de poudre broyée, cette finesse est une caractéristique importante lors du gâchage. Plus la surface du plâtre en contact avec l'eau est grande, plus l'hydratation est complète et rapide. De plus, si la surface spécifique du plâtre est grande, plus la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation est grande et plus la porosité diminue.

La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique est la perméabilimètre de Blaine, elle ne détermine pas les dimensions des grains, mais donne une grandeur qui dépend de l'air massique ou volumique (ancienne appellation : surface spécifique) qui est le total des aires

des grains contenus dans l'unité de masse ou de volume. La figure (II.8) présente le dispositif expérimental de Blaine au laboratoire de recherche de génie civil (LRGC).

Le principe est la détermination du temps de passage à travers une certaine quantité du plâtre (3g), d'une certaine quantité d'air dans des conditions déterminées. Elle a été déterminée selon les prescriptions de la norme EN V 196-6 et exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Elle est calculée à l'aide de l'expression suivante :

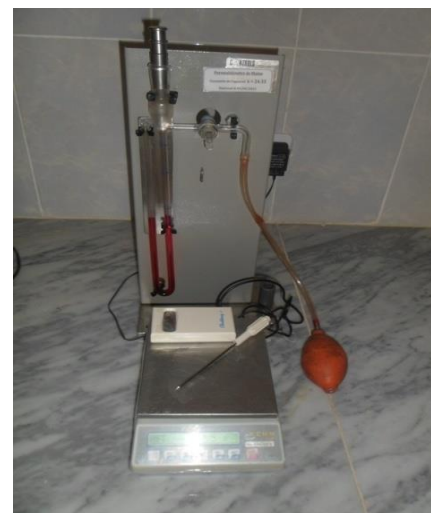


Figure II.8 : Appareil de Blaine de LRGC Laghouat.

$$A = k \cdot \sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t} / \gamma_s (1 - e) \cdot \sqrt{\eta} \quad \dots\dots\dots (\text{II. 8})$$

**Avec K :** Constante de l'appareil (k=43).

**e :** Porosité.

**$\gamma_s$  :** Masse volumique absolue du plâtre.

**N :** Viscosité dynamique de l'air, à la température de l'expérience.

La surface spécifique du plâtre utilisé est **2533,27  $\text{cm}^2/\text{g}$** .

D'après [Papadakis M, (1970)] la surface spécifique des plâtres fins de construction compris entre **2500 à 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$** . On affirme que notre plâtre peut être considéré comme plâtre fin de construction.

**II.3.1.3. Finesse de mouture**

L'essai est ainsi effectué à l'aide des tamis d'ouverture 0,8/0,4/0,2mm selon les prescriptions de la norme NF B 12-401. Les résultats récapitulés dans le tableau (II.9), sont calculés par la formule :

$$F = (M_1 / M_2) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (\text{II. 9})$$

**Avec  $M_1$  :** Masse de refus du plâtre sur le tamis (g).

**$M_2$  :** Masse d'échantillon (g) avec  $M_2=100\text{g}$ .

**Tableau II.9** : Détermination de la finesse du plâtre normalisée

Tamis		Refus $r$ (en %) de la masse initiale	
Module	Ouverture (mm)	Essai-01	Essai-02
30	0,8	1,6	1,3
27	0,4	8,8	6,6
24	0,2	34,9	26,5

D'après les résultats obtenus, notre plâtre est un plâtre fin de construction de symbole **PFC** [Papadakis M, (1970) et Cherait Y, (2006)].

#### II.3.1.4. Consistance normale

Le but de l'essai est la détermination précisée de la quantité optimale d'eau de gâchage. D'après [Papadakis M, (1970) et Hamida M.L, (2010)], la consistance normale de plâtre (E/P) varie entre (0,3 à 0,6). Elle est approuvée expérimentalement par [Djoudi A, (2002), (2009)] et [Hafsi F, (2010)]. Nous considérons que le rapport en masse d'eau sur plâtre est de **(E/P=0,6)**.

#### II.3.1.5. La prise

Lorsqu'on mélange une poudre du plâtre avec de l'eau il se forme une pâte molle que l'on travaille, mais au bout d'un certain temps sa viscosité augmente brutalement, la durée de prise est généralement caractérisée par :

❖ **Début de prise** : C'est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre plus jusqu'au fond du moule.

❖ **Fin de prise** : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre dans la pâte.

L'essai est réalisé à l'aide de l'aiguille de Vicat, elle a été déterminée selon les prescriptions de la norme EN 196-3. Les résultats sont donnés dans le tableau (II.10).

**Tableau II.10** : Temps de prise du plâtre normalisé.

Début de prise (mn)	Fin de prise (mn)	Temps de prise (mn)
3min 30sec	11min 05sec	7min, 35sec

D'après le tableau (II.10) le plâtre utilisé est un plâtre fin de construction, à prise rapide et de symbole **PFC 1** [Papadakis M, (1970) et Cherait Y, (2006)].

### II.3.2. Caractérisations mécaniques

#### II.3.2.1. Résistances mécaniques

Dans le cadre de notre travail, nous avons entrepris des essais à la compression, flexion sur une presse hydraulique. Les échantillons testés sont des éprouvettes de forme prismatique de  $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$  avec des rapports (E/P) différents. L'essai a été fait conformément à la norme NF P 18-407 et les résultats sont donnés dans le tableau (II.11) et dans l'annexe (02).

**Tableau II.11** : Résistances mécaniques du plâtre.

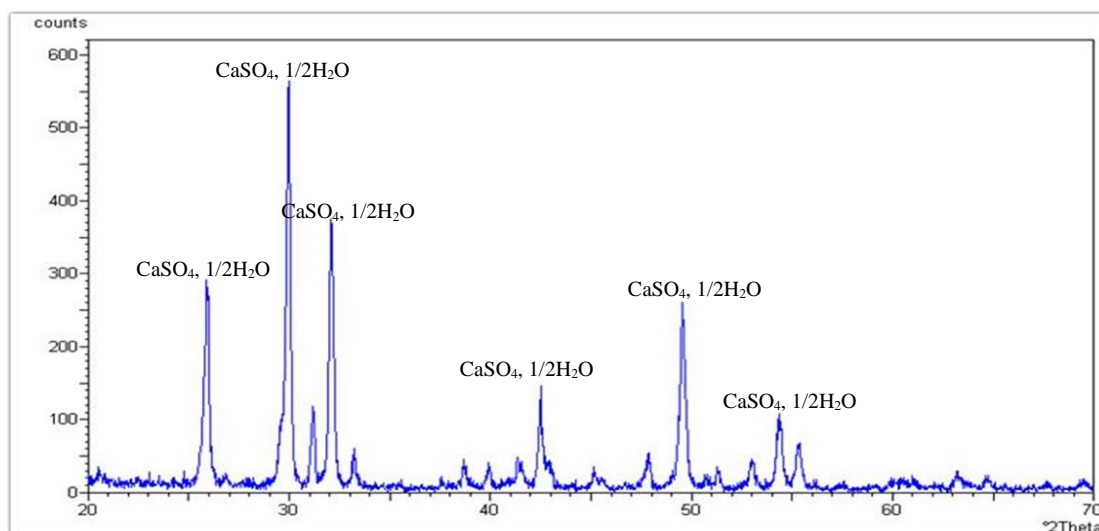
Résistance E/P	R <sub>compression</sub> (MPa)			R <sub>flexion</sub> (MPa)		
	3j	7j	28j	3j	7j	28j
<b>0,4</b>	5,48 ± 0,34	5,97 ± 0,63	11,63 ± 1,82	3,20 ± 0,16	3,76 ± 0,16	6,83 ± 0,38
<b>0,5</b>	3,68 ± 0,43	4,11 ± 0,55	9,44 ± 0,43	2,03 ± 0,06	2,24 ± 0,27	5,40 ± 0,67
<b>0,6</b>	<b>2,36 ± 0,17</b>	<b>2,78 ± 0,11</b>	<b>7,86 ± 1,15</b>	<b>1,70 ± 0,12</b>	<b>1,98 ± 0,12</b>	<b>4,21 ± 0,07</b>
<b>0,7</b>	1,30 ± 0,08	1,63 ± 0,12	4,37 ± 0,34	1,07 ± 0,04	1,26 ± 0,02	2,26 ± 0,13

Le tableau (II.11) montre que les résistances mécaniques du plâtre évoluent avec le temps jusqu'à l'âge de 28 jours et décroît pour des rapports (E/P) élevée.

### II.3.3. Caractérisations chimiques

#### II.3.3.1. Diffraction des rayons X (DRX)

La figure (II.9) présente le diffractogramme du plâtre utilisé.



**Figure II.9** : Diffractogramme du plâtre utilisé.

Le résultat de DRX sur une fraction du plâtre indique une dominance de sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$ , avec quelques traces en autres éléments non identifiés. D'après les littératures, le ( $\text{CaSO}_4$ ) est l'élément essentiel qui rentre dans la composition du plâtre.

### II.3.3.2. Analyse chimique

L'analyse chimique, du plâtre utilisé, effectuée dans l'usine afin de déterminer la composition du plâtre et la teneur de chaque composant dans le plâtre fabriqué. Les résultats obtenus sont reportés sur la fiche technique du plâtre, et donnés dans le tableau (II.12).

**Tableau II.12 :** Analyse chimique du plâtre utilisé.

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Pourcentage (%)	0,28	0,1	0,01	34,03	1,75	40,45	0,06	0,05	0,01

D'après le tableau (II.12), nous remarquons que le plâtre utilisé contient des pourcentages appréciables de (SO<sub>3</sub>) et de (CaO). Ce qui confirme que le constituant le plus essentiel dans le plâtre utilisé est le sulfate de calcium.

### II.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage du plâtre est l'eau potable du robinet du LRGC et doit être conforme à la norme NF P 18-303. Cette eau joue un rôle très important dans l'hydratation du liant mouillage des granulats, malaxage et facilité de mise en œuvre. En général, la résistance est en fonction du rapport (E/P). L'analyse chimique de cette eau est effectuée au laboratoire de l'EPDEMIIA de Laghouat indiquant que c'est une eau de potabilité chimique passable avec un pourcentage élevé de sulfates. L'analyse chimique de l'eau de gâchage est regroupée dans le tableau (II.13)

**Tableau II.13 :** Analyse chimique de l'eau de gâchage.

Composition chimique		Balance ionique (m.éq/l)		
Ca <sup>2+</sup> en mg/l	119,04	Balance Cations	5,94	
Mg <sup>2+</sup> en mg/l	32,93		2,71	
Na <sup>+</sup> en mg/l	144,90		6,30	
K <sup>+</sup> en mg/l	5,69		0,14	
Cl <sup>-</sup> en mg/l	169,96	Balance Anions	4,49	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> en mg/l	420		8,75	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en mg/l	153,80		2,52	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en mg/l	11,07		0,18	
Résidu sec à 110°C 1172mg/l	PH 7,77	Condition en 1/10mm à 25°C 16,30		Dureté totale 43,25
Test chlore (ml d'eau de Javel à 15°/m <sup>3</sup> ) 0,30ml/m		T.A.C 12,60	S.A.F 67,70	I.S 45,05
Minéralisation 1010,60	M.O milieu Acide En O <sub>2</sub> 8,53	SiO <sub>2</sub> 4,45mg/l		Somme des ions 1057,40
Cations	Ca <sup>2+</sup> =39,34%	Mg <sup>2+</sup> =18%		Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> =43,01%
Anions	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> = 15,5%	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> = 53,8%		Cl <sup>-</sup> +NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> = 30,6%

**III. Techniques de mesure expérimentales :**

**III.1. Porosité accessible à l'éthanol**

Il s'agit d'un essai assez simple conformément à la norme ASTM C642, et consiste à:

- ❖ Sécher l'échantillon à l'étuve à 103°C, jusqu'à masse constante (pendant au moins 24 heures) notée la masse ( $M_s$ ).
- ❖ Immerger l'échantillon dans une casserole d'éthanol et chauffer jusqu'à ébullition. L'échantillon reste immergé pendant 5 heures, ensuite essuyé et peser. Soit ( $M_h$ ) sa masse. La porosité accessible à l'éthanol est déterminée par la relation suivante :

$$P(\%) = (M_h - M_s) / (M_h) \dots\dots\dots (II. 10)$$

**III.2. Variation dimensionnelle**

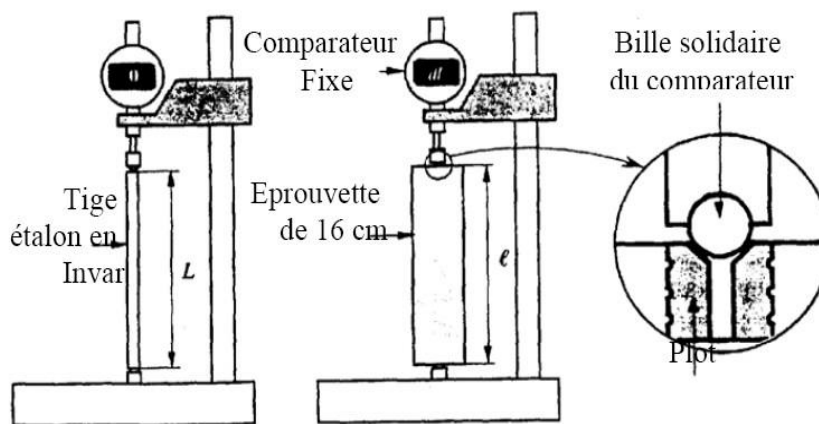
Il s'agit de mesurer le retrait et le gonflement sur des éprouvettes 4x4x16 cm<sup>3</sup> à l'aide de l'appareil de retrait, présenté dans la figure (II.10).

Après démoulage, l'éprouvette est placée verticalement entre deux billes de l'appareil. Les valeurs du retrait ou du gonflement sont lues sur le comparateur placé sur l'éprouvette. On lit au premier jour la valeur ( $l_0$ ) correspondante à la valeur de référence, la mesure suivante effectuée au temps (t) étant  $l(t)$ . Le retrait ou le gonflement enregistré au temps (t) est donné par la relation suivante :

$$\epsilon(t) = l(t) - l_0 / l_0 \dots\dots\dots (II. 11)$$

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

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



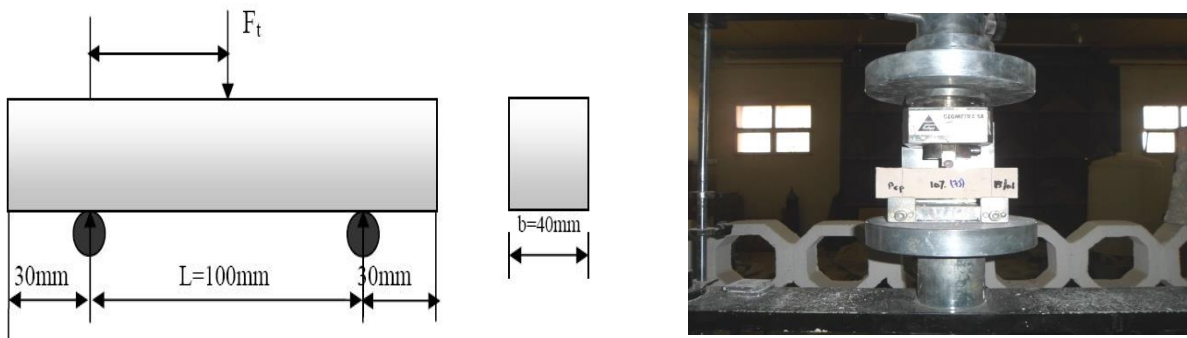
**Figure II.10 :** Dispositif de mesure de retrait [Dupain R, (1995)].

### III.3. Essais mécaniques

Il s'agit de l'essai de flexion à trois points et l'essai de compression. Les essais sont réalisés, selon la norme EN 196-1, sur les échantillons élaborés utilisant un appareil d'essai mécanique de marque "CONTROLS" de charge maximale de 100 KN. La valeur de la charge de rupture est lue directement sur le fichier résultat.

#### III.3.1. Essai de rupture par flexion

L'essai de flexion 3 points est effectué sur des prismes de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  avec une vitesse de mise en charge de  $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ . Le résultat pris est la moyenne de trois essais. La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif présenté sur la figure (II.11).



**Figure II.11** : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion [Dupain R, (1995)].

La résistance à la rupture par flexion est donnée au moyen de la formule suivante :

$$R_f = 1,5 \cdot F_f \cdot L / b^3 \quad \dots\dots\dots \text{(II. 12)}$$

**L** : Distance entraxe des rouleaux d'appuis de l'éprouvette  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  ( $L = 100 \text{ mm}$ )

**$R_f$**  : Résistance à la flexion en **MPa**.

**$F_f$**  : Charge à la rupture en **N**.

**b** : Largeur de la section carrée du prisme en **mm** ( $b = 40 \text{ mm}$ ).

#### III.3.2. Essai de rupture par compression

L'essai consiste à comprimer jusqu'à écrasement un échantillon du matériau étudié. Les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uniaxiale sur le bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de  $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ .

L'augmentation de la charge d'écrasement se fait automatiquement et la force de rupture est affichée sur l'écran de l'appareil où l'on effectue la lecture en KN. L'essai de compression est présenté dans la figure (II.12).

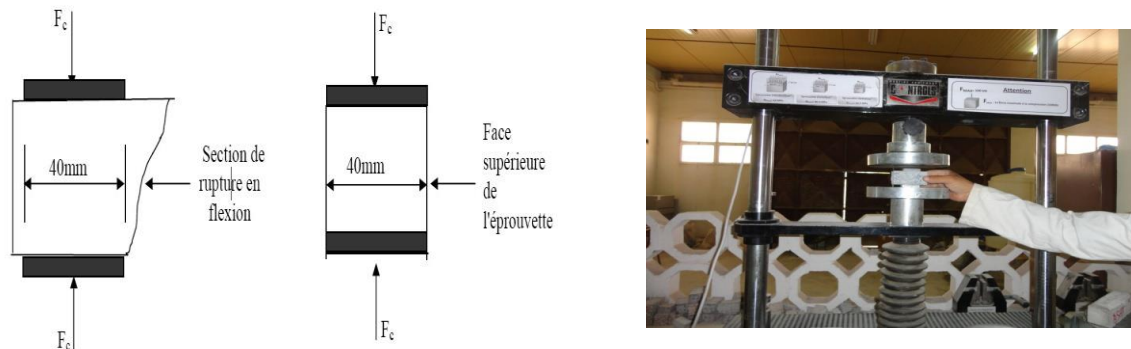


Figure II.12 : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression [Dupain R, (1995)].

La résistance à la compression est donnée par la relation suivante :

$$R_c = F_c / b^2 \quad \dots\dots\dots(II.13)$$

Avec  $R_c$  : Résistance à la compression en MPa.

$F_c$  : Charge à la rupture en N.

$A$ : L'aire des plaques auxiliaires en  $mm^2$  ( $1600 \text{ mm}^2$ ).

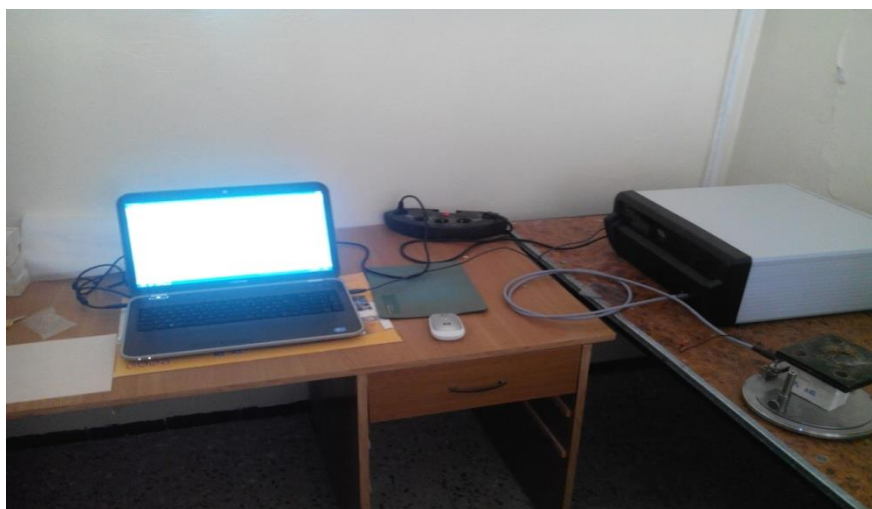
### III.4. Mesure des propriétés thermo-physiques

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou plusieurs types d'échange thermique. Elles expriment le comportement du matériau soumis aux transferts stationnaires ou dynamiques.

Le dispositif utilisé pour la caractérisation thermique fonctionnant sur le principe de la Technologie TPS. Il effectue des mesures précises de la conductivité, de la diffusivité et de la capacité thermique en une seule manipulation. Le dispositif de mesure des propriétés thermique est présenté dans la figure (II.13).

#### III.4.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau [www.thermoconcept-sarl.com].



**Figure II.13 :** Dispositif pour l'essai de caractérisation thermique au LRGC de Laghouat.

#### **IV. Conclusion**

Les résultats obtenus lors de la caractérisation des matériaux utilisés montre que :

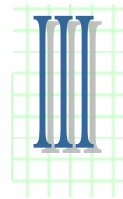
- Le sable dunaire analysé est d'une granulométrie serrée et continué avec une présence intensive de l'espèce ( $\text{SiO}_2$ ) d'environ de **95,90%**, ce qui prouve la nature siliceuse du sable utilisé.

- Les copeaux de bois utilisés sont caractérisés par une masse volumique apparente ( $\rho$ ) très faible et une capacité d'absorption élevée qui dépasse 100% (environ de **375%**) ; ce qui exige de penser au traitement des copeaux de bois avant les utiliser. L'analyse chimique des copeaux de bois montre que le bois analysé présente un fort pourcentage de cellulose (**48,2%**) ; ce qui montre que le bois utilisé est une essence résineuse.

- Le plâtre utilisé est d'une masse volumique absolue ( $\gamma_s$ ) égale à **2577,58 kg/m<sup>3</sup>**, ce qui prouve que notre plâtre est un semi-hydrate  $\beta$  qui est produit par déshydratation du gypse par voie sèche (la plus utilisée, car moins coûteuse). La valeur de la masse volumique est en accord avec les travaux de [**Daligand D, (2004)** et **Hafsi F, (2010)**].

- L'étude de la finesse de mouture et de la prise montre que notre plâtre est un plâtre fin de construction a pris rapide noté par **PFC 1**.

# CHAPITRE



**Formulation et caractérisation  
physico-mécanique des composites étudiés**

## **I. Introduction**

Les matériaux étudiés dans ce chapitre sont des composites à base de plâtre, sable de dune, et copeaux de bois dont la résistance mécanique est assurée par la matrice de plâtre et l'isolation est assurée par les copeaux de bois.

La formulation des composites élaborés dans cette étude est basée sur des méthodes inspirées des travaux expérimentaux effectués en 2010 par [Hafsi F, (2010)] et par [Djoudi A, (2002)] depuis 2000 à nos jours.

En deuxième lieu, on va étudier les propriétés physico-mécaniques des composites élaborés.

## **II. Formulation des composites**

L'absence d'une méthode universelle pour la formulation des compositions à base de plâtre nous a conduit à suivre les recommandations pour la construction en plâtre donnée par le [CNERIB, (1993) et Djoudi A, (2002 et 2009)].

- Tout d'abord on fixe le taux de gâchage à saturation du plâtre  $E/P = 0,60$ .
- On fixe le rapport  $(S/P = 0,5)$  en poids.
- Laisser les copeaux de bois, dans de l'eau (24h) pour réduire l'absorption d'eau des granulats de bois.
- Nous avons considéré que tous les pourcentages (Eau, Copeaux de bois, Sable) sont par rapport à la quantité du plâtre de la composition concernée. On donne les compositions suivantes :
  - **Composition 1** : (témoin), Pâte pure en plâtre, avec un rapport  $(E/P=0,6)$  noté **P<sub>réf</sub>**.
  - **Composition 2** : Pâte pure en plâtre avec ajouts de copeaux de bois de granulométrie 3/8 et de teneurs de 10% à 50% avec un pas de 10%, noté **P<sub>cp</sub> (10%)** à **P<sub>cp</sub> (50%)**.
  - **Composition 3** : Mortier de plâtre avec différents pourcentages du sable dunaire, 25%, 50%, 75% avec un pas de 25%. Ce mortier est noté **Ps (25%)**, **Ps (50%)** et **Ps (75%)**.
  - **Composition 4** : Constitué de plâtre avec **50%** de sable dunaire, et différent pourcentage de copeaux de bois de 10% à 50%, avec un pas de 10% noté **Ps-<sub>cp</sub> (10%)** à **Ps-<sub>cp</sub> (50%)**.

### III. Mise en œuvre des composites et confection des éprouvettes

Une fois le taux de gâchage fixé, nous avons procédé à la confection des échantillons et la mise en œuvre de chaque composition et présentée ci-dessous :

#### III.1. Composition (1) : Plâtre pur ( $P_{réf}$ )

- 1- Préparation des moules (nettoyage, huilage, serrage).
- 2- Peser les quantités totales nécessaires pour la composition (plâtre, eau).
- 3- Introduire la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur avec ( $E/P=0,6$ ).
- 4- Introduire la quantité du plâtre.
- 5- Malaxage des composants durant 30 secondes.
- 6- Mettre la composition dans les moules.
- 7- Démoulage et conservation des échantillons sous les conditions climatiques du laboratoire de génie civil ( $T^{\circ}=20^{\circ}C$ ,  $HR=65\%$ ).

Les résultats de la formulation plâtre pur ( $P_{réf}$ ) sont illustrés sur le tableau (III.1).

**Tableau III.1 : Compositions pondérales de la composition plâtre pur ( $P_{réf}$ ).**

Composition	Masse du plâtre (g)	Eau de gâchage (g).
$P_{réf}$	985,5	591,3

#### III.2. Composition (2) : Plâtre + Copeaux de bois ( $P_{cp}$ )

- 1- Préparation des moules (nettoyage, huilage, serrage).
- 2- Peser les quantités totales nécessaires pour la composition (eau, copeaux de bois, plâtre).
- 3- Introduire la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur avec ( $E/P=0,6$ ).
- 4- Introduire la quantité de copeaux de bois dans le récipient avec des rapports variable de (10%, 20%, 30%,40%, 50%) par rapport à la quantité du plâtre.
- 5- Introduire la quantité de plâtre.
- 6- Malaxage des composants durant **30 sec** [ $P_{cp}$  (10%),  $P_{cp}$  (20%)], **25 sec** [ $P_{cp}$  (30%),  $P_{cp}$  (40%)], **20 sec** [ $P_{cp}$  (50%)].
- 7- Mettre la composition dans les moules.
- 8- Démoulage et conservation des échantillons sous les conditions climatique du laboratoire de génie civil ( $T^{\circ}=20^{\circ}C$ ,  $HR=65\%$ ).

Les résultats de la formulation plâtre + copeaux de bois ( $P_{cp}$ ) sont illustrés sur le tableau (III.2).

**Tableau III.2 : Compositions pondérales de la composition plâtre + copeaux de bois.**

Teneurs en copeaux (%)	Composition	Masse du plâtre (g)	Masse des copeaux de bois (g)	Eau de gâchage (g)
<b>0</b>	<b><math>P_{réf}</math></b>	<b>985,5</b>	<b>0</b>	<b>591,3</b>
<b>10</b>	$P_{cp}$ (10%)	790	79	474
<b>20</b>	$P_{cp}$ (20%)	785	157	471
<b>30</b>	$P_{cp}$ (30%)	775	232,5	465
<b>40</b>	$P_{cp}$ (40%)	765	306	459
<b>50</b>	$P_{cp}$ (50%)	755	377,5	453

### III.3. Composition (3) : Plâtre + Sable (Ps)

- 1- Préparation des moules (nettoyage, huilage, serrage).
- 2- Peser les quantités totales nécessaires pour la composition (eau, plâtre-sable)
- 3- Introduire la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur avec ( $E/P=0,6$ ).
- 4- Introduire la quantité du mélange (plâtre + 25% sable, plâtre + 50% sable, plâtre + 75% sable) dans le récipient.
- 5- Malaxage des composants durant 30 secondes.
- 6- Mettre la composition dans les moules.
- 7- Démoulage et conservation des échantillons sous les conditions climatiques du laboratoire de génie civil ( $T^{\circ}=20^{\circ}C$ ,  $HR=65\%$ ).

Les résultats de la formulation plâtre + sable dunaire ( $P_s$ ) sont illustrés sur le tableau (III.3).

**Tableau III.3 : Compositions pondérales de la composition plâtre + sable dunaire.**

Teneurs en sable (%)	Composition	Masse du plâtre (g)	Masse du sable (g)	Eau de gâchage (g)
<b>0</b>	<b><math>P_{réf}</math></b>	<b>985,5</b>	<b>0</b>	<b>591,3</b>
25	$P_s$ (25%)	980	245	588
50	$P_s$ (50%)	980	490	588
75	$P_s$ (75%)	980	735	588

Les pourcentages de sable dunaire (25%, 50%, 75%) sont toujours par rapport à la quantité de plâtre, mais pour faciliter le malaxage, nous avons mélangé la quantité de plâtre (980g) avec les pourcentages correspondants (245g, 490g, 735g)

**III.4. Composition (4) : Plâtre + (50%) Sable + Copeaux de bois (Ps-cp)**

- 1- Préparation des moules (nettoyage, huilage, serrage).
- 2- Peser les quantités totales nécessaires pour la composition (eau, copeaux de bois, plâtre-sable).
- 3- Introduire la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur avec **(E/P=0,6)**.
- 4- Introduire la quantité de copeaux de bois dans le récipient avec des rapports variables de (10%, 20%, 30%,40% et 50%) par rapport à la quantité initiale du plâtre.
- 5- Introduire la quantité du mélange (plâtre + 50% sable) dans le récipient.
- 6- Malaxage des composants durant **30 sec** [Ps-cp (10%), Ps-cp (20%)], **25 sec** [Ps-cp (30%)], **20 sec** [Ps-cp (40%), Ps-cp (50%)].
- 7- Mettre la composition dans les moules.
- 8- Démoulage et conservation des échantillons sous les conditions climatiques du laboratoire de génie civil (T°=20°C, HR=65%). Les résultats de la formulation plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois **(Ps-cp)** sont illustrés sur le tableau (III.4).

**Tableau III.4 : Compositions pondérales de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.**

Teneurs en copeaux (%)	Composition	Masse du plâtre (g)	Masse du sable (g)	Masse des copeaux de bois (g)	Eau de gâchage (g)
<b>0</b>	<b>Ps (50%)</b>	<b>980</b>	<b>490</b>	<b>0</b>	<b>588</b>
<b>10</b>	Ps-cp (10%)	660	330	66	396
<b>20</b>	Ps-cp (20%)	640	320	128	384
<b>30</b>	Ps-cp (30%)	620	310	186	372
<b>40</b>	Ps-cp (40%)	600	300	240	360
<b>50</b>	Ps-cp (50%)	580	290	290	348

**IV. Etude des propriétés physiques**

**IV.1. Masse volumique apparente**

La masse volumique apparente des composites à l'état durci est déterminée expérimentalement en utilisant la relation suivante :

$$\gamma_{app} = M / V \dots\dots\dots (III. 1)$$

**Avec M :** Masse de l'éprouvette 4x4x16cm<sup>3</sup> déterminé par pesée.

**V :** Volume de l'éprouvette déterminé par mesure de ses dimensions.

La variation de la masse volumique apparente des composites à l'état durci en fonction des constituants (copeaux de bois, sable dunaire) et de l'âge des éprouvettes est regroupée dans les tableaux (III.5), (III.6) et (III.7).

**Tableau III.5 : Variation de la masse volumique pour la composition plâtre + copeaux de bois.**

Teneur en copeaux	Composition (kg/m <sup>3</sup> )	Age en jours				
		3j	7j	14j	21j	28j
<b>0</b>	<b>P<sub>réf</sub></b>	<b>1480,52±5,83</b>	<b>1319,65±32,26</b>	<b>1222,39±21,24</b>	<b>1163,41±5,60</b>	<b>1162,49±5,96</b>
<b>10</b>	P <sub>cp</sub> (10%)	1410,80±6,64	1246,09±26,25	1116,79±2,83	1043,22±2,26	1042,60±2,55
<b>20</b>	P <sub>cp</sub> (20%)	1373,04±15,38	1200,51±26,32	1068,87±29,70	991,14±2,48	990,75±43,14
<b>30</b>	P <sub>cp</sub> (30%)	1260,41±33,84	1125,64±43,54	974,73±35,38	887,49±8,58	886,32±8,46
<b>40</b>	P <sub>cp</sub> (40%)	1214,18±23,13	1055,33±41,10	875,12±8,77	809,37±8,68	808,98±8,81
<b>50</b>	P <sub>cp</sub> (50%)	1118,48±21,71	955,72±38,22	849,60±32,57	782,57±15,90	775,12±21,25

**Tableau III.6 : Variation de la masse volumique pour la composition plâtre + sable dunaire.**

Teneur en sable	Composition (kg/m <sup>3</sup> )	Age en jours				
		3j	7j	14j	21j	28j
<b>0</b>	<b>P<sub>réf</sub></b>	<b>1480,52±5,83</b>	<b>1319,65±32,26</b>	<b>1222,39±21,24</b>	<b>1163,41±5,60</b>	<b>1162,49±5,96</b>
25	Ps (25%)	1611,32±48,40	1429,68±55,04	1282,68±11,00	1266,79±3,07	1266,40±3,14
50	Ps (50%)	1679,68±11,05	1514,97±45,45	1392,05±8,11	1364,84±5,91	1364,45±5,91
75	Ps (75%)	1815,09±11,54	1669,26±25,23	1485,41±12,24	1477,08±10,3	1476,95±10,5

**Tableau III.7 : Variation de la masse volumique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.**

Teneurs en copeaux	Composition (kg/m <sup>3</sup> )	Age en jours				
		3j	7j	14j	21j	28j
<b>0</b>	<b>Ps (50%)</b>	<b>1679,68±11,05</b>	<b>1514,97±45,45</b>	<b>1392,05±8,11</b>	<b>1364,84±5,91</b>	<b>1364,45±5,91</b>
<b>10</b>	Ps- <sub>cp</sub> (10%)	1567,83±5,11	1457,67±3,32	1338,92±6,30	1258,72±1,21	1258,25±1,39
<b>20</b>	Ps- <sub>cp</sub> (20%)	1554,03±15,15	1449,86±10,25	1323,36±17,55	1203,90±2,92	1202,86±2,72
<b>30</b>	Ps- <sub>cp</sub> (30%)	1527,73±8,38	1378,90±19,92	1224,08±31,67	1129,29±6,09	1128,90±6,95
<b>40</b>	Ps- <sub>cp</sub> (40%)	1457,15±25,32	1315,75±10,13	1188,53±5,49	1064,58±5,93	1064,19±5,93
<b>50</b>	Ps- <sub>cp</sub> (50%)	1253,25±24,93	1143,22±39,14	1062,62±34,01	924,34±13,12	923,30±12,67

La variation de la masse volumique apparente des composites à l'état durci en fonction des constituants et de l'âge des éprouvettes est illustrée par les courbes des figures ci-dessous :

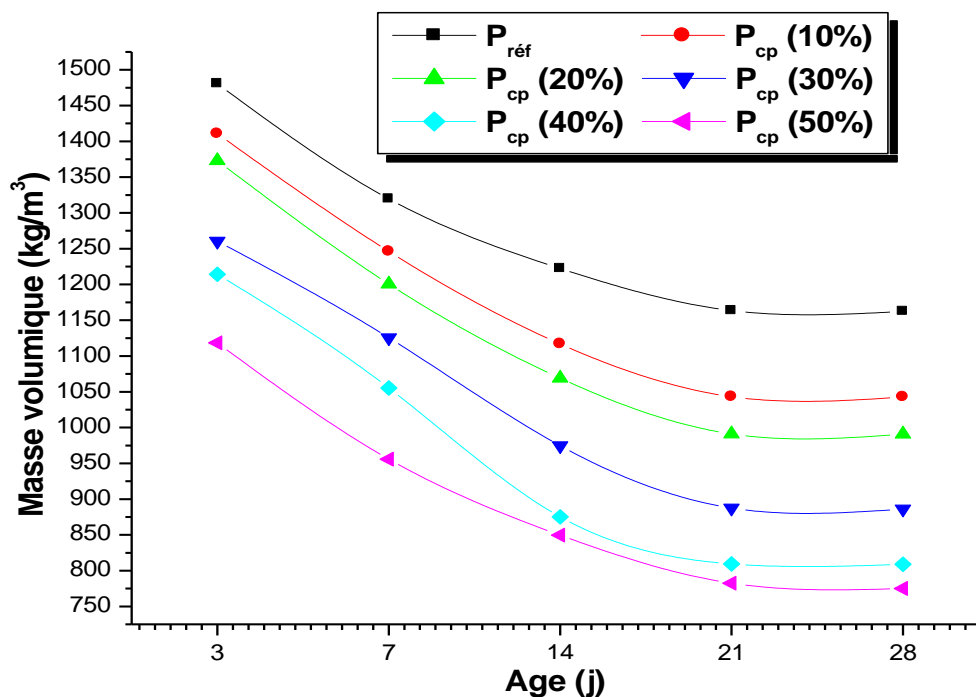


Figure III.1 : Variation de la masse volumique de la composition plâtre + copeaux de bois avec le temps.

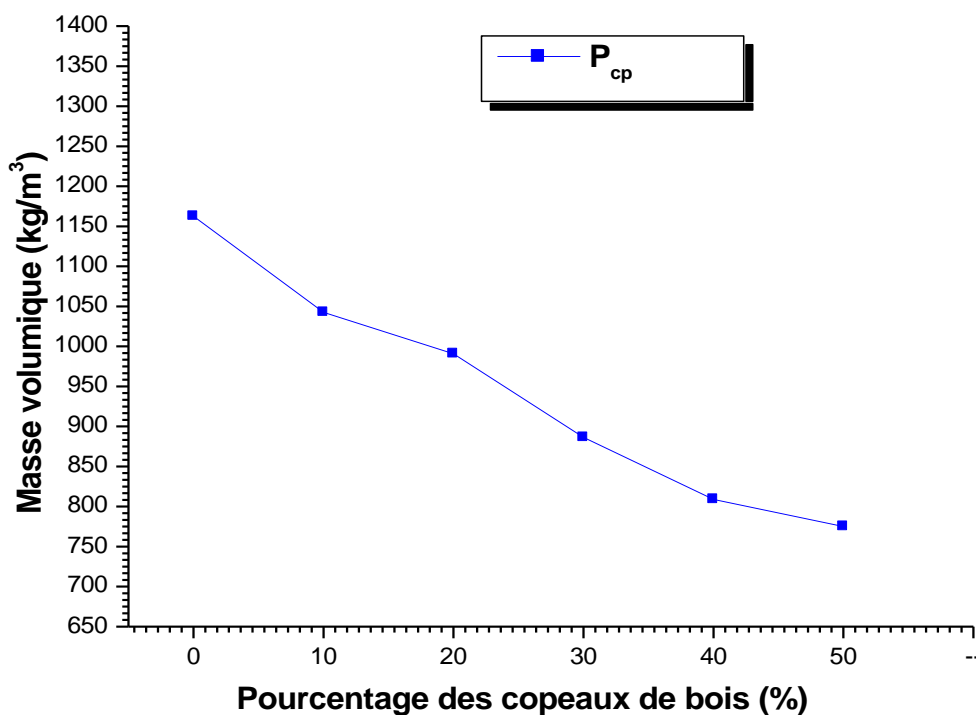


Figure III.2 : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en copeaux de bois de la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

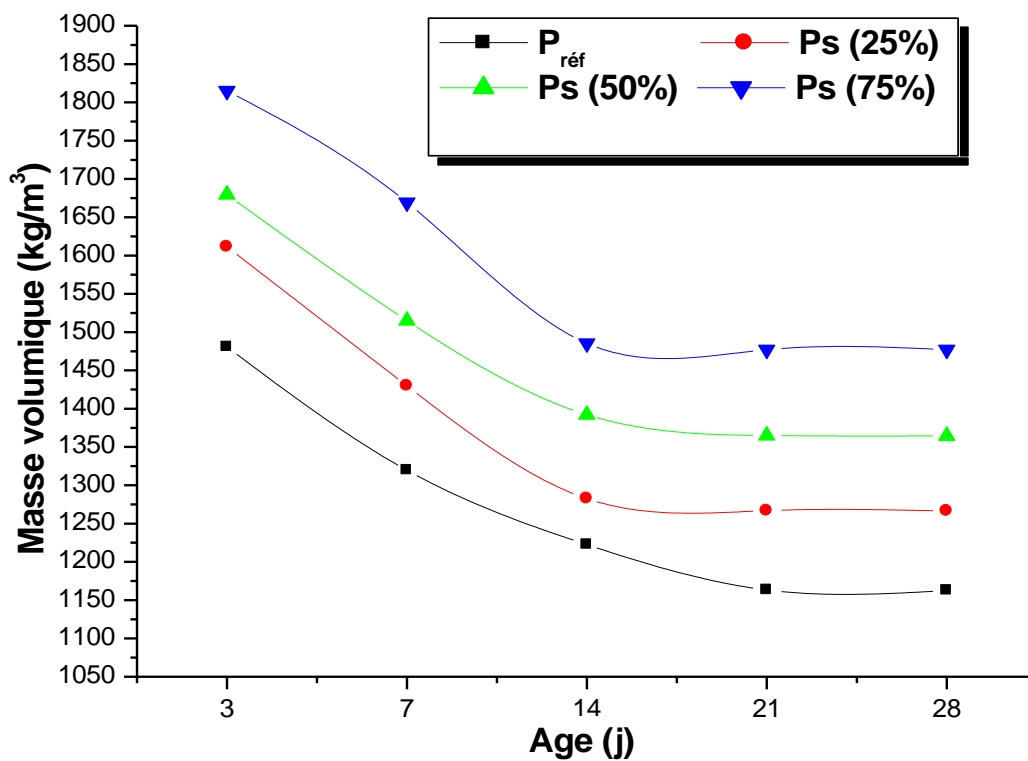


Figure III.3 : Variation de la masse volumique de la composition plâtre + sable dunaire avec le temps.

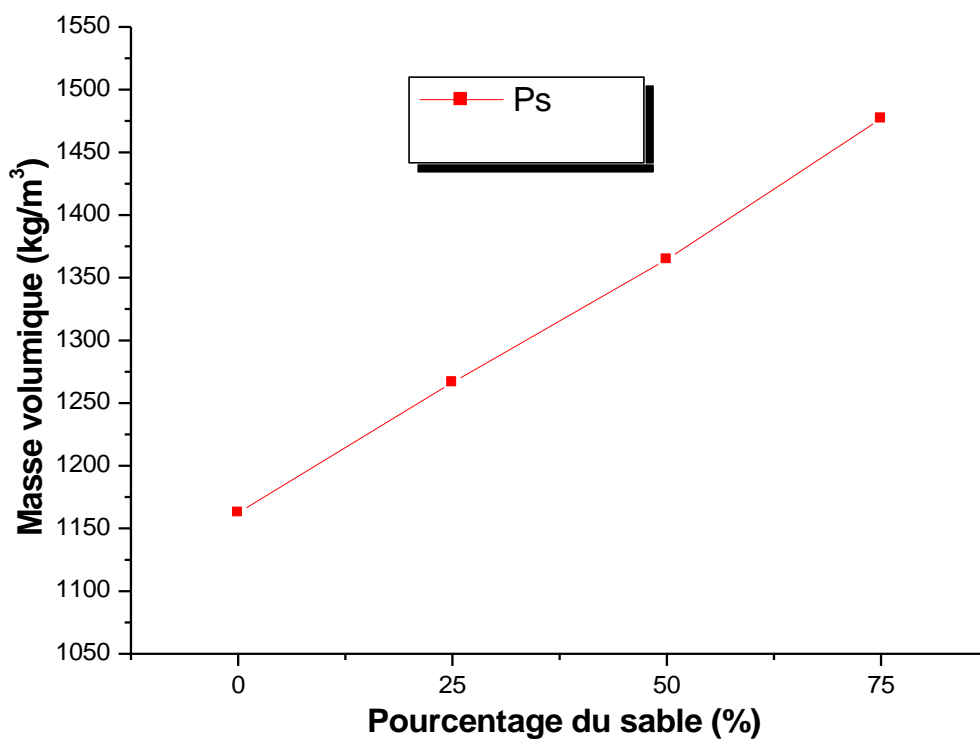


Figure III.4 : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en sable de la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28 jours.

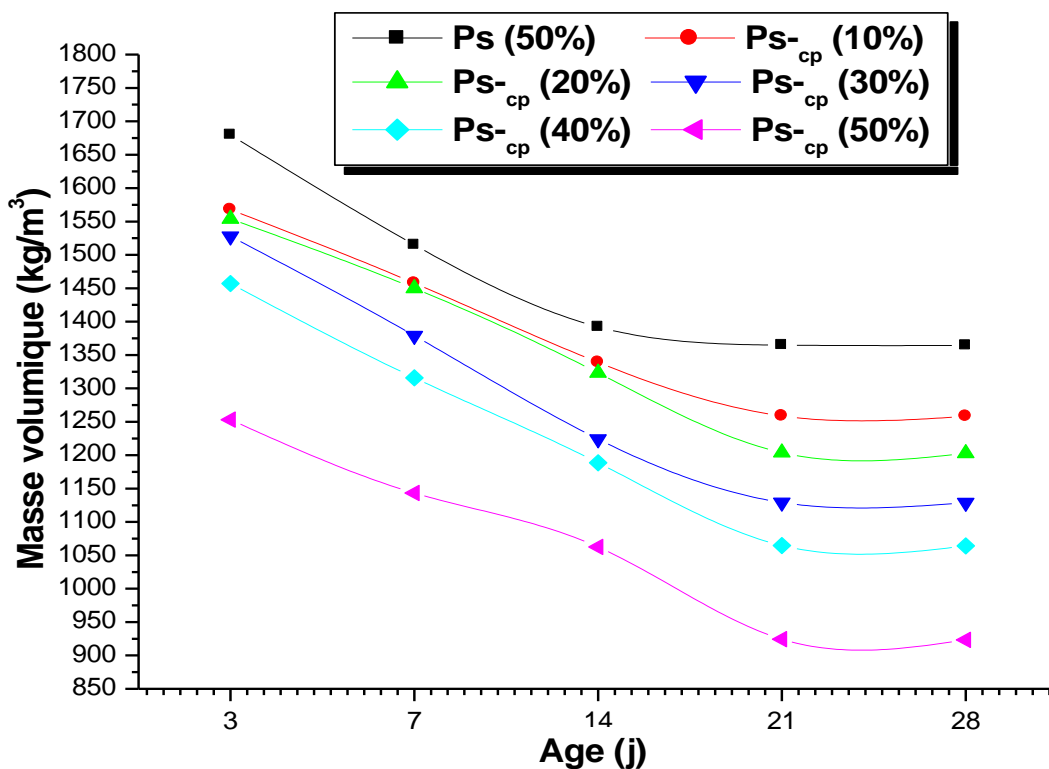


Figure III.5 : Variation de la masse volumique de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois avec le temps.

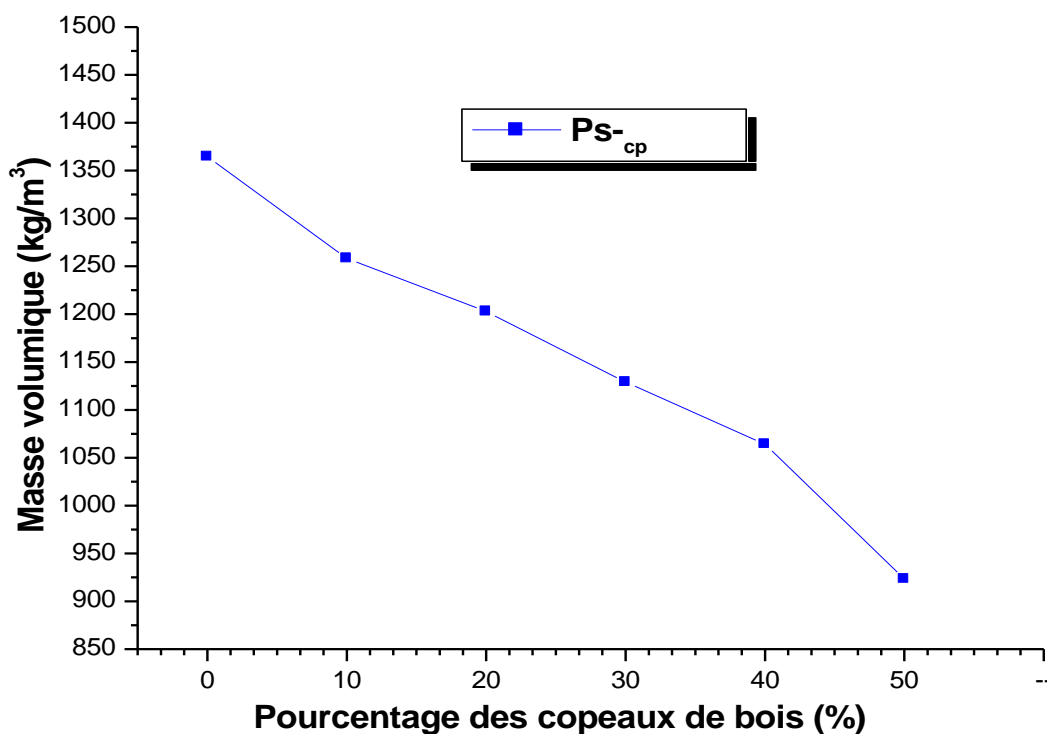


Figure III.6 : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en copeaux de bois de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

#### IV.1.1. Discussion et interprétation

- D'après les figures (III.1), (III.3) et (III.5), on remarque que la masse volumique apparente des compositions (**plâtre + copeaux de bois**, **plâtre + sable dunaire** et **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois**) diminue rapidement durant les 14 premiers jours. Ceci est dû à l'évaporation de l'eau, puis elle commence à se stabiliser à partir de l'âge de 21 jours à cause du fait que les granulats de bois se comportent comme un matériau hydrophile.

- D'après la figure (III.2), on constate que l'augmentation des teneurs en copeaux de bois diminue la masse volumique de la composition (**plâtre + copeaux de bois**), la diminution maximale enregistrée est de **775,12 kg/m<sup>3</sup>**, et cela est due au fait que l'introduction des copeaux de bois crée des vides à l'intérieure de la matrice d'où la diminution de la masse volumique.

- D'après la figure (III.4), on observe que la masse volumique de la composition (**plâtre + sable dunaire**) croît avec l'ajout du sable de dune. Notons que la meilleure valeur enregistrée est de **1476,95 kg/m<sup>3</sup>**, pour 75% du sable. L'augmentation de la masse volumique du composite peut être expliquée par le fait que l'ajout du sable dunaire comble les vides existants dans le plâtre.

- D'après la figure (III.6), on remarque que la masse volumique de la composition (**plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois**) décroît avec l'augmentation des pourcentages des copeaux de bois cela est due aux vides créés par l'introduction des copeaux de bois. Après l'étude de la masse volumique apparente nous postulons la composition la plus légère **P<sub>cp</sub> (50%)** pour introduire des performances thermiques à l'enveloppe du bâtiment.

#### IV.2. Porosité

La porosité d'un matériau caractérise l'importance des vides (pores) qu'il contient. D'après. [Khab H, (2007)] les pores forment des réseaux de vides plus ou moins complexes ayant une influence directe sur les phénomènes hydriques, mécaniques et thermiques.».

La porosité d'un matériau peut être caractérisée par :

- ❖ La densité
- ❖ Le pourcentage volumique des pores.
- ❖ La taille moyenne des pores.
- ❖ La distribution dimensionnelle.
- ❖ La continuité ou la discontinuité.

La porosité des composites provient de celle de la matrice et celle du granulat, elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction des volumes des vides dans le matériau par rapport au volume totale [Bederina M, (2007)]. La porosité est déterminée par relation suivante :

$$P (\%) = (M_h - M_s) / (M_h) \dots\dots\dots (III. 2)$$

**Avec**

**M<sub>h</sub>**: Masse humide de l'échantillon.

**M<sub>s</sub>**: Masse sèche de l'échantillon.

La variation de la porosité des compositions à l'âge de 28 jours des éprouvettes est regroupée dans les tableaux (III.8), (III.9), et (III.10), et illustrée par les courbes des figures (III.7), (III.8) et (III.9).

**Tableau III.8 : Variation de la porosité pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28jours.**

Teneurs en copeaux	0	10	20	30	40	50
Composition	<b>P<sub>réf</sub></b>	<b>P<sub>cp</sub> (10%)</b>	<b>P<sub>cp</sub> (20%)</b>	<b>P<sub>cp</sub> (30%)</b>	<b>P<sub>cp</sub> (40%)</b>	<b>P<sub>cp</sub> (50%)</b>
Porosité (%)	<b>37,362</b> ±0,847	40,507 ±0,290	43,786 ±0,199	51,182 ±0,434	57,302 ±0,727	61,796 ±0,557

**Tableau III.9 : Variation de la porosité pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28jours.**

Teneurs en sable (%)	0	25	50	75
Composition	<b>P<sub>réf</sub></b>	<b>Ps (25%)</b>	<b>Ps (50%)</b>	<b>Ps (75%)</b>
Porosité (%)	<b>37,362</b> ±0,847	30,645 ±0,671	26,226 ±0,416	22,322 ±0,584

**Tableau III.10 : Variation de la porosité pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28jours.**

Teneurs en copeaux	0	10	20	30	40	50
Composition	<b>Ps (50%)</b>	<b>Ps-<sub>cp</sub> (10%)</b>	<b>Ps-<sub>cp</sub> (20%)</b>	<b>Ps-<sub>cp</sub> (30%)</b>	<b>Ps-<sub>cp</sub> (40%)</b>	<b>Ps-<sub>cp</sub> (50%)</b>
Porosité (%)	<b>26,226</b> ±0,416	30,415 ±1,030	33,183 ±0,750	36,773 ±0,221	40,229 ±0,232	46,341 ±0,970

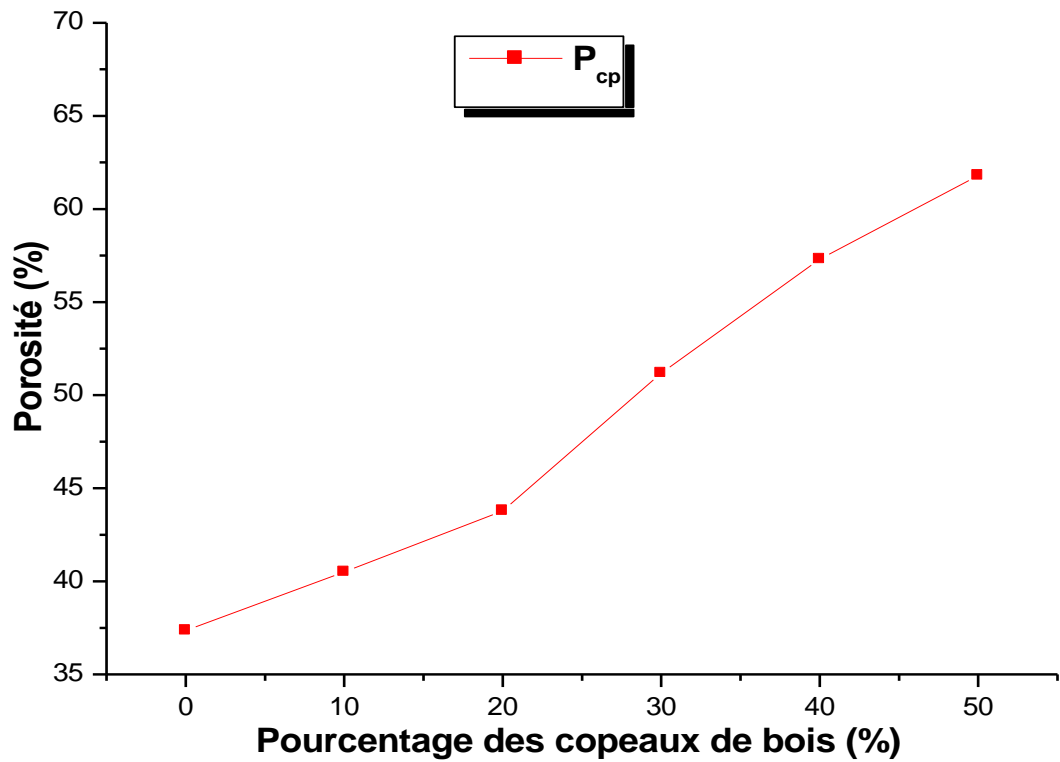


Figure III.7 : Variation de la porosité en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition **plâtre + copeaux de bois** à l'âge de 28jours.

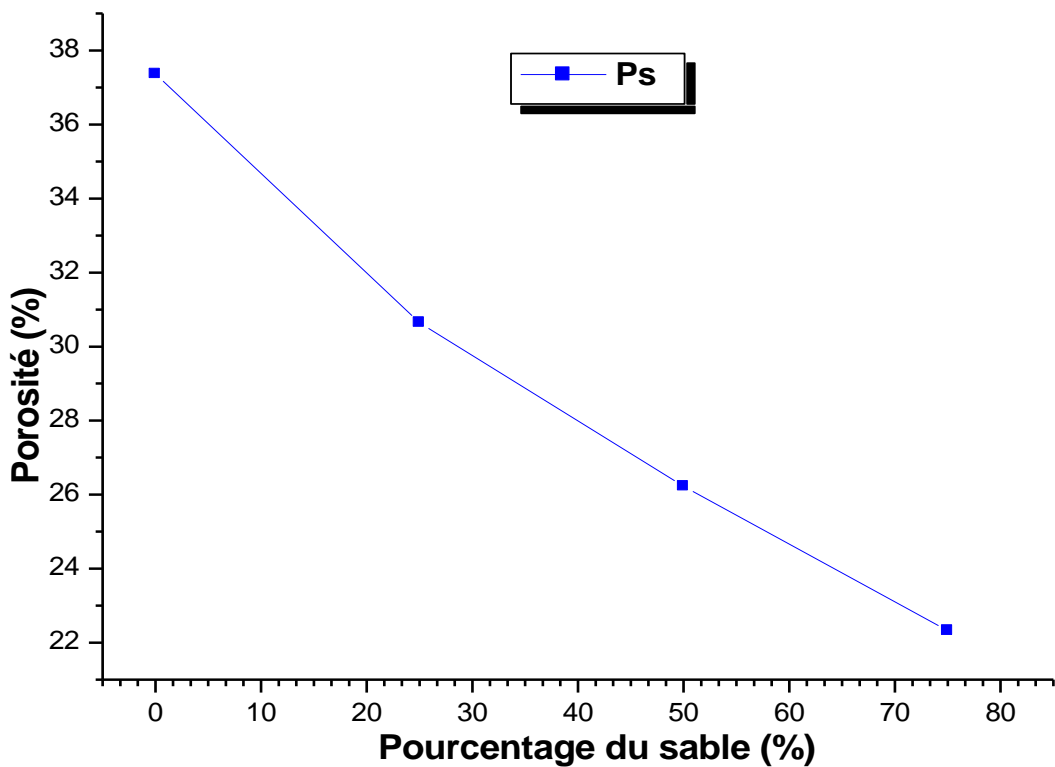
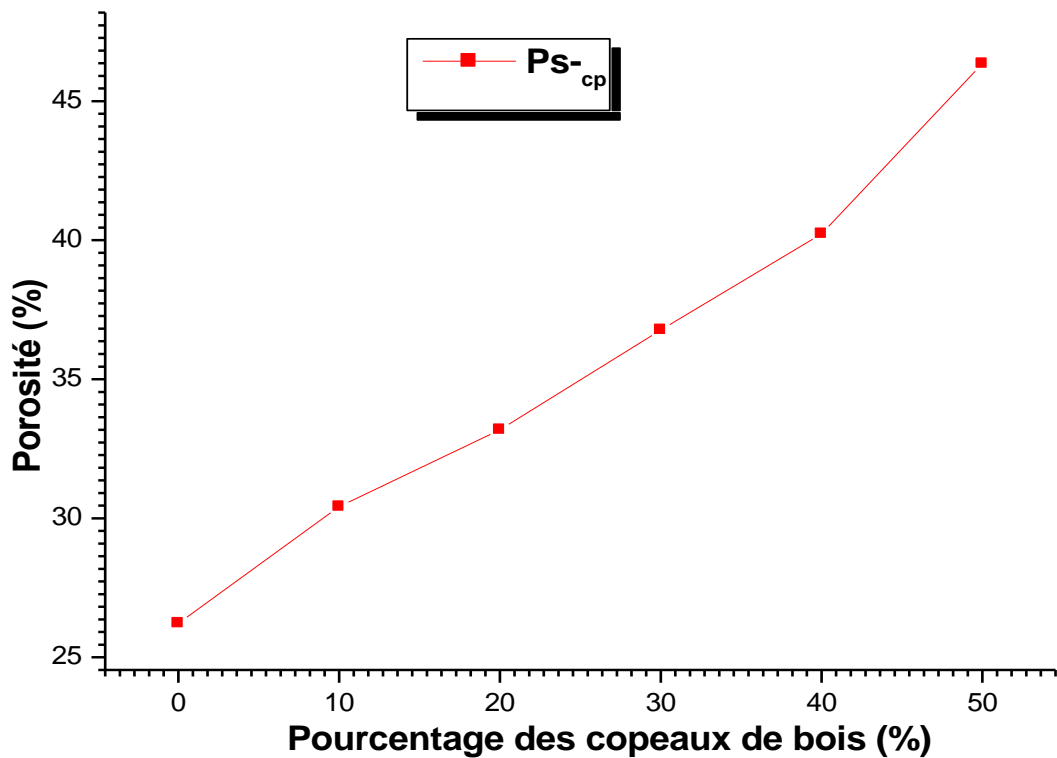


Figure III.8 : Variation de la porosité en fonction de la teneur en sable pour la composition **plâtre + sable dunaire** à l'âge de 28jours.



**Figure III.9 :** Variation de la porosité en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois** à l'âge de 28jours.

#### IV.2.1. Discussion et interprétation

- D'après la figure (III.7), on constate que la porosité croît avec l'augmentation des pourcentages de copeaux de bois, elle atteint une valeur maximale égale à **61,79%** pour la composition **plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%)**. Ce phénomène est dû au fait que l'ajout des copeaux au matrice plâtre crée des vides dans la composition, ce qui en accord avec les travaux de [Bederina M, (2007)].

- D'après la figure (III.8), on observe que la porosité décroît avec l'augmentation de l'ajout du sable dunaire. Ce phénomène expliqué que l'ajout des grains du sable fins qui remplis les pores de la matrice d'où la diminution de la porosité.

- D'après la figure (III.9), on remarque que la porosité augmente avec l'augmentation des pourcentages de copeaux de bois, elle atteint une valeur maximale égale à **46,34%** pour 50% des copeaux de bois. Ceci est dû aux vides créés lorsque on introduit les copeaux de bois dans la matrice. Après l'étude de la porosité nous postulons la composition ayant la plus grande valeur de la porosité  **$P_{cp}$  (50%)**. Ceci pour introduire des performances thermiques à l'enveloppe du bâtiment.

### IV.3. Relation entre la porosité et la masse volumique

Dans le but de connaître l'influence de la porosité sur les caractéristiques physico-mécaniques des composites, nous avons effectué une étude croisée sur les deux paramètres à savoir la masse volumique et la porosité.

La relation entre la porosité et la masse volumique de différentes compositions (plâtre + copeaux de bois, plâtre + sable dunaire et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois) à l'âge de 28 jours est représentée successivement sur les figures (III.10), (III.11) et (III.12).

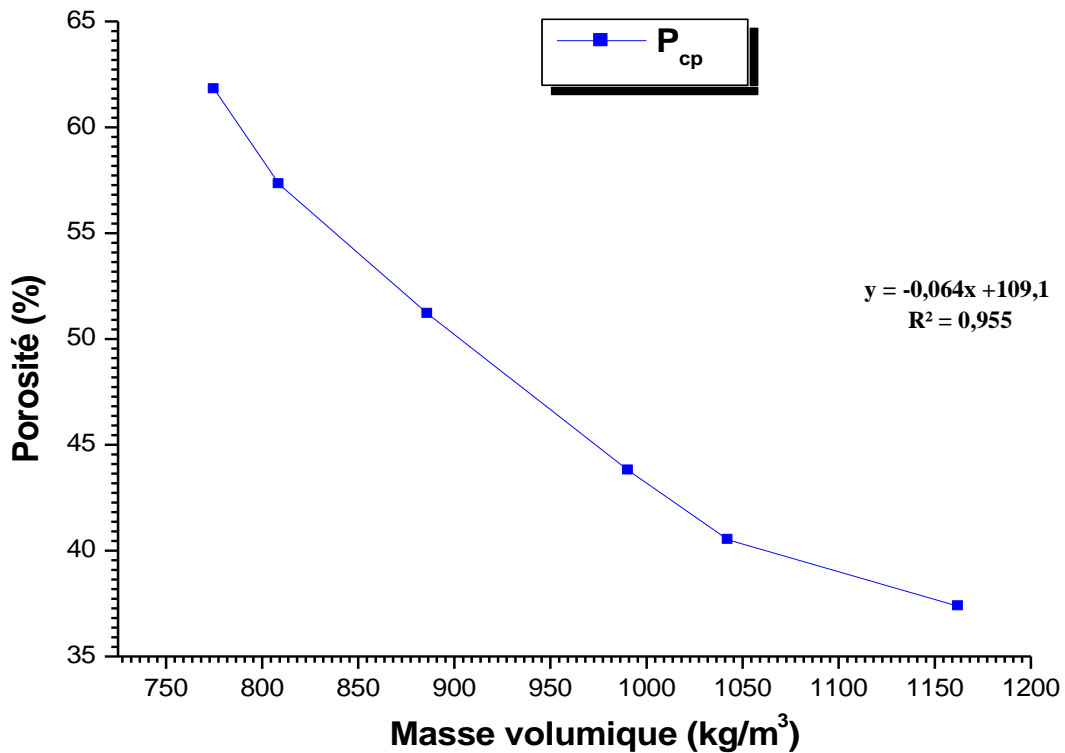


Figure III.10 : Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

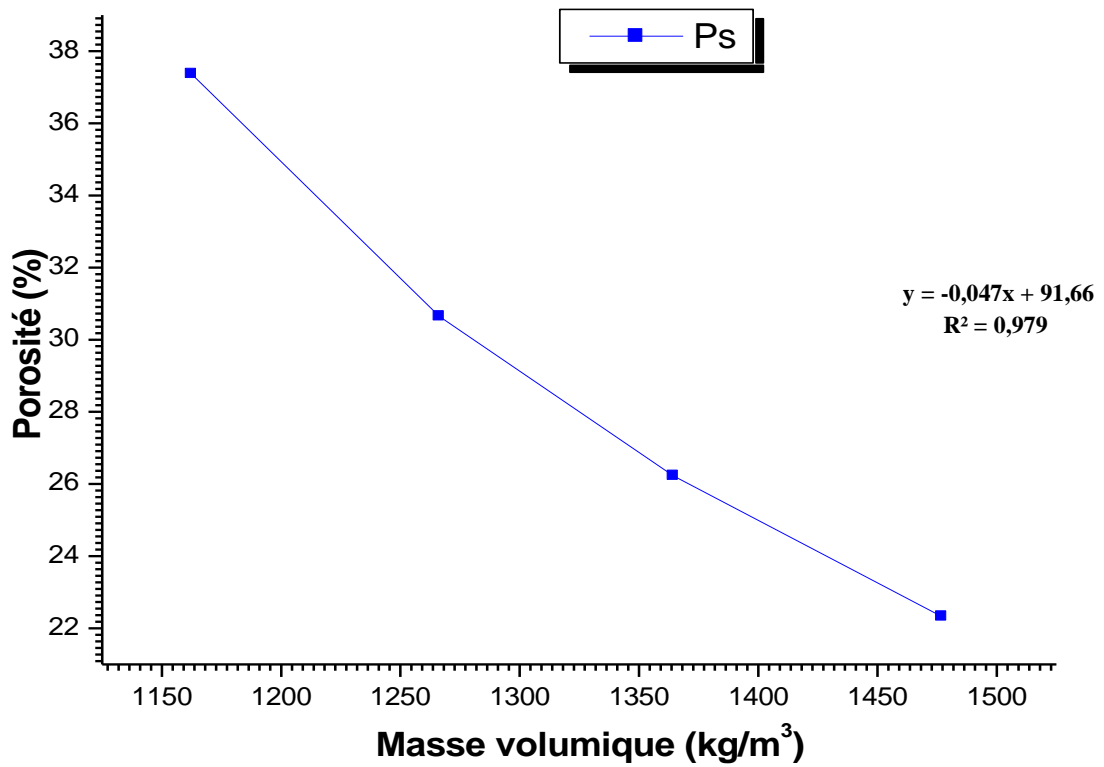


Figure III.11 : Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28jours.

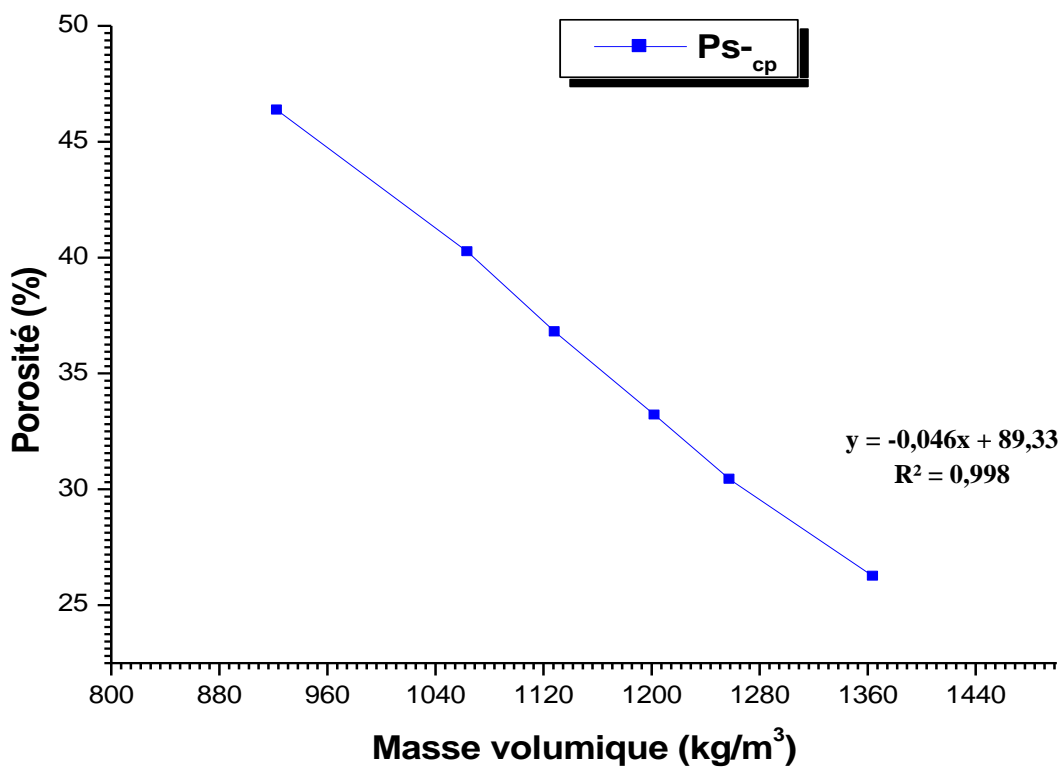


Figure III.12 : Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28jours.

### IV.3.1. Discussion et interprétation

- D'après les figures (III.10), (III.11) et (III.12), on remarque que la relation entre la porosité des compositions (plâtre + copeaux de bois, plâtre + sable dunaire et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois) et la masse volumique est inversement proportionnelle. C'est-à-dire plus le matériau est poreux plus sa masse volumique est diminuée.

- La relation entre la porosité et la masse volumique de différentes compositions est donnée par les équations polynomiales ci-après :

1- Pour la composition plâtre + copeaux de bois ( $P_{cp}$ ) : [ $y = -0,064x + 109,1$ ] avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,955$ .

2- Pour la composition plâtre + sable dunaire ( $Ps$ ) : [ $y = -0,047x + 91,66$ ], avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,979$ .

3- Pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois ( $Ps_{-cp}$ ) : [ $y = -0,046x + 89,33$ ], avec  $R^2 = 0,998$  où le variable (x) représente les masses volumiques de différents teneurs en bois (10%, 20%, 30%, 40% et 50%).

- Ce qui montre une relation linéaire entre la masse volumique et la porosité.

## V. Visualisation des surfaces de rupture des composites étudiés par le microscope optique

Pour un matériau à base du plâtre, la plupart des propriétés sont liées à sa structure. Il est nécessaire, donc, de faire une caractérisation microscopique. Cette dernière a été concentrée sur l'aspect général des matériaux étudiés, sur l'adhérence matrice – copeaux de bois, matrice – sable et surtout sur la manière de répartition des copeaux de bois dans la matrice.

La visualisation des surfaces de rupture a été faite au laboratoire de recherche de génie mécanique de l'université de Laghouat par un microscope optique en réflexion de type : **LEICA DMLM**. Ce microscope est équipé d'une caméra CCD couleur reliée à un PC et caractérisé par :

- Lumière polarisée (cube polariseur-analyseur croisés).
- Binoculaire 50%/50%.
- Boîtier de lampes 12 V 100 W centrale.
- Illuminateur 4 positions de cube libres (cube BF inclus).
- Oculaires champ 22.
- Platine XY et porte objet.

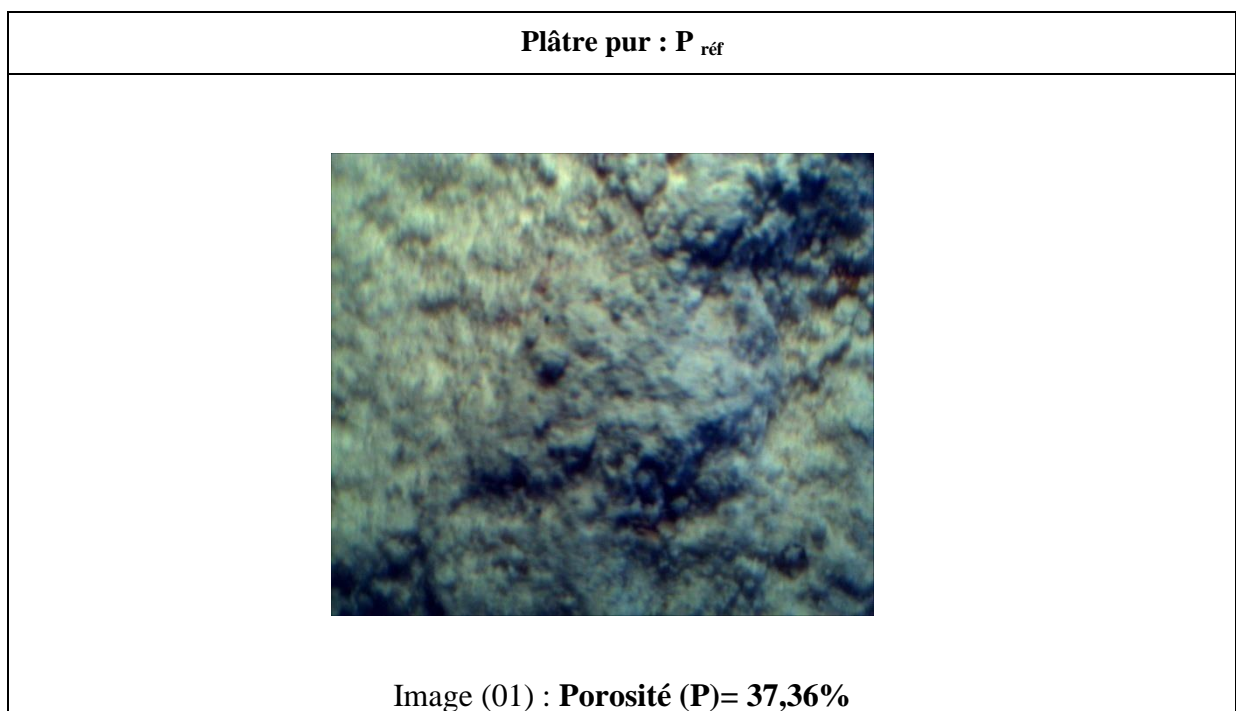
- Adaptateur vidéo.
- Objectifs X50, X100, X200, X500.
- Chaîne d'acquisition analogique.

La figure (III.13) représente le microscope utilisé pour la visualisation des surfaces de rupture par un grossissement de 50 fois.



**Figure III.13 : Microscope utilisé.**

Les visualisations des échantillons sous le microscope optique sont présentées dans de la figure (III.14).




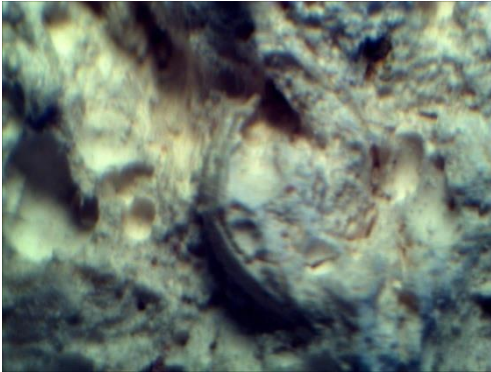

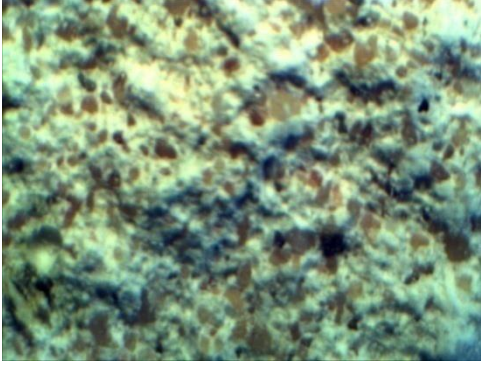

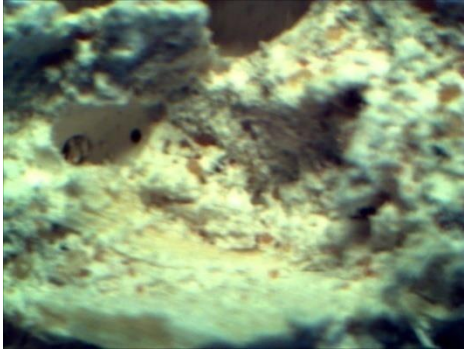
<p><b>Plâtre + 10% copeaux de bois : P<sub>cp</sub> (10%)</b></p>	<p><b>Plâtre + 50% copeaux de bois : P<sub>cp</sub> (50%)</b></p>
 <p>Image (02) : Porosité (P)= 40,50%</p>	 <p>Image (03) : Porosité (P)=61,79%</p>
<p><b>Plâtre + 50% sable dunaire : Ps (50%).</b></p>	<p><b>Plâtre + 75% sable dunaire : Ps (75%).</b></p>
 <p>Image (04) : Porosité (P)= 26,22%</p>	 <p>Image (05) : Porosité (P)= 22,32%</p>
<p><b>Plâtre +50% sable dunaire + 10% copeaux de bois : Ps<sub>-cp</sub> (10%).</b></p>	<p><b>Plâtre +50% sable dunaire + 50% copeaux de bois : Ps<sub>-cp</sub> (50%).</b></p>
 <p>Image (06) : Porosité (P)= 30,41%</p>	 <p>Image (07) : Porosité (P)= 46,34%</p>

Figure III.14 : Aspect général des compositions.

### **V.1. Discussion et interprétation**

- D'après l'image (01) de la figure (III. 14), on remarque que la structure du plâtre pur est poreuse.
- Les images (02), (03) de la figure (III. 14) montrent que l'adhérence bois-matrice est en général bonne et les granulats de bois sont bien répartis dans la matrice. On observe aussi que quel que soit la quantité des copeaux de bois (10%, 50%), l'adhésion bois-matrice n'influence pas par ces portions. Cette adhésion est due à la structure alvéolaire des copeaux de bois.
- Les images (04), (05) de la figure (III. 14) montrent que quel que soit les teneurs en sable (50%, 75%) dans la composition, l'adhérence sable-matrice est parfaite. Ceci est peut être dû au grain de sable qui comble graduellement les vides existants dans la matrice.
- Les images (06), (07) de la figure (III. 14) indiquent que l'adhérence bois-sable-matrice est en général bonne et ne contient pas beaucoup de défauts. Ceci peut être expliqué par le fait que l'ajout des grains de sable comble graduellement les vides supplémentaires dans la matrice. Rappelons que l'introduction des copeaux de bois produit une porosité supplémentaire à la matrice, cette porosité est due à la structure poreuse des copeaux de bois [Bederina M, (2007)].

## **VI. Etude des propriétés mécaniques**

### **VI.1. Résistance à la flexion**

Nous avons mesuré la résistance à la flexion des différentes compositions par l'essai de flexion 3 points. Rappelons que la description de l'essai est présentée au 2<sup>ème</sup> chapitre.

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Pour chaque âge d'essai et chaque composition (plâtre + copeaux de bois, plâtre + sable dunaire et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois), les mesures sont effectuées sur 03 éprouvettes.

Les résultats des essais sur les différentes compositions sont regroupés dans les tableaux (III.11), (III.12) et (III.13) ci-dessous.

**Tableau III.11** : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + copeaux de bois.

Teneurs en copeaux (%)	Composition (MPa)	Age en jours		
		3j	7j	28j
0	$P_{réf}$	$1,70 \pm 0,119$	$1,98 \pm 0,115$	$4,21 \pm 0,069$
10	$P_{cp}$ (10%)	$1,31 \pm 0,011$	$1,40 \pm 0,127$	$2,80 \pm 0,090$
20	$P_{cp}$ (20%)	$1,05 \pm 0,117$	$1,19 \pm 0,051$	$2,08 \pm 0,448$
30	$P_{cp}$ (30%)	$0,88 \pm 0,058$	$0,98 \pm 0,051$	$1,73 \pm 0,303$
40	$P_{cp}$ (40%)	$0,72 \pm 0,033$	$0,81 \pm 0,029$	$1,56 \pm 0,105$
50	$P_{cp}$ (50%)	$0,65 \pm 0,044$	$0,72 \pm 0,040$	$1,49 \pm 0,105$

**Tableau III.12** : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + sable dunaire.

Teneurs en sable (%)	Composition (MPa)	Age en jours		
		3j	7j	28j
0	$P_{réf}$	$1,70 \pm 0,119$	$1,98 \pm 0,115$	$4,21 \pm 0,069$
25	$P_s$ (25%)	$1,52 \pm 0,051$	$1,66 \pm 0,048$	$3,83 \pm 0,369$
50	$P_s$ (50%)	$1,24 \pm 0,058$	$1,47 \pm 0,057$	$3,62 \pm 0,225$
75	$P_s$ (75%)	$1,12 \pm 0,250$	$1,31 \pm 0,099$	$3,32 \pm 0,123$

**Tableau III.13** : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois

Teneurs en copeaux (%)	Composition (MPa)	Age en jours		
		3j	7j	28j
0	$P_s$ (50%)	$1,24 \pm 0,058$	$1,47 \pm 0,057$	$3,62 \pm 0,225$
10	$P_{s-cp}$ (10%)	$1,09 \pm 0,067$	$1,24 \pm 0,110$	$2,34 \pm 0,282$
20	$P_{s-cp}$ (20%)	$0,93 \pm 0,051$	$1,07 \pm 0,130$	$2,03 \pm 0,143$
30	$P_{s-cp}$ (30%)	$0,86 \pm 0,019$	$0,93 \pm 0,069$	$1,70 \pm 0,163$
40	$P_{s-cp}$ (40%)	$0,67 \pm 0,044$	$0,78 \pm 0,029$	$1,54 \pm 0,105$
50	$P_{s-cp}$ (50%)	$0,56 \pm 0,040$	$0,67 \pm 0,019$	$1,35 \pm 0,136$

La variation de la résistance à la flexion des composites à l'état durci en fonction des constituants et de l'âge des éprouvettes est illustrée par les courbes des figures ci-dessous :

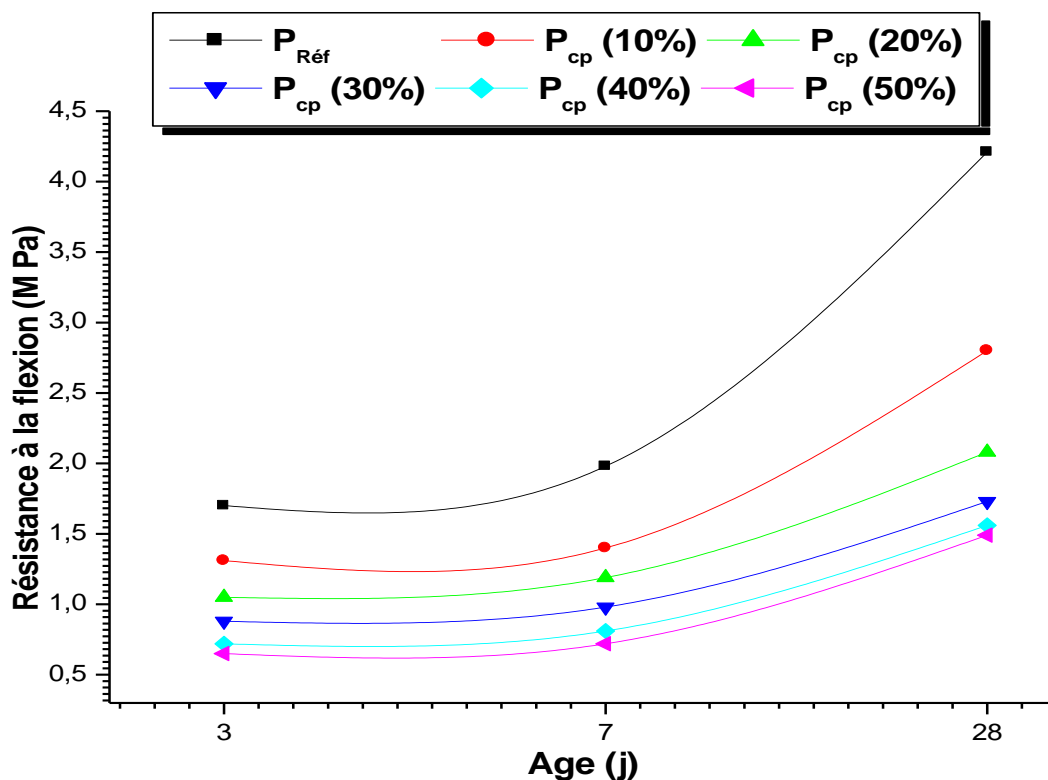


Figure III.15 : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + copeaux de bois avec le temps.

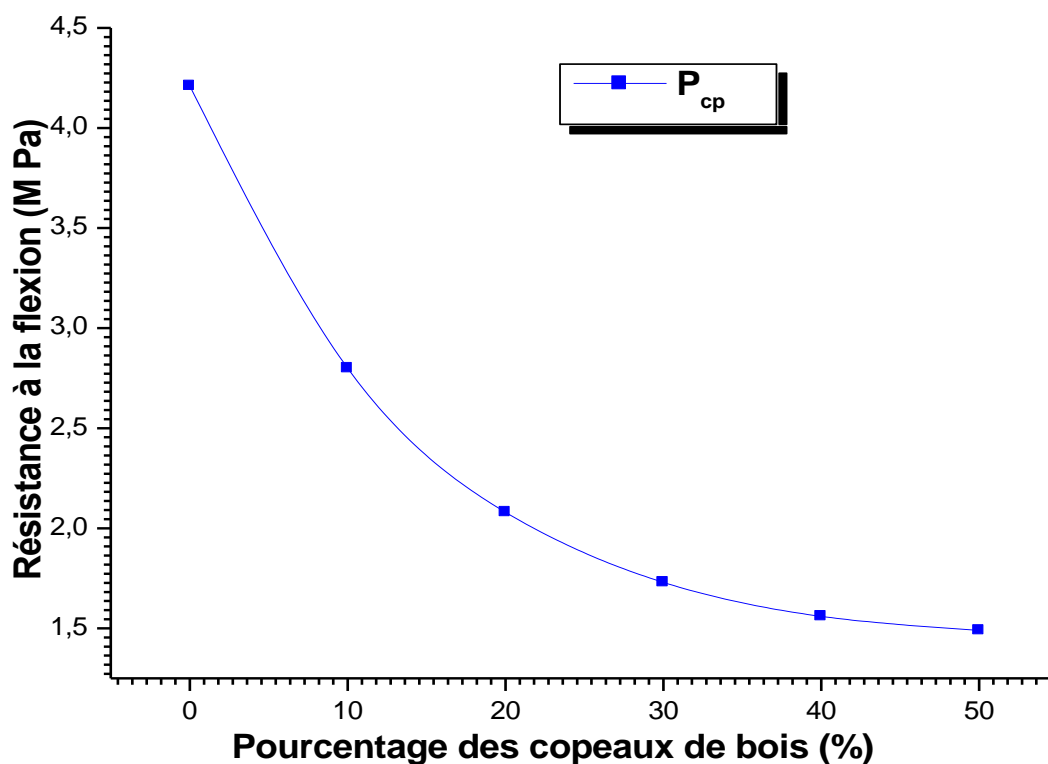


Figure III.16 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

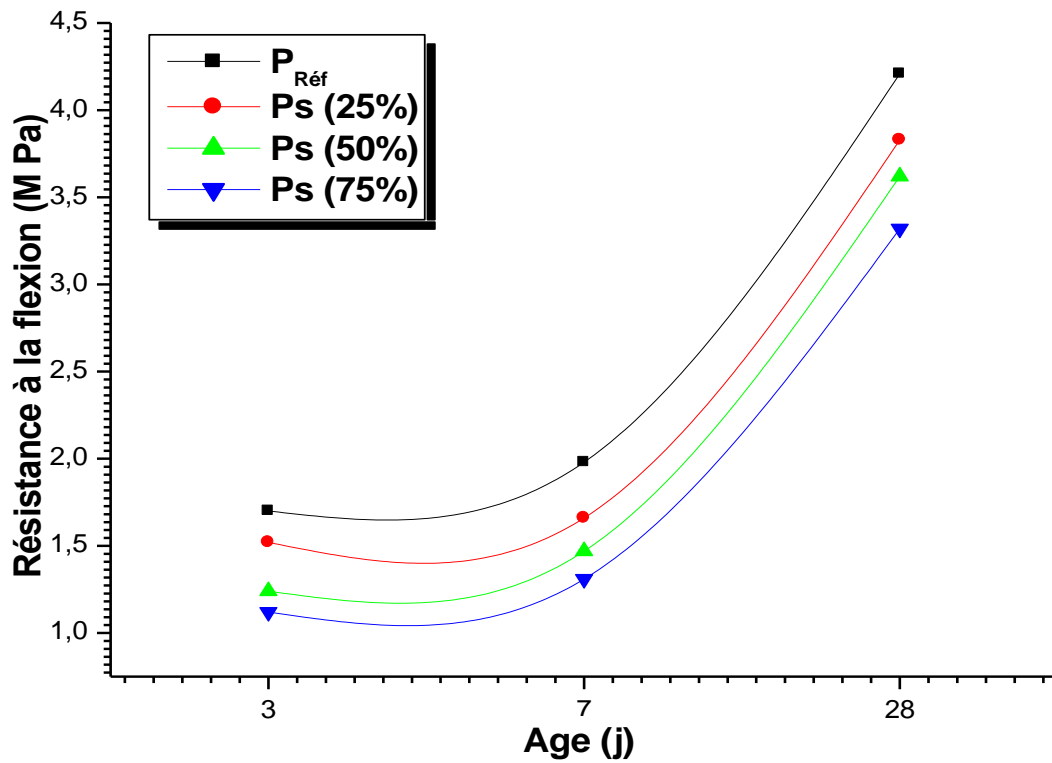


Figure III.17 : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + sable dunaire avec le temps.

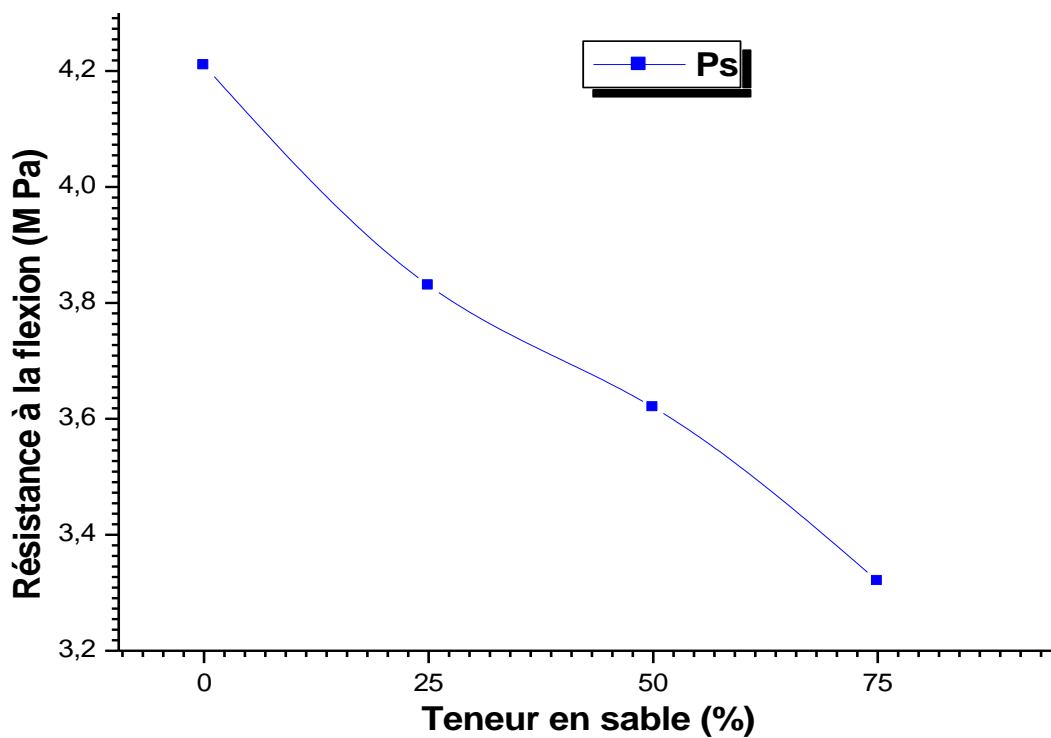


Figure III.18 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en sable pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28 jours.

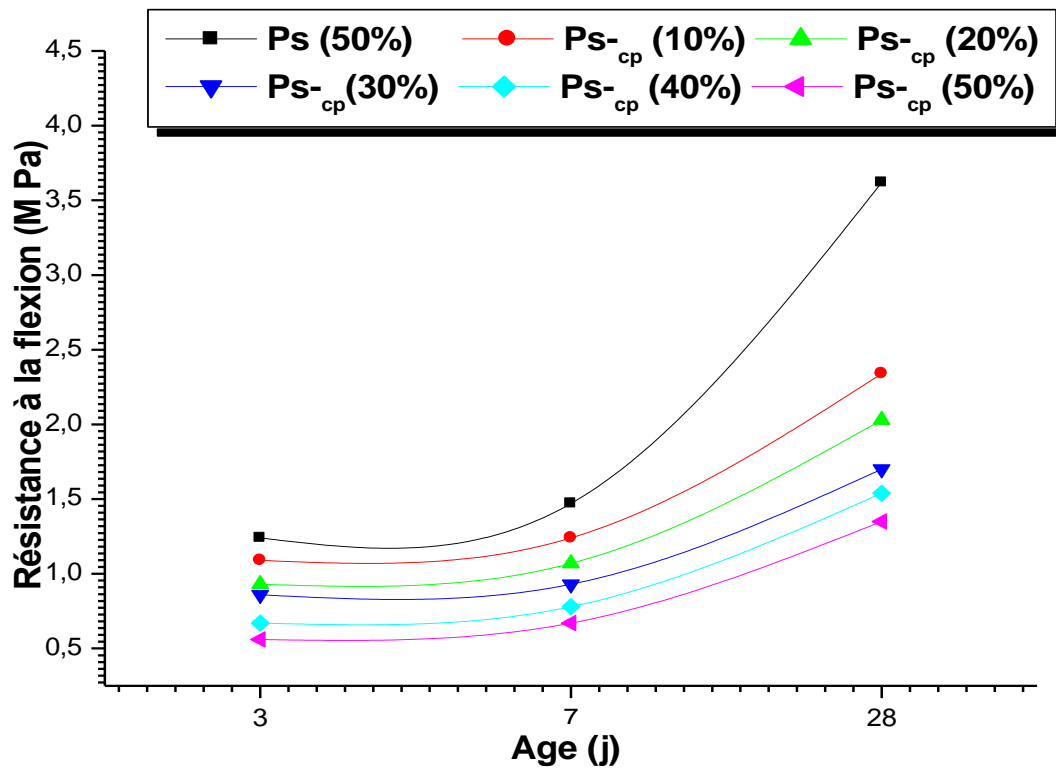


Figure III.19 : Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois avec le temps.

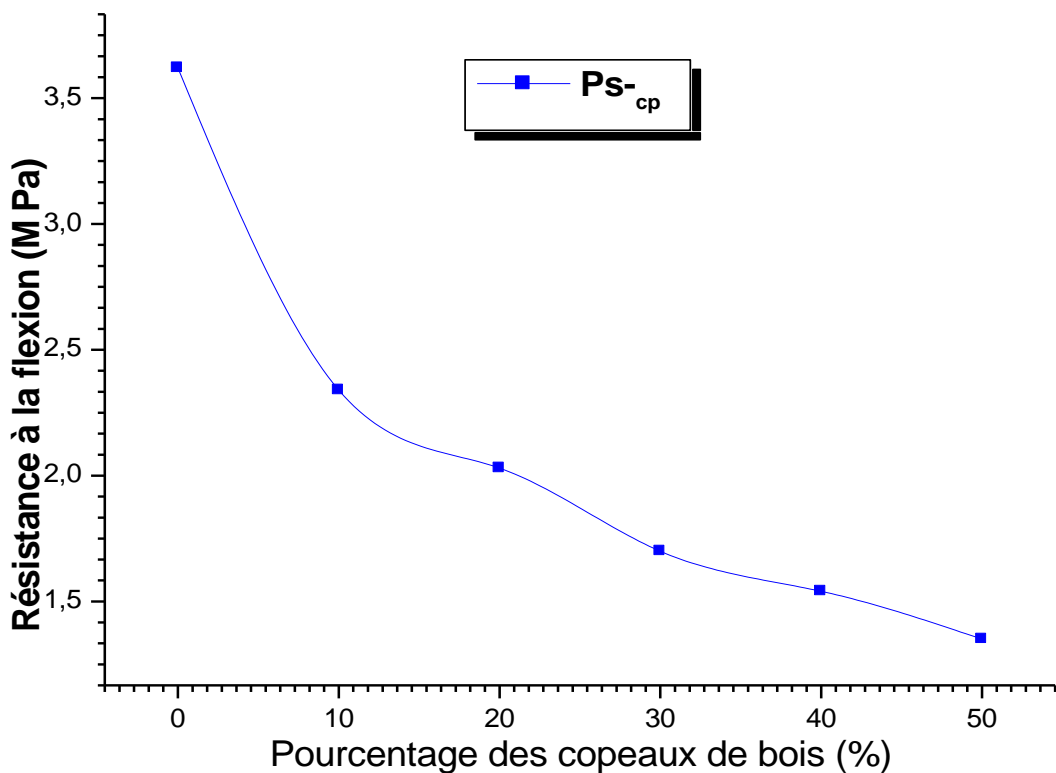


Figure III.20 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois, à l'âge de 28 jours.

### VI.1.1. Discussion et interprétation

- D'après les figures (III.15), (III.17) et (III.19), on observe une croissance de la résistance à la flexion avec l'âge pour toutes les teneurs utilisées (copeaux de bois, sable dunaire). Cela peut être expliqué par le fait que la réaction d'hydratation se poursuit et prend tout le temps nécessaire pour se compléter, ce qui contribue à la croissance de la résistance à la flexion.

- D'après les figures (III.16) et (III.20), on voit que la résistance à la flexion à l'âge de 28 jours décroît avec l'augmentation des pourcentages de copeaux de bois. Cette chute de la résistance atteint **1,49 MPa** pour la composition **plâtre + 50% copeaux de bois** et **1,35 MPa** pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois**. Ceci est tout à fait logique car la résistance à la flexion des compositions à base du plâtre est, comme pour les bétons classiques, une fonction croissante de la masse volumique. Nos résultats sont en accord avec les travaux de [Gotteicha M, (2005)] sur des composites ciment-bois.

- D'après la figure (III.18), on découvre que l'ajout du sable dunaire provoque une diminution de la résistance à la flexion, cette diminution arrive à une valeur minimale de **3,32 MPa**. Ceci est en accord avec la plupart des études concernant ce sujet [CNERIB, (1993), Hafsi F, (2010), Rachedi M, (2013) et Mechti W and all, (2013)]. La diminution de résistance à la flexion peut être expliquée par l'ajout de sable dunaire change la structure des pores (fait diminuer le nombre de gros pores et augmenter celui de petits pores). Ce changement est en fonction de la finesse (surface spécifique). D'après [Bederina M, (2007)] plus le diamètre du plus gros grain diminue plus la porosité augmente et la compacité diminue, et avec la diminution de cette dernière le matériau sera sans doute être fragile et moins résistant.

## VI.2. Résistance à la compression

Les mesures de la résistance à la compression des différentes compositions ont été effectuées sur les 06 demi-éprouvettes, issues de l'essai de flexion. Rappelons que la description de l'essai est présentée au 2<sup>ème</sup> chapitre.

Les résultats des essais sur les différentes compositions sont regroupés dans les tableaux (III.14), (III.15) et (III.16), et illustrées par les courbes des figures (III.21), (III.22), (III.23), (III.24), (III.25) et (III.26).

**Tableau III.14 :** Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + copeaux de bois.

Teneurs en copeaux (%)	Composition (MPa)	Age en jours		
		3j	7j	28j
0	<b>P<sub>réf</sub></b>	<b>2,36</b> ± 0,174	<b>2,78</b> ± 0,112	<b>7,86</b> ± 1,152
10	P <sub>cp</sub> (10%)	1,88 ± 0,145	2,03 ± 0,139	5,06 ± 0,608
20	P <sub>cp</sub> (20%)	1,58 ± 0,077	1,71 ± 0,065	3,70 ± 0,282
30	P <sub>cp</sub> (30%)	1,08 ± 0,068	1,20 ± 0,061	2,72 ± 0,251
40	P <sub>cp</sub> (40%)	0,85 ± 0,042	0,94 ± 0,032	2,41 ± 0,096
50	P <sub>cp</sub> (50%)	0,63 ± 0,064	0,86 ± 0,014	1,91 ± 0,077

**Tableau III.15 :** Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + sable dunaire.

Teneurs en sable (%)	Composition (MPa)	Age en jours		
		3j	7j	28j
0	<b>P<sub>réf</sub></b>	<b>2,36</b> ± 0,174	<b>2,78</b> ± 0,112	<b>7,86</b> ± 1,152
25	Ps (25%)	2,15 ± 0,191	2,53 ± 0,371	7,35 ± 0,695
50	Ps (50%)	1,99 ± 0,166	2,32 ± 0,241	6,70 ± 0,364
75	Ps (75%)	1,65 ± 0,173	2,06 ± 0,303	5,74 ± 1,001

**Tableau III.16 :** Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.

Teneurs en copeaux (%)	Composition (MPa)	Age en jours		
		3j	7j	28j
0	<b>Ps (50%)</b>	<b>1,99</b> ± 0,166	<b>2,32</b> ± 0,241	<b>6,70</b> ± 0,364
10	Ps- <sub>cp</sub> (10%)	1,54 ± 0,116	1,80 ± 0,073	4,21 ± 0,215
20	Ps- <sub>cp</sub> (20%)	1,39 ± 0,034	1,53 ± 0,214	3,32 ± 0,593
30	Ps- <sub>cp</sub> (30%)	1,00 ± 0,099	1,14 ± 0,058	2,68 ± 0,514
40	Ps- <sub>cp</sub> (40%)	0,83 ± 0,059	0,88 ± 0,054	2,25 ± 0,109
50	Ps- <sub>cp</sub> (50%)	0,58 ± 0,065	0,73 ± 0,073	1,69 ± 0,063

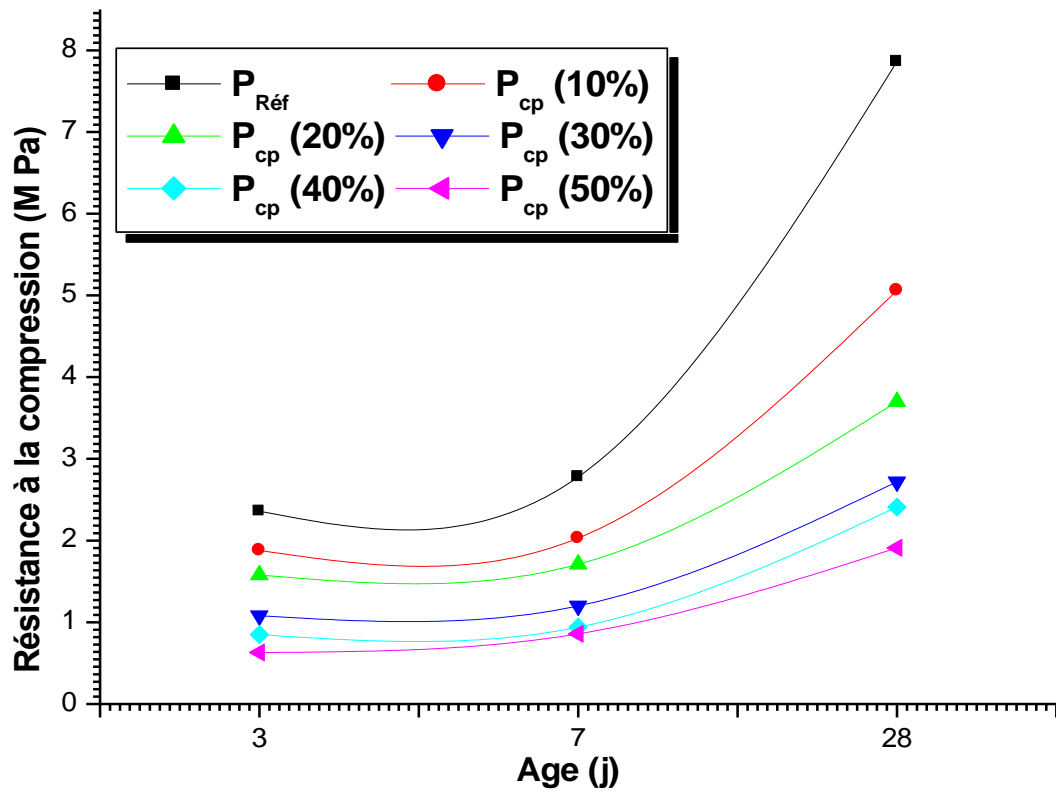


Figure III .21 : Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + copeaux de bois avec le temps.

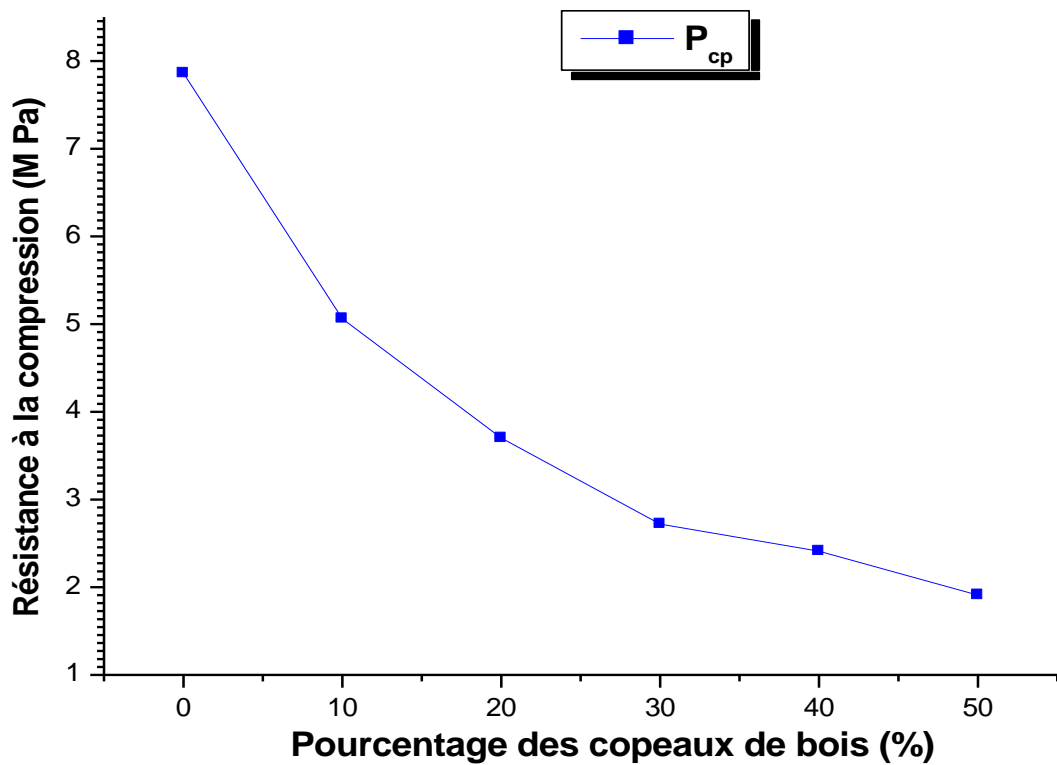


Figure III.22 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

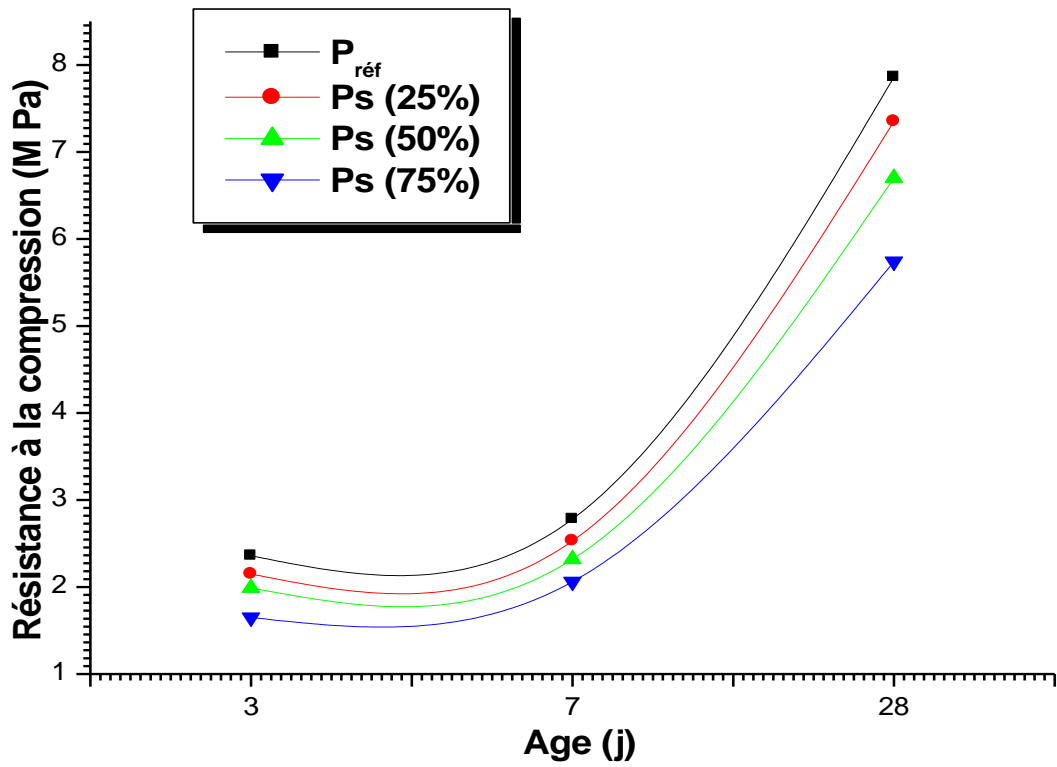


Figure III.23 : Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre + sable dunaire avec le temps.

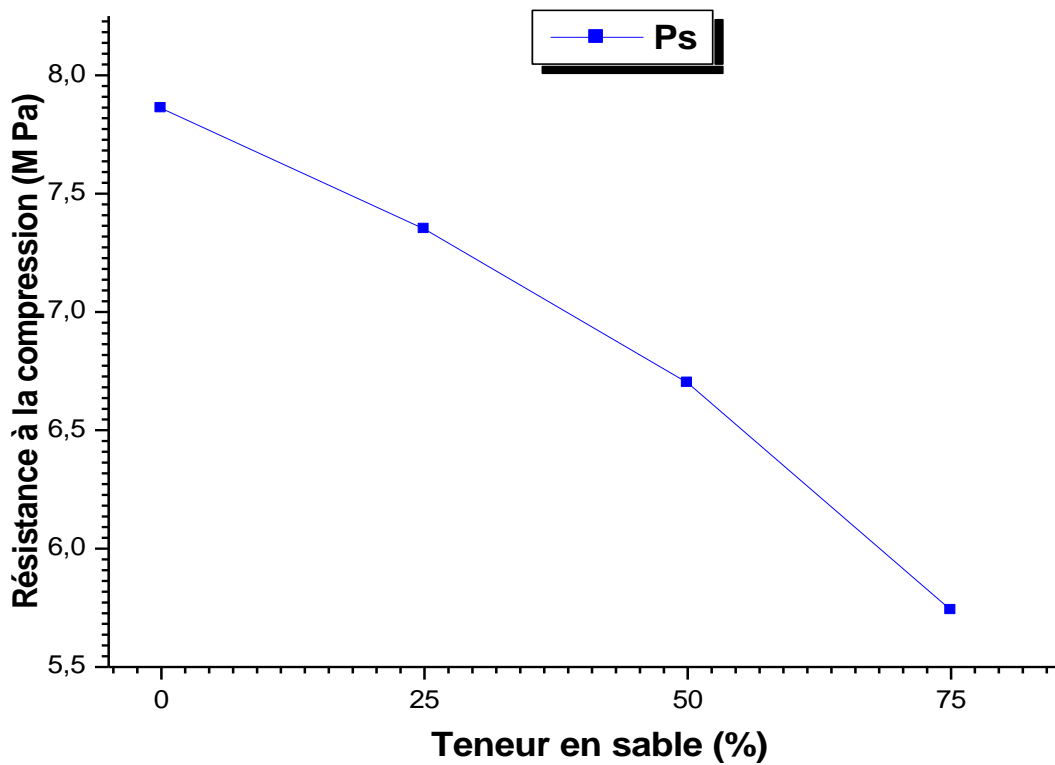


Figure III.24 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en sable pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28 jours.

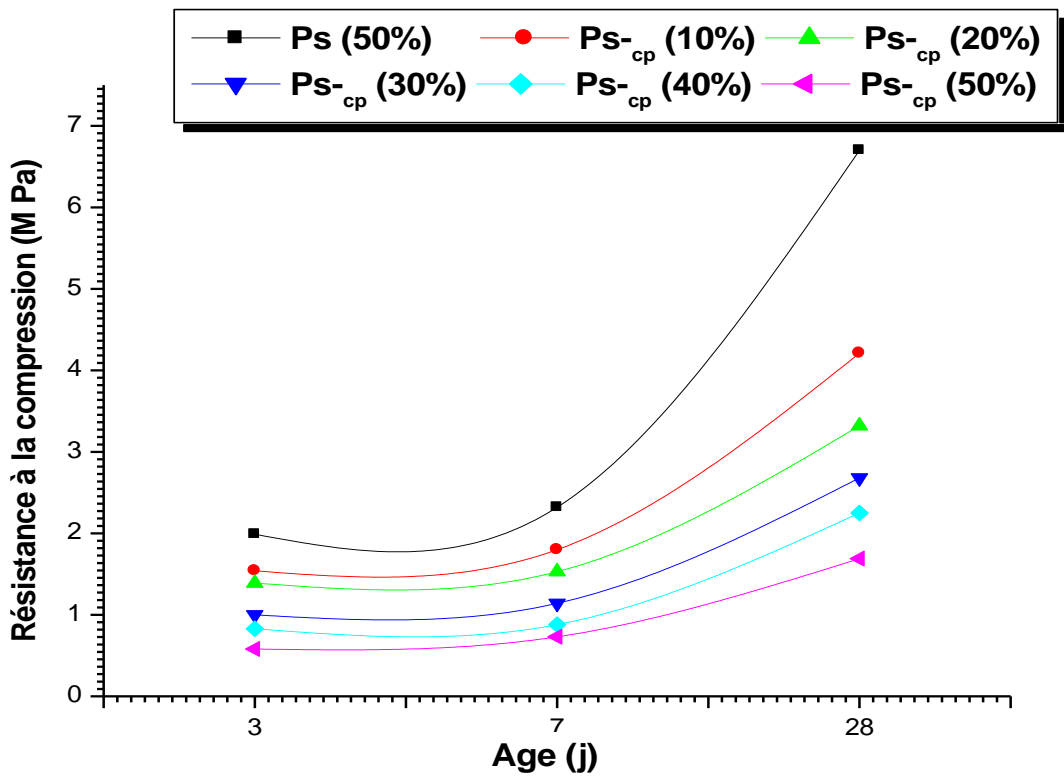


Figure III.25 : Variation de la résistance à la compression de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois avec le temps.

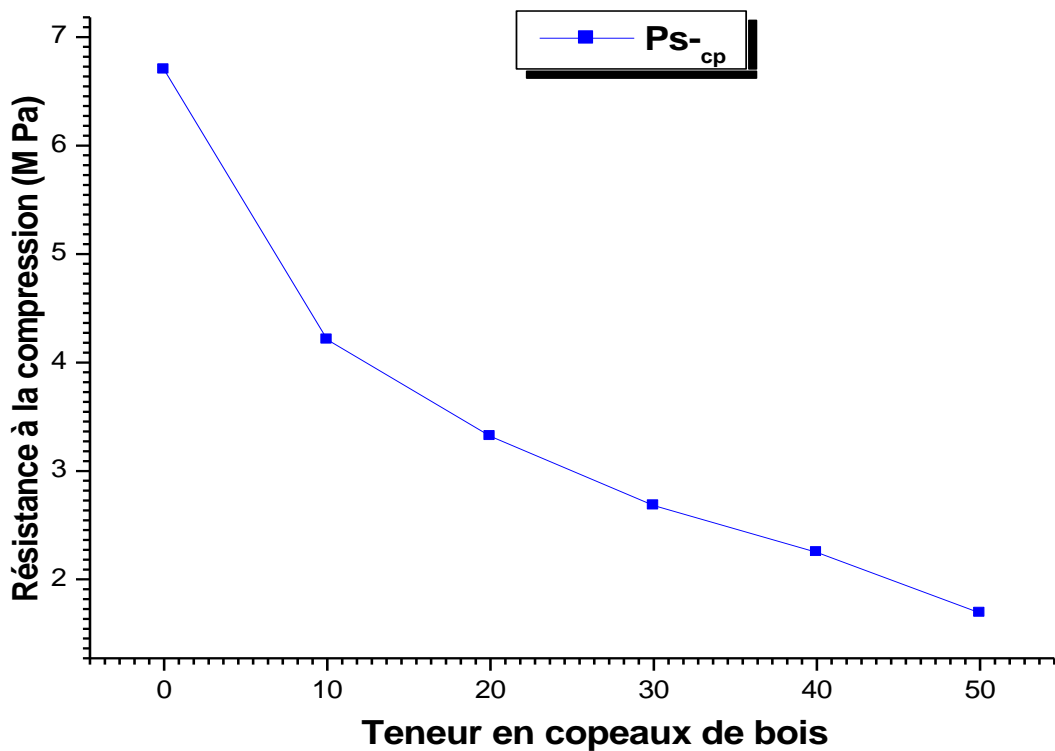


Figure III.26 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

### VI.2.1. Discussion et interprétation

- D'après les figures (III.21), (III.23) et (III.25), on remarque que la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge pour toutes les compositions élaborées. Ceci peut être expliqué par le déroulement de la réaction d'hydratation du plâtre dans les compositions en fonction du temps.

- D'après les figures (III.22), (III.26), on peut constater aussi que la résistance à la compression à l'âge de 28 jours diminue avec l'ajout des copeaux de bois, elle arrive à une valeur minimale égale à **1,91 MPa** pour la composition **plâtre + 50% copeaux de bois** et **1,69 MPa** pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois**. Cela est dû à l'incorporation des copeaux de bois, qui crée des vides et, par conséquence, une diminution des propriétés mécaniques.

- D'après la figure (III.24), on voit que la résistance à la compression décroît avec l'augmentation des teneurs en sable, elle atteint une valeur minimale égale à **5,75MPa** pour 75% de sable dunaire. La diminution de la résistance à la compression est justifiée par l'effet que l'ajout des grains du sable qui comble les vides existants dans la matrice.

### VII. Etude du retrait

Lors du séchage, et en absence de toute charge extérieure, les échantillons diminuent spontanément de volume. Cette diminution s'appelle variation dimensionnelle ou encore retrait. Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du plâtre ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage ; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite.

Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$ , et sur une moyenne de trois éprouvettes différentes munies par des plots à leurs extrémités.

La variation du retrait de différentes compositions étudiées en fonction de l'âge en jours est représentée dans les tableaux (III.17), (III.18) et (III.19) ci-dessous.

Tableau III.17 : Variation du retrait pour la composition plâtre + copeaux de bois.

Teneurs en copeaux (%)	Composition (mm/m)	Age en jours			
		1j	3j	7j	28j
0	P <sub>réf</sub>	0,050 ± 0,017	0,061 ± 0,045	0,080 ± 0,052	0,091 ± 0,039
10	P <sub>cp</sub> (10%)	0,060 ± 0,004	0,069 ± 0,005	0,087 ± 0,008	0,097 ± 0,008
20	P <sub>cp</sub> (20%)	0,069 ± 0,032	0,075 ± 0,018	0,090 ± 0,009	0,153 ± 0,019
30	P <sub>cp</sub> (30%)	0,074 ± 0,011	0,081 ± 0,026	0,121 ± 0,015	0,182 ± 0,054
40	P <sub>cp</sub> (40%)	0,080 ± 0,010	0,096 ± 0,006	0,206 ± 0,009	0,217 ± 0,532
50	P <sub>cp</sub> (50%)	0,094 ± 0,018	0,150 ± 0,054	0,271 ± 0,059	0,311 ± 0,092

Tableau III.18 : Variation du retrait de la composition plâtre + sable dunaire.

Teneurs en sable (%)	Composition (mm/m)	Age en jours			
		1j	3j	7j	28j
0	P <sub>réf</sub>	0,050 ± 0,017	0,061 ± 0,045	0,080 ± 0,052	0,091 ± 0,039
25	Ps (25%)	0,052 ± 0,018	0,098 ± 0,087	0,145 ± 0,063	0,177 ± 0,074
50	Ps (50%)	0,090 ± 0,030	0,139 ± 0,032	0,162 ± 0,027	0,195 ± 0,033
75	Ps (75%)	0,130 ± 0,113	0,219 ± 0,143	0,256 ± 0,287	0,308 ± 0,270

Tableau III.19 : Variation du retrait de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.

Teneurs en copeaux (%)	Composition (mm/m)	Age en jours			
		1j	3j	7j	28j
0	Ps (50%)	0,090 ± 0,030	0,139 ± 0,032	0,162 ± 0,027	0,195 ± 0,033
10	Ps- <sub>cp</sub> (10%)	0,116 ± 0,019	0,153 ± 0,035	0,172 ± 0,025	0,205 ± 0,021
20	Ps- <sub>cp</sub> (20%)	0,122 ± 0,013	0,166 ± 0,018	0,183 ± 0,022	0,271 ± 0,021
30	Ps- <sub>cp</sub> (30%)	0,134 ± 0,024	0,172 ± 0,044	0,198 ± 0,653	0,292 ± 0,639
40	Ps- <sub>cp</sub> (40%)	0,140 ± 0,004	0,185 ± 0,039	0,232 ± 0,055	0,311 ± 0,066
50	Ps- <sub>cp</sub> (50%)	0,166 ± 0,024	0,190 ± 0,005	0,285 ± 0,017	0,352 ± 0,017

La variation du retrait des composites à l'état durci en fonction des constituants et de l'âge des éprouvettes est illustrée par les courbes des figures ci-dessous :

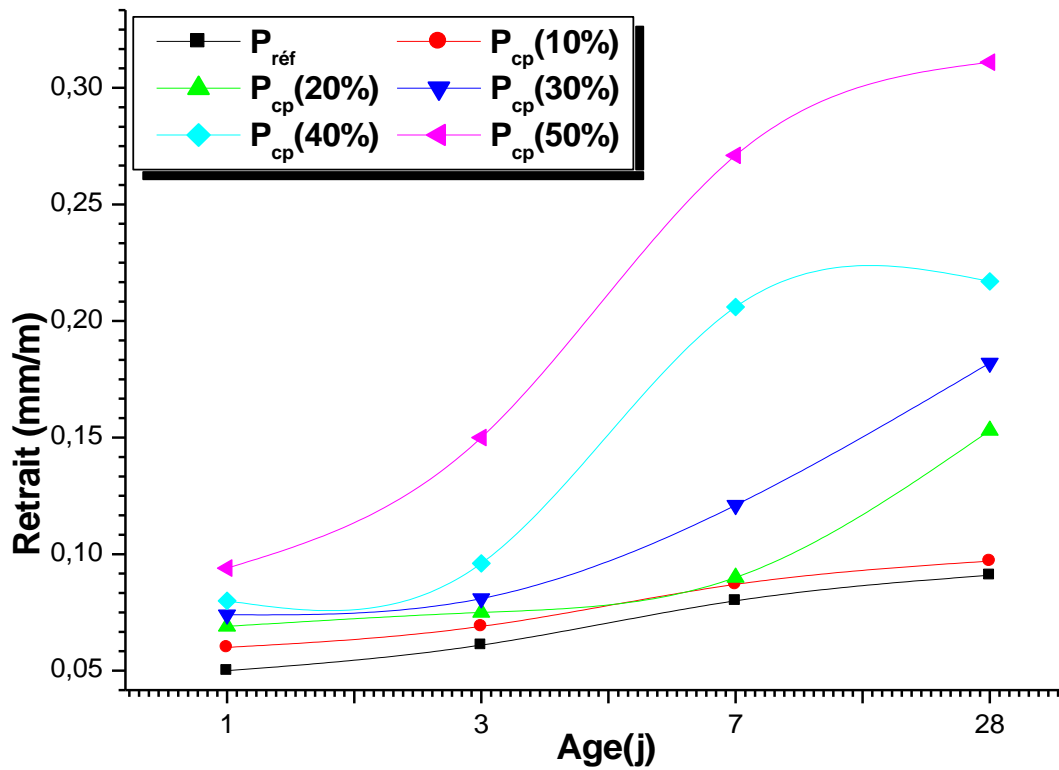


Figure III.27 : Variation du retrait au cours du temps de la composition plâtre + copeaux de bois.

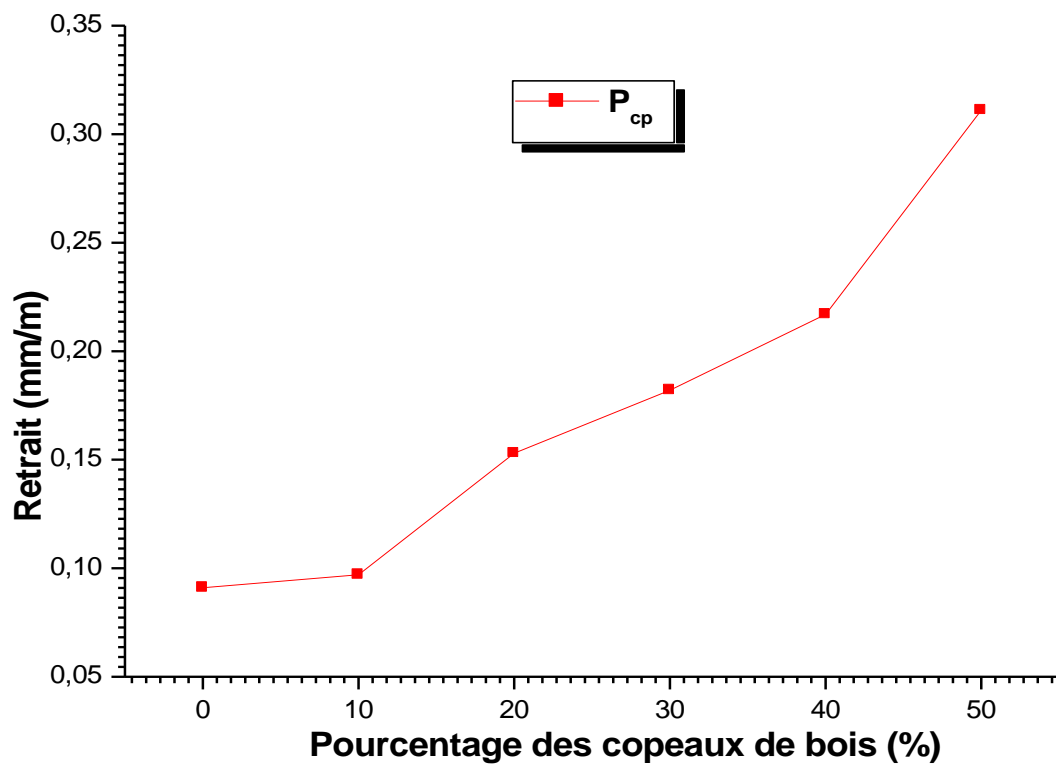


Figure III.28 : Variation du retrait en fonction de la teneur en copeaux de bois pour la composition plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

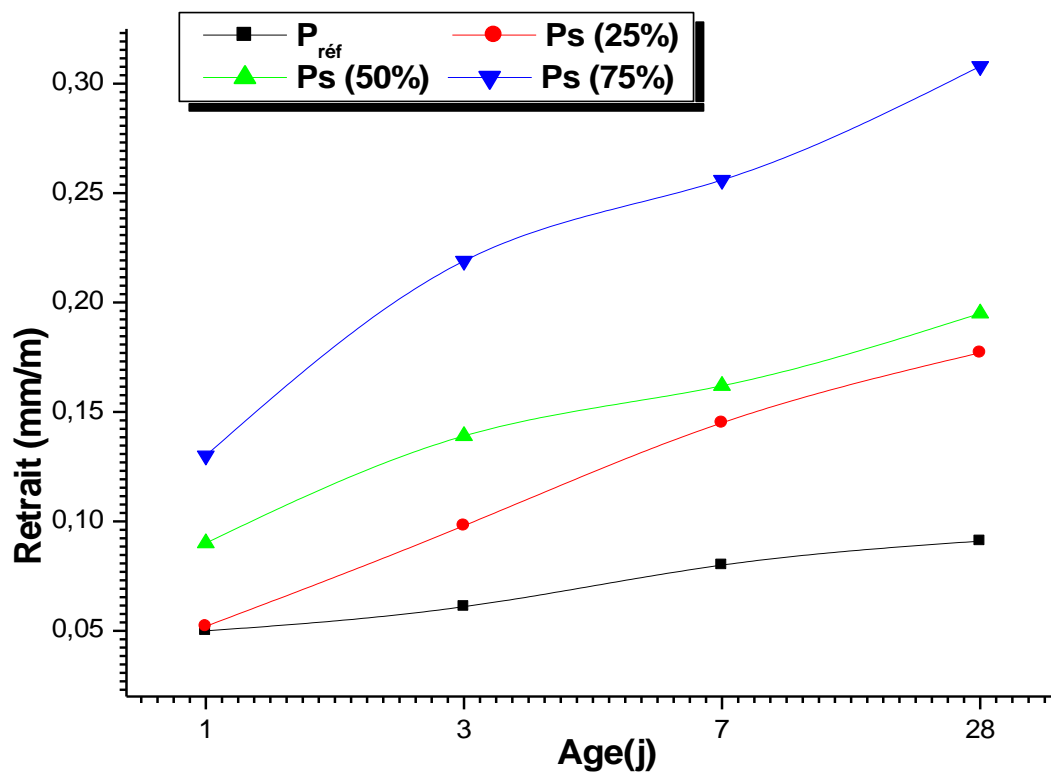


Figure III.29 : Variation du retrait au cours du temps de la composition plâtre + sable dunaire.

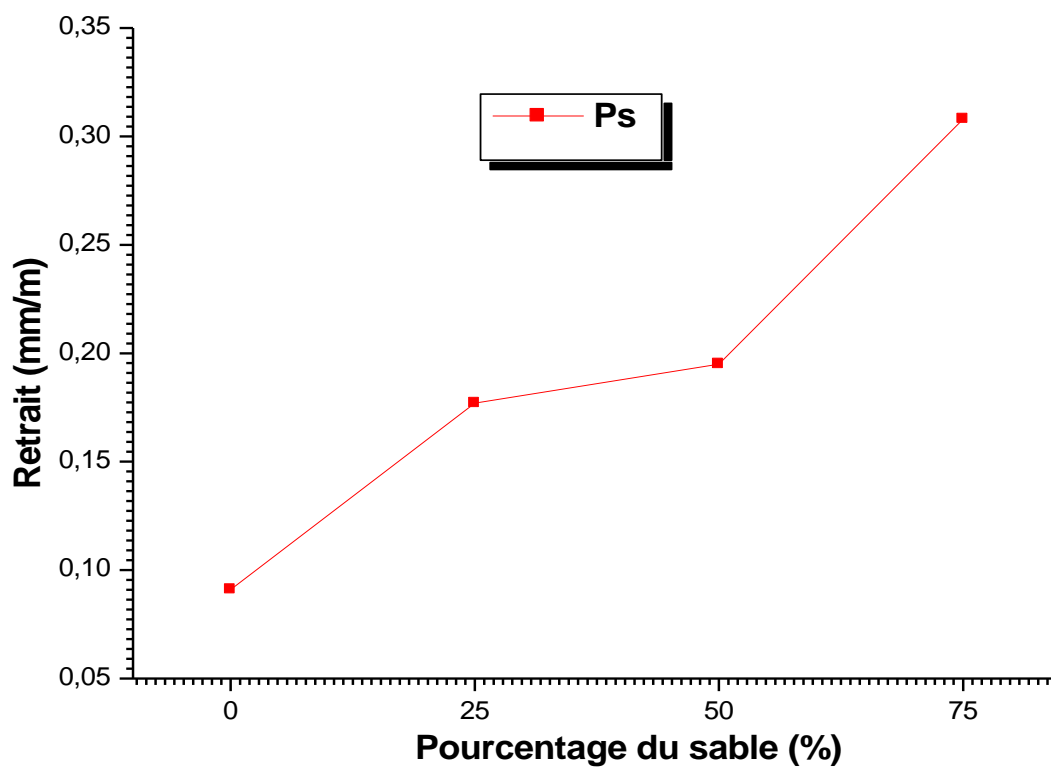


Figure III.30 : Variation du retrait en fonction de la teneur en sable pour la composition plâtre + sable dunaire à l'âge de 28 jours.

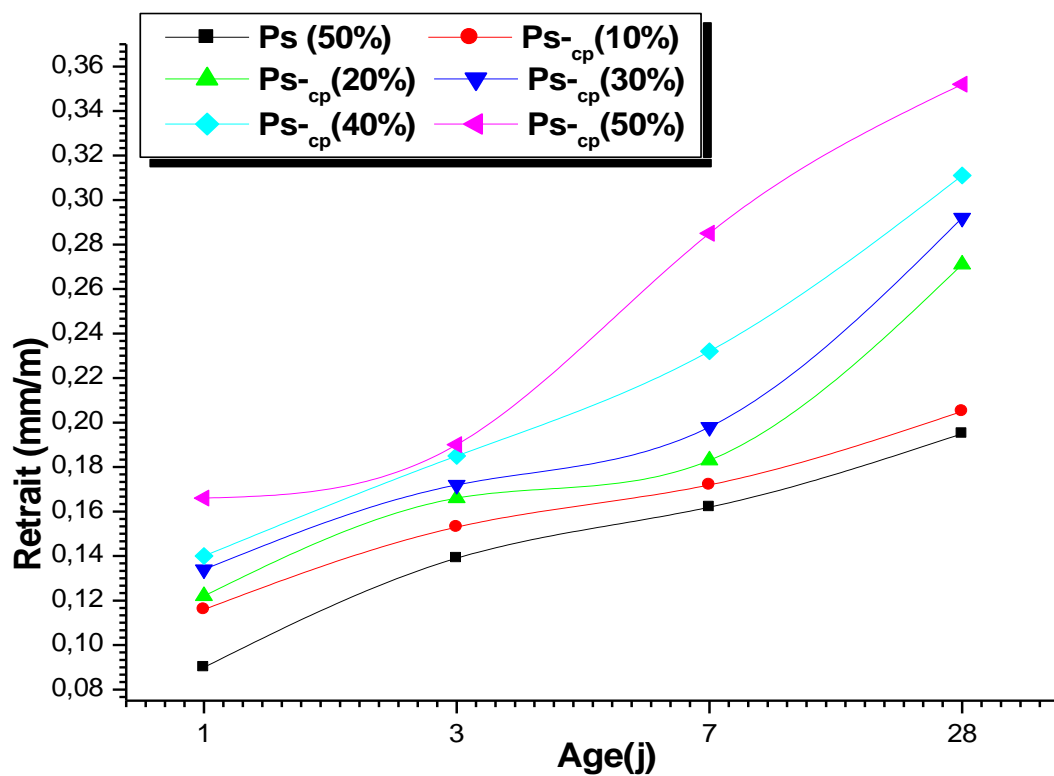


Figure III.31 : Variation du retrait au cours du temps pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.

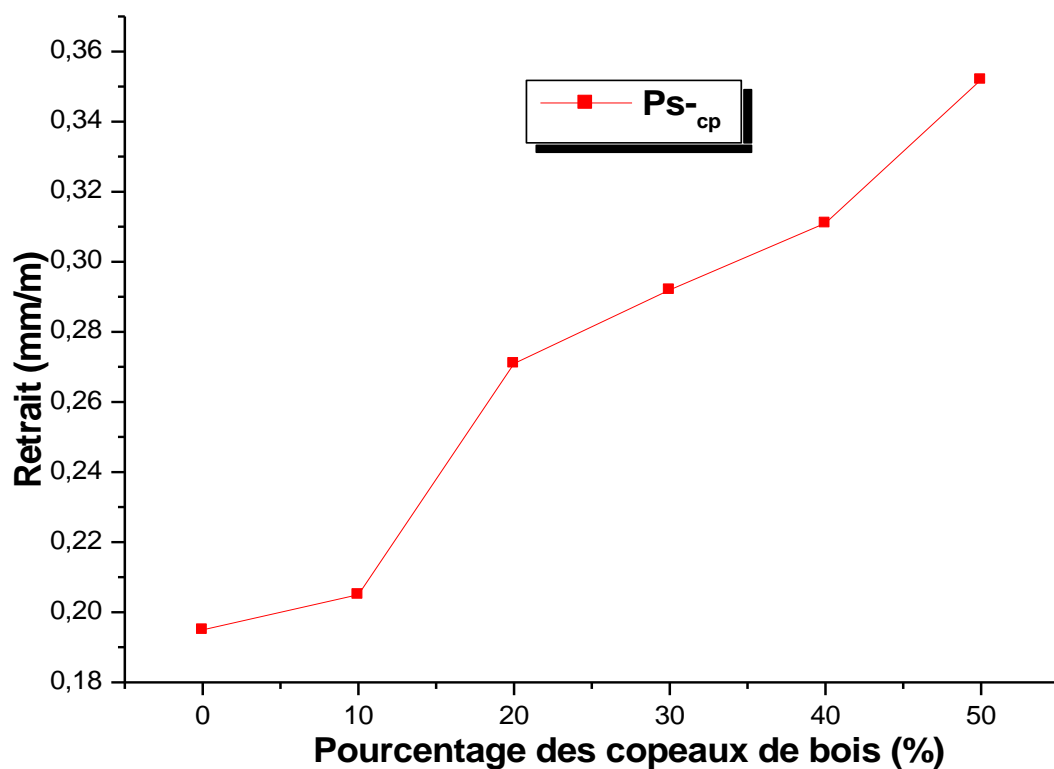


Figure III.32 : Variation du retrait en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois à l'âge de 28 jours.

### VII.1. Discussion et interprétation

- D'après la figure (III.27), on constate qu'au jeune âge le retrait de la composition **plâtre + copeaux de bois** croît plus rapidement que celui du plâtre témoin (plâtre pur) qui est dû probablement à l'évaporation d'une quantité d'eau très importante.

- D'après les figures (III.28) et (III.32), nous pouvons remarquer que le retrait des compositions (plâtre + copeaux de bois et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois) augmente au fur et à mesure que l'on augmente le dosage en copeaux de bois, et il est nettement plus important que celui des compositions témoins. Ceci est liée au séchage du composite ; l'absorption d'eau par les granulats de bois entraîne des ajouts plus importants d'eau de gâchage pour les forts dosages. Une partie de cette eau, non nécessaire à l'hydratation, doit par la suite être évacuée dans des délais plus ou moins longs. Pratiquement le retrait élevé constitue un véritable inconvénient pour la composition, ce qui rend peut être nécessaire le traitement des copeaux de bois [Gotteicha M, (2005) et Belhadj B, (2007)].

- D'après les figures (III.28), (III.32), on a enregistré une augmentation maximale de retrait pour les compositions plâtre + 50% copeaux de bois et plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois égale successivement à **0,311mm/m** et **0,352 mm/m**.

- D'après la figure (III.29), on observe que le retrait augmente progressivement avec l'âge de confection des éprouvettes. Ceci peut s'expliquer par la consommation de l'eau par l'hydratation, qui est le principal facteur de retrait.

- D'après la figure (III.30), on voit que le retrait de la composition plâtre + sable dunaire croît avec l'ajout du sable dunaire, il arrive à une valeur maximale égale à **0,308 mm/m**. Cette augmentation est due à l'introduction des grains fins du sable qui diminue la compacité du squelette.

- D'après la figure (III.31), on remarque que le retrait au début évolue rapidement, mais au-delà du septième jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la stabilisation au-delà de quatre semaines. Il paraît que le retrait est aussi proportionnel à la proportion des copeaux de bois.

## VIII. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent clairement l'effet de l'ajout des copeaux de bois et le sable dunaire sur les caractéristiques physico-mécaniques des composites étudiés à l'âge de 28 jours.

1- Les gammes de la masse volumique apparente dans les quelles varient ces composites sont de **1042,60 à 775,12 kg/m<sup>3</sup>** pour la composition **plâtre + copeaux de bois**, **1266,40 à 1476,95 kg/m<sup>3</sup>** pour la composition **plâtre + sable dunaire**, et de **1258,25 à 923,30 kg/m<sup>3</sup>** pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois**.

2- L'étude de la porosité a montré que :

- L'ajout des copeaux de bois augmente la porosité de **40,50 à 61,79%** pour la composition **plâtre + copeaux de bois** et de **30,41 à 46,34%** pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois**.

- Par contre l'ajout du sable dunaire diminue la porosité de **30,64 à 22,32%** pour la composition **plâtre + sable dunaire**.

3- Les dosages en teneur des copeaux de bois et du sable dunaire allant successivement de 10 à 50% (avec un pas de 10%) et de 25 à 75% (avec un pas de 25%) montrent que les résistances en flexion diminuent de l'ordre :

- De **2,80 à 1,49 MPa** pour la composition **plâtre + copeaux de bois (P<sub>cp</sub>)**.
- De **3,83 à 3,32 MPa** pour la composition **plâtre + sable dunaire (Ps)**.
- De **2,34 à 1,35 MPa** pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (Ps-<sub>cp</sub>)**.

Rappelons que la résistance en flexion du plâtre témoin (référence **P<sub>réf</sub>**) est de **4,21MPa**.

Les résultats obtenus en compression diminuent de l'ordre :

- De **5,06 à 1,91 MPa** pour la composition **plâtre + copeaux de bois (P<sub>cp</sub>)**.
- De **7,35 à 5,74 MPa** pour la composition **plâtre + sable dunaire (Ps)**.
- De **4,21 à 1,69 MPa** pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (Ps-<sub>cp</sub>)**. Rappelons que la résistance en compression du plâtre témoin (référence **P<sub>réf</sub>**) est de **7,86 MPa**.

4- L'étude de retrait a montré que l'ajout des copeaux de bois et des grains fins du sable augmente le retrait; on a enregistré les valeurs suivantes :

- De **0,097 à 0,311mm/m** pour la composition **plâtre + copeaux de bois ( $P_{cp}$ )**.
- De **0,177 à 0,308 mm/m** pour la composition **plâtre + sable dunaire (Ps)**.
- De **0,205 à 0,352 mm/m** pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois ( $P_{s-cp}$ )**. Notons que le retrait du plâtre témoin (référence  $P_{réf}$ ) est de **0,091mm/m**.

On conclut que l'augmentation des teneurs en copeaux de bois diminue la masse volumique apparente et augmente la porosité, car, plus la composition est dense, plus sa porosité diminue, et par conséquent ses résistances sont grandes.

D'après l'expérimentation, la porosité est une caractéristique très importante, elle peut être influencée sur les autres caractéristiques.

Théoriquement nous proposons un traitement hydrofuge des produits finaux. Ce traitement est destiné à réduire les pénétrations d'eau sous forme liquide (pluie), tout en ne modifiant pas ou peu les caractéristiques des produits. On peut utiliser un hydrofuge de surface pour support poreux à cinq polymères. La fiche technique de l'hydrofuge est représentée dans l'annexe (03).

D'après [Calvat G, (2009)] les produits (compositions) obtenus ne peuvent pas être utilisés comme des éléments porteurs ou de structure à cause de la résistance qui diminue avec l'augmentation des teneurs en copeaux de bois. Cette diminution peut contribuer à des performances thermiques.

# CHAPITRE

IV

Mesure des propriétés thermo-physiques  
des composites

## I. Introduction

La première partie de ce chapitre est consacrée à une étude expérimentale pour déterminer les propriétés thermiques des composites étudiés à savoir le plâtre de référence ( $P_{\text{réf}}$ ), le plâtre avec copeaux de bois ( $P_{\text{cp}}$ ), le plâtre avec sable ( $P_{\text{s}}$ ) et enfin plâtre avec 50% sable dunaire et copeaux de bois ( $P_{\text{s-cp}}$ ). Les études expérimentales sont effectuées au laboratoire de recherche de génie civil de l'université de Laghouat à l'aide d'un analyseur thermique Hot Disk (TPS 500) munis par des sondes TPS (Transient Plane Source).

La deuxième partie est consacrée à une étude croisée des propriétés thermo-physiques afin de connaître l'influence des propriétés physiques sur les grandeurs thermiques des composites étudiés.

Généralement les grandeurs thermiques sont très sensibles aux conditions climatiques du laboratoire et influencé par les modes de conservation.

## II. Grandeurs thermiques

Pour répondre à l'objectif fixé dans le cadre de cette recherche, à savoir le comportement thermique des matériaux de construction étudiés, nous avons entrepris des mesures de conductivité thermique, capacité thermique et diffusivité thermique sur des échantillons du plâtre de différentes formulations, à l'âge de 28jours et à l'état sec.

Les mesures sont effectuées sur des échantillons de  $(4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3)$  au laboratoire de recherche de génie civil à l'université de Laghouat par la technique TPS (Transient Plane Source ou Hot Disk).

Rappelons que les compositions sont comme suit :

- **Composition 1** : (Plâtre de référence ou témoin) ; Plâtre pur noté [ $P_{\text{réf}}$ ]
- **Composition 2** : Plâtre avec des pourcentages variables des copeaux de bois de 10% à 50% noté [ $P_{\text{cp}}$  (10%),  $P_{\text{cp}}$  (20%),  $P_{\text{cp}}$  (30%),  $P_{\text{cp}}$  (40%) et  $P_{\text{cp}}$  (50%)].
- **Composition 3** : Plâtre avec des pourcentages variables du sable dunaire 25%, 50%, 75% ce mortier est noté [ $P_{\text{s}}$  (25%),  $P_{\text{s}}$  (50%) et  $P_{\text{s}}$  (75%)].

- **Composition 4** : Plâtre avec 50% du sable dunaire, et des pourcentages variables des copeaux de bois de 10% à 50% ce mortier est noté [**Ps<sub>-cp</sub> (10%)**, **Ps<sub>-cp</sub> (20%)**, **Ps<sub>-cp</sub> (30%)**, **Ps<sub>-cp</sub> (40%)** et **Ps<sub>-cp</sub> (50%)**].

## II.1. Conductivité thermique

L'étude de la conductivité thermique utile après 28jours a été faite sur toutes les compositions. Les résultats des valeurs du coefficient de conductivité thermique des éprouvettes sont portés aux tableaux (IV.1), (IV.2) et (IV.3).

**Tableau IV.1** : Variation de la conductivité thermique pour la composition plâtre + copeaux de bois.

Compositions	P <sub>réf</sub>	P <sub>cp</sub> (10%)	P <sub>cp</sub> (20%)	P <sub>cp</sub> (30%)	P <sub>cp</sub> (40%)	P <sub>cp</sub> (50%)
(λ) W/m.K	0,736	0,612	0,425	0,357	0,310	0,276
Diminution (%)	-	16,85	42,26	51,49	57,88	62,50

**Tableau IV.2** : Variation de la conductivité thermique pour la composition plâtre + sable dunaire.

Compositions	P <sub>réf</sub>	Ps (25%)	Ps (50%)	Ps (75%)
(λ) W/m.K	0,736	0,875	1,000	1,293
Augmentation (%)	-	18,89	35,87	75,68

**Tableau IV.3** : Variation de la conductivité thermique pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.

Compositions	Ps (50%)	Ps <sub>-cp</sub> (10%)	Ps <sub>-cp</sub> (20%)	Ps <sub>-cp</sub> (30%)	Ps <sub>-cp</sub> (40%)	Ps <sub>-cp</sub> (50%)
(λ) W/m.K	1,000	0,861	0,762	0,649	0,558	0,451
Diminution (%)	-	13,90	23,80	35,10	44,20	54,90

### II.1.1. Discussion et interprétation

- D'après le tableau (IV.1), on observe que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation des teneurs en copeaux de bois. Cette diminution atteinte une valeur maximale de **0,276 W/m.K** équivalente à **62,50%** de la valeur initiale (**P<sub>réf</sub>**). Le comportement thermique du composite **plâtre + copeaux de bois** peut s'expliquer par l'influence de plusieurs facteurs. Tout d'abord, le bois lui-même a une conductivité thermique plus faible que celle du plâtre, ce qui lui permet, donc, de constituer une barrière thermique qui améliore les performances thermiques.

- D'après le tableau (IV.2), on remarque que la conductivité thermique augmente lorsque les teneurs en sable dunaire augmentent, elle atteint une valeur maximale de **1,293 W/m.K** équivalente à **75,68%** de la valeur initiale ( $P_{réf}$ ). D'après [Hafsi F, (2010)] l'augmentation de la conductivité thermique des composites est dû à la conductivité thermique du sable relativement élevée (**0,80 W/m.K**).

- D'après le tableau (IV.3), on constate que la conductivité thermique décroît avec l'augmentation des teneurs en copeaux de bois. Cette diminution atteint une valeur maximale de **0,451 W/m.K** équivalente à **54,90%** de la valeur initiale  $P_s$  (**50%**). Ceci peut être expliqué par l'effet de la porosité sur les compositions.

- Les valeurs de la conductivité thermique ne peuvent en aucun cas refléter les valeurs des matériaux dits isolants thermiques. D'après la norme NF P75-101, les matériaux sont considérés comme isolants lorsque leur conductivité thermique est inférieure à **0,065 W/m.K**.

## II.2. Capacité thermique

L'étude de la capacité thermique utile après 28 jours a été faite sur toutes les compositions. Les résultats des valeurs de la capacité thermique des éprouvettes sont portés aux tableaux (IV.4), (IV.5) et (IV.6).

**Tableau IV.4 :** Variation de la capacité thermique pour la composition **plâtre + copeaux de bois**.

Composition	$P_{réf}$	$P_{cp}$ (10%)	$P_{cp}$ (20%)	$P_{cp}$ (30%)	$P_{cp}$ (40%)	$P_{cp}$ (50%)
$(\rho_c)$ KJ/m <sup>3</sup> .K	7935,66	7191,95	6873,51	6260,55	5823,10	5583,32

**Tableau IV.5 :** Variation de la capacité thermique pour la composition **plâtre + sable dunaire**.

Composition	$P_{réf}$	$P_s$ (25%)	$P_s$ (50%)	$P_s$ (75%)
$(\rho_c)$ KJ/m <sup>3</sup> .K	7935,66	8164,10	8329,73	8584,98

**Tableau IV.6 :** Variation de la capacité thermique pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois**.

Composition	$P_s$ (50%)	$P_{s-cp}$ (10%)	$P_{s-cp}$ (20%)	$P_{s-cp}$ (30%)	$P_{s-cp}$ (40%)	$P_{s-cp}$ (50%)
$(\rho_c)$ KJ/m <sup>3</sup> .K	8329,73	8024,98	7927,79	7583,6	7402,46	6487,35

### II.2.1. Discussion et interprétation

- D'après les tableaux (IV.4), (IV.6), on remarque que la capacité thermique diminue avec l'augmentation des teneurs en copeaux de bois, elle atteint une valeur maximale de **5583,32 KJ/m<sup>3</sup>.K** pour la composition **plâtre + 50% copeaux de bois P<sub>cp</sub> (50%)** et **6487,35 KJ/m<sup>3</sup>.K** pour la composition **plâtre + 50% sable de dune + 50% copeaux de bois Ps-<sub>cp</sub> (50%)**.

- D'après le tableau (IV.5), on observe que la capacité thermique augmente lorsque la teneur en sable dunaire augmente. L'augmentation atteint une valeur maximale de **8584,98 KJ/m<sup>3</sup>.K**. Ceci est dû à la diminution de la porosité à cause de sable qui comble les vides existants et diminue la porosité.

- La capacité thermique varie inversement avec l'augmentation des teneurs en copeaux de bois. Ceci peut être expliqué que lorsqu'on ajoute les granulats de bois, la masse volumique diminue, ce qui conduit à l'augmentation de la porosité c-à-d crée des pores. Ces pores contribuent à la diminution de la conductivité et de la capacité thermique.

- Nos résultats sont en accord avec les travaux de [**Hafsi F, (2010)**] sur des composites plâtre-fibre des palmiers dattiers.

### II.3. Chaleur spécifique

Les résultats des valeurs de la chaleur spécifique sont déterminés par la relation suivante :

$$\rho c = \rho \times c \quad \dots\dots\dots (IV. 1)$$

Avec

**$\rho c$** : La capacité thermique (KJ/m<sup>3</sup>.K).

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

**$c$**  : Chaleur spécifique (J/kg.K).

Les résultats des valeurs de la chaleur spécifique des éprouvettes sont portés aux tableaux (IV.7), (IV.8) et (IV.9).

**Tableau IV.7 : Variation de la chaleur spécifique pour la composition plâtre + copeaux de bois.**

Composition	P <sub>réf</sub>	P <sub>cp</sub> (10%)	P <sub>cp</sub> (20%)	P <sub>cp</sub> (30%)	P <sub>cp</sub> (40%)	P <sub>cp</sub> (50%)
(c) J/kg.K	6826,43	6898,09	6937,68	7063,53	7198,08	7203,17

**Tableau IV.8 :** Variation de la chaleur spécifique pour la composition **plâtre + sable dunaire**.

Composition	$P_{réf}$	<b>Ps (25%)</b>	<b>Ps (50%)</b>	<b>Ps (75%)</b>
(c) <b>J/kg.K</b>	6826,43	6446,70	6104,83	5812,64

**Tableau IV.9 :** Variation de la chaleur spécifique pour la composition **plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois**.

Composition	<b>Ps (50%)</b>	<b>Ps-cp (10%)</b>	<b>Ps-cp (20%)</b>	<b>Ps-cp (30%)</b>	<b>Ps-cp (40%)</b>	<b>Ps-cp (50%)</b>
(c) <b>J/kg.K</b>	6104,83	6377,89	6590,78	6717,69	6955,96	7026,26

### II.3.1. Discussion et interprétation

- D'après les tableaux (IV.7), (IV.9) on remarque une augmentation de la chaleur spécifique avec l'augmentation des teneurs en copeaux de bois, elle atteint une valeur maximale de **7203,17 J/kg.K** pour la composition plâtre + 50% copeaux de bois **P<sub>cp</sub> (50%)** et **7026,26 J/kg.K** pour la composition plâtre + 50% sable de dune + 50% copeaux de bois **Ps-cp(50%)**.

- D'après le tableau (IV.8), on remarque une diminution de la chaleur spécifique avec l'augmentation des teneurs en sable. La diminution atteint une valeur minimale de **5812,64 J/kg.K** ceci est dû à l'augmentation de la masse volumique qui est lui inversement proportionnelle.

### II.4. Résistance thermique (épaisseur équivalente)

A titre indicatif et pour confirmer la nécessité de poser un isolant, nous comparons l'épaisseur nécessaire de différents matériaux pour obtenir la même résistance thermique conformément à la norme française NF P75-101 où ( $R \geq 0,50 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) et ( $\lambda \leq 0,065 \text{ W/m.K}$ ).

La résistance thermique est déterminée par la relation suivante :

$$R = e/\lambda \quad \dots\dots\dots (IV. 2)$$

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

**$\lambda$  :** Conductivité thermique ( $\text{W/m.K}$ ).

**e :** L'épaisseur en (m).

L'épaisseur équivalente des différentes compositions, pour une résistance thermique constante égale à  $0,50 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ , est donnée par les tableaux (IV.10), (IV.11) et (IV.12) et illustrée par les figures (IV.1), (IV.2) et (IV.3).

Tableau IV.10 : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + copeaux de bois.

Composition	$P_{réf}$	$P_{cp}$ (10%)	$P_{cp}$ (20%)	$P_{cp}$ (30%)	$P_{cp}$ (40%)	$P_{cp}$ (50%)
( $\lambda$ ) W/m.K	0,736	0,612	0,425	0,357	0,310	0,276
(e) cm	36,80	30,60	21,25	17,85	15,50	13,80
Diminution (%)	-	16,85	42,26	51,49	57,88	62,50

Tableau IV.11 : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + sable dunaire.

Composition	$P_{réf}$	$P_s$ (25%)	$P_s$ (50%)	$P_s$ (75%)
( $\lambda$ ) W/m.K	0,736	0,875	1,000	1,293
(e) cm	36,80	43,75	50	64,65
Augmentation (%)	-	18,89	35,87	75,68

Tableau IV.12 : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.

Composition	$P_s$ (50%)	$P_{s-cp}$ (10%)	$P_{s-cp}$ (20%)	$P_{s-cp}$ (30%)	$P_{s-cp}$ (40%)	$P_{s-cp}$ (50%)
( $\lambda$ ) W/m.K	1,000	0,861	0,762	0,649	0,558	0,451
(e) cm	50	43,05	38,1	32,45	27,9	22,55
Diminution (%)	-	13,90	23,80	35,10	44,20	54,90

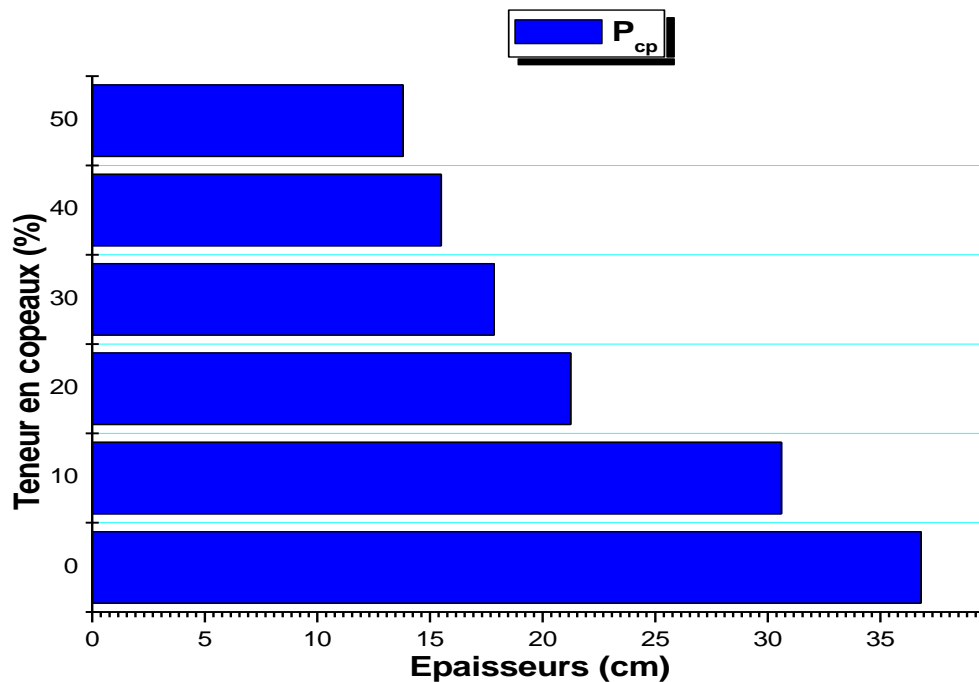


Figure IV.1 : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + copeaux de bois.

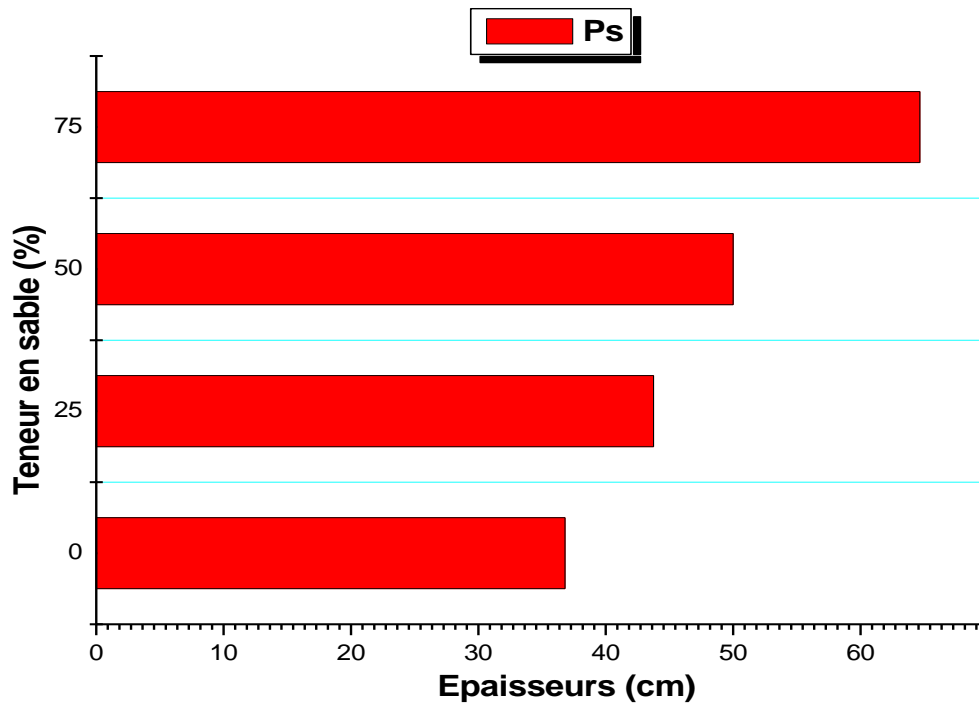


Figure IV.2 : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + sable dunaire.

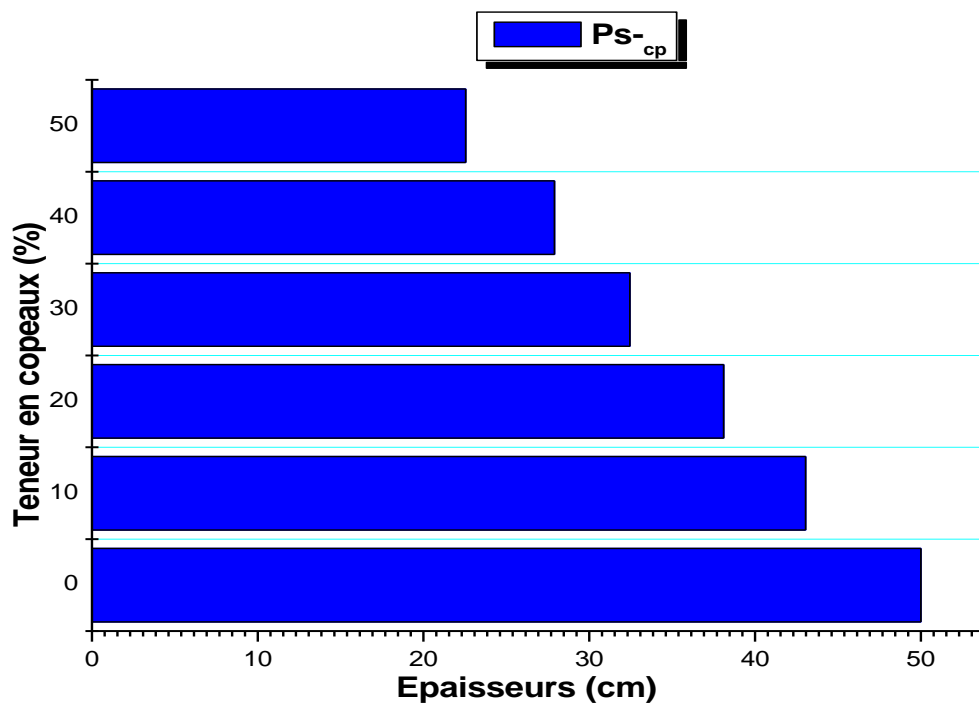


Figure IV.3 : L'épaisseur équivalente de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.

### II.4.1. Discussion et interprétation

- D'après la figure (IV.1), on constate que l'épaisseur de la composition plâtre + copeaux de bois ( $P_{cp}$ ) diminue de **62,50%** à celle du plâtre de témoin ( $P_{réf}$ ). Ceci est dû à la chute de la conductivité thermique. Thermiquement, le pouvoir isolant de **36,8 cm** de la composition plâtre pur ( $P_{réf}$ ) est semblable à **13,8 cm** de la composition plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (**50%**), ce qui économise le matériau.

- D'après la figure (IV.2), les résultats obtenus permettent de prouver que l'épaisseur de la composition plâtre + sable dunaire ( $Ps$ ) augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique de **36,8 à 64,65 cm** avec la même résistance thermique (**0,5m<sup>2</sup>.K/W**), l'augmentation représente **75,68%** à celle du plâtre pur ( $P_{réf}$ ).

- D'après la figure (IV.3), on constate que l'épaisseur de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois ( $Ps_{-cp}$ ) est diminuée de **54,90%** à celle du plâtre témoin. Ceci est dû à la chute de la conductivité thermique. Notons que la résistance thermique est inversement proportionnelle à la conductivité thermique. De point de vue thermique, le pouvoir isolant de **22,5 cm** de la composition plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois  $Ps_{-cp}$  (**50%**) est semblable à **50 cm** de la composition plâtre + 50% sable dunaire  $Ps$  (**50%**). On conclure que la composition  $P_{cp}$  (**50%**) est la meilleur en terme de la résistance thermique et peut offrir une amélioration de confort thermique très importante avec une épaisseur minimale.

## III. Étude croisée des propriétés thermo-physiques

Dans le but de connaître les paramètres influençant sur les deux grandeurs thermiques essentielles notamment la conductivité et la capacité thermique, nous avons effectué une étude croisée. L'étude est résumée dans les parties suivantes :

### III.1. Relation entre la conductivité thermique et la capacité thermique

La relation entre la conductivité thermique et la capacité thermique s'exprime par les deux propriétés thermiques, à savoir la diffusivité thermique et l'effusivité thermique.

L'effusivité thermique, qui décrit la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe il s'exprime en (**J/.m<sup>2</sup>.k.s<sup>1/2</sup>**), est déterminée par la relation suivante :

$$b = \sqrt{(\lambda \times \rho \times c)} \quad \dots\dots\dots (IV. 3)$$

Avec

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

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

$c$  : Chaleur spécifique (J/kg.K).

La diffusivité thermique décrit la rapidité de déplacement des calories à travers la masse d'un matériau. Notons que la diffusivité thermique des composites étudiés a été mesurée en utilisant la méthode TPS elle s'exprime en (m<sup>2</sup>/s) et déterminée par la relation suivante :

$$a = \lambda / (\rho \times c) \quad \dots\dots\dots (IV. 4)$$

Les résultats des valeurs de la diffusivité thermique et l'effusivité thermique des éprouvettes sont portés aux tableaux (IV.13), (IV.14) et (IV.15).

**Tableau IV.13 : Diffusivité et effusivité thermiques de la composition plâtre + copeaux de bois.**

Composition	P <sub>réf</sub>	P <sub>cp</sub> (10%)	P <sub>cp</sub> (20%)	P <sub>cp</sub> (30%)	P <sub>cp</sub> (40%)	P <sub>cp</sub> (50%)
<b>Diffusivité (a)</b> (m <sup>2</sup> /s) x10 <sup>-7</sup>	0,927	0,850	0,618	0,570	0,532	0,494
<b>Effusivité (b)</b> J/m <sup>2</sup> .k.s <sup>1/2</sup>	2416,74	2097,97	1709,16	1495,00	1343,56	1241,37

**Tableau IV.14 : Diffusivité et effusivité thermiques de la composition plâtre + sable dunaire.**

Composition	P <sub>réf</sub>	Ps (25%)	Ps (50%)	Ps (75%)
<b>Diffusivité (a)</b> (m <sup>2</sup> /s) x10 <sup>-7</sup>	0,927	1,071	1,200	1,506
<b>Effusivité (b)</b> J/m <sup>2</sup> .k.s <sup>1/2</sup>	2416,74	2672,75	2886,13	3331,72

**Tableau IV.15 : Diffusivité et effusivité thermiques de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois.**

Composition	Ps (50%)	Ps-cp (10%)	Ps-cp (20%)	Ps-cp (30%)	Ps-cp (40%)	Ps-cp (50%)
<b>Diffusivité (a)</b> (m <sup>2</sup> /s) x10 <sup>-7</sup>	1,200	1,072	0,961	0,855	0,753	0,695
<b>Effusivité (b)</b> J/m <sup>2</sup> .k.s <sup>1/2</sup>	2886,13	2628,59	2457,84	2218,50	2032,38	1710,50

### III.1.1. Discussion et interprétation

• D'après les tableaux (IV.13), (IV.14) et (IV.15), on remarque que la diffusivité et l'effusivité thermiques s'accroissent avec la conductivité thermique et décroissent avec la chaleur spécifique. Elles ont varié successivement de :

•  $0,927 \times 10^{-7}$  à  $0,494 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $2416,74$  à  $1241,37 \text{ J/m}^2.\text{k.s}^{1/2}$  pour la composition plâtre + copeaux de bois ( $P_{cp}$ ).

•  $1,071 \times 10^{-7}$  à  $1,506 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $2672,75$  à  $3331,72 \text{ J/m}^2.\text{k.s}^{1/2}$  pour la composition plâtre + sable dunaire ( $P_s$ ).

•  $1,072 \times 10^{-7}$  à  $0,695 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $2628,59$  à  $1710,50 \text{ J/m}^2.\text{k.s}^{1/2}$  pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois ( $P_{s-cp}$ ).

• Enfin on adoptera les compositions ayant une faible diffusivité et une grande effusivité sans oublier l'effet de la capacité thermique et de la conductivité thermique. Notons que plus la diffusivité est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau et plus l'effusivité thermique est bas, plus le matériau se réchauffe vite ce qui influence directement sur le temps de retard.

### III.2. Relation entre la conductivité thermique et la porosité

La variation de la conductivité thermique et de la porosité, de différentes compositions étudiées, est représentée dans les figures (IV.4), (IV.5) et (IV.6)

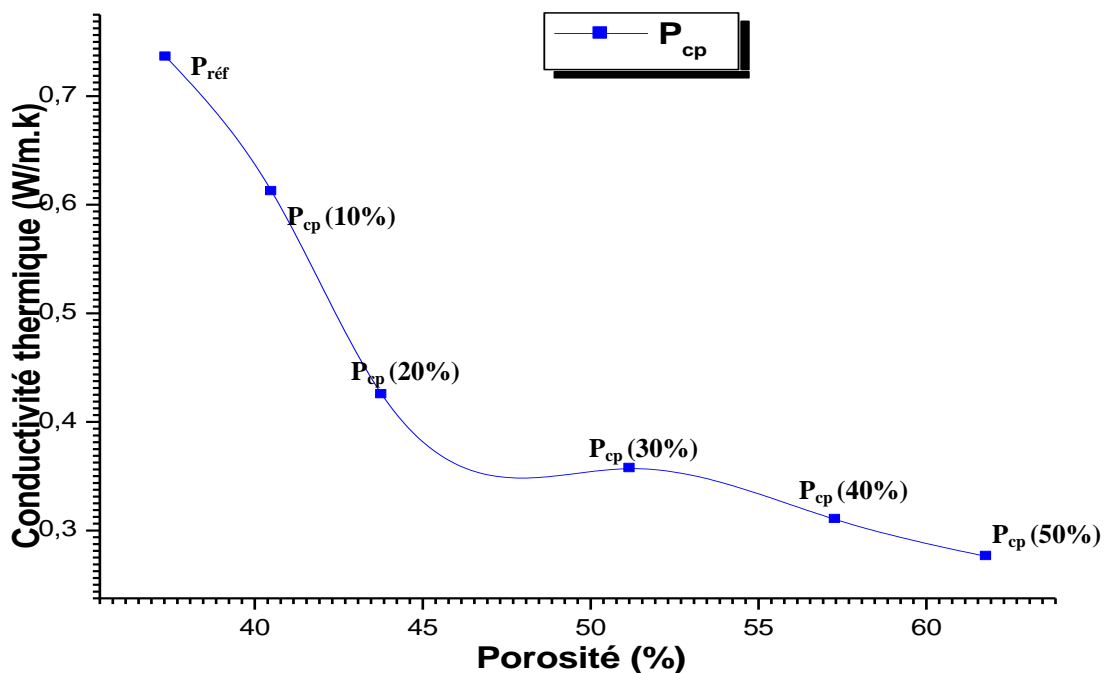


Figure IV.4 : Relation entre la conductivité thermique et la porosité de la composition plâtre + copeaux de bois ( $P_{cp}$ ).

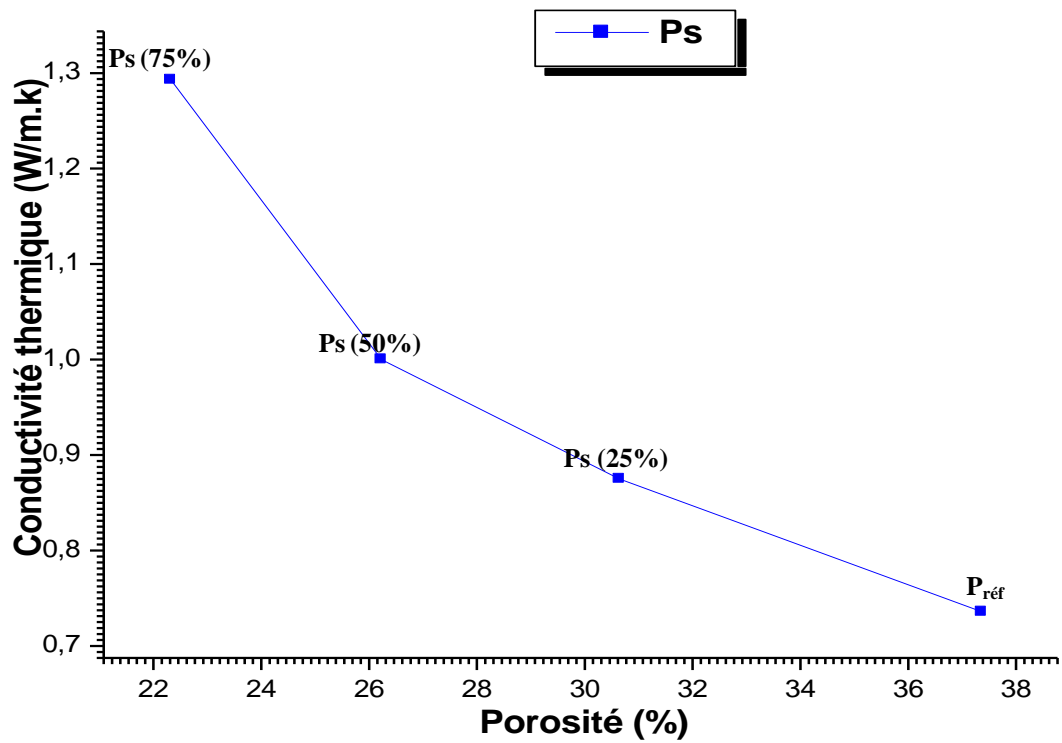


Figure IV.5 : Relation entre la conductivité thermique et la porosité de la composition plâtre + sable dunaire (Ps).

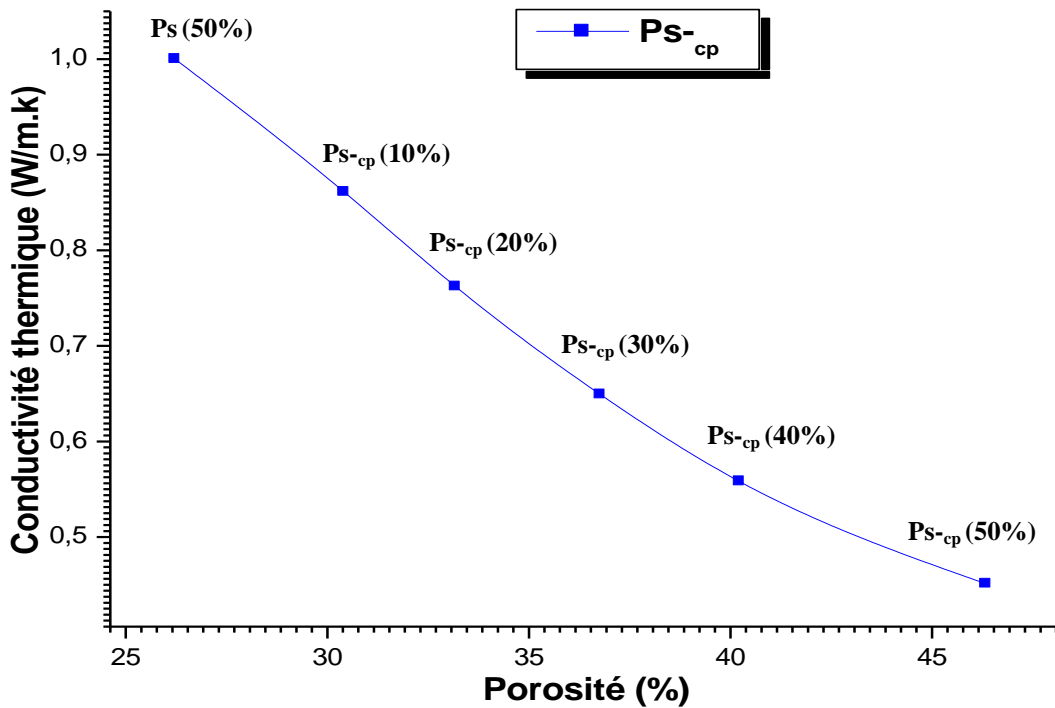


Figure IV.6 : Relation entre la conductivité thermique et la porosité de la composition plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (Ps\_cp).

### III.2.1. Discussion et interprétation

• D'après les figures (IV.4), (IV.5) et (IV.6), on constate que la porosité est inversement proportionnelle à la conductivité thermique, c-à-d plus la composition est poreuse plus sa conductivité thermique est affaiblie.

La relation entre la porosité et la conductivité thermique de différentes compositions est donnée par les équations polynomiales ci-après :

- $y = 0,001X^2 - 0,119X + 3,743$  avec  $R^2 = 0,960$  pour la composition ( $P_{cp}$ ).
- $y = 0,002X^2 - 0,179X + 4,080$  avec  $R^2 = 0,986$  pour la composition ( $Ps$ ).
- $y = 5,991E-4X^2 - 0,0713X + 2,4647$  avec  $R^2 = 0,998$  pour la composition ( $Ps_{cp}$ ).

## IV. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent clairement l'idée que la conductivité thermique des composites étudiés est fortement influencée par l'ajout des éléments de faible densité au plâtre, comme les copeaux de bois. Ces derniers permettent de l'alléger, c'est-à-dire de diminuer la masse volumique des composites à base de plâtre. Il est évident que le facteur déterminant cette diminution est la porosité, elle augmente au fur et à mesure que l'on ajoute les copeaux de bois.

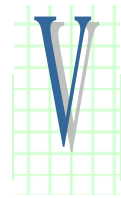
Thermiquement l'ajout des copeaux de bois augmente la porosité ce qui a pour effet d'abaisser la conductivité thermique de (**0,736 à 0,276 W/m.K**) pour la composition plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (**50%**) et de (**1,00 à 0,451 W/m.K**) pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois  $Ps_{cp}$  (**50%**). D'après les littératures la diminution de la conductivité introduit des performances thermiques à l'enveloppe du bâtiment.

Contrairement, l'accroissement de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en sable peut être expliqué par le fait que les grains de sable qui possèdent une conductivité thermique supérieure à celle de l'air (**0,026 W/m.K**) remplacent graduellement l'air dans les pores.

D'après les tableaux (IV.10), (IV.11) et (IV.12), on constate que **13,8cm** de la composition plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (**50%**) à la même résistance thermique de **36,8cm** de la composition plâtre témoin  $P_{réf}$ . Les parois en plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (**50%**) est très intéressant puisqu'il réduit l'épaisseur de l'ordre de **35,56%**.



# C H A P I T R E



**Application théorique par simulation  
des propriétés thermo-physiques**



## **I. Introduction**

Ce chapitre est considéré comme une synthèse des études effectués sur la contribution à l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments, il est divisé en trois parties :

La première partie est consacrée à la présentation du logiciel utilisé pour la simulation dynamique à savoir l'EnergyPlus et de présenter les avantages et les inconvénients de ce dernier.

La deuxième partie est réservée, en premier lieu, à la description de la cellule utilisant les matériaux étudiés. Notons que le choix de l'emplacement de la cellule (El-Goléa wilaya de Ghardaïa) est justifié par le fait que la matière première des produits finis est d'origine de Ghardaïa, c'est une démarche pour la protection de l'environnement en utilisant des matériaux locaux. Ensuite elle est consacrée à l'évaluation des propriétés thermo-physiques par l'étude de temps de retard et le facteur d'amortissement. Enfin on essayera de faire le choix de la composition idéale.

La troisième partie est consacrée au diagnostic énergétique de la cellule sous les différents environnements proposés et la mise en place des produits finis. Dans le but de juger l'efficacité des produits sur l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, nous proposons une série des simulations sous les différentes configurations.

## **II. Présentation du logiciel de simulation**

### **II.1. Description d'EnergyPlus**

L'outil de simulation choisi pour l'étude de fiabilité des composites étudiés est EnergyPlus version 1. Il s'agit d'un outil de simulation dynamique permettant de prévoir le comportement énergétique de bâtiments. EnergyPlus se base sur les outils BLAST (Building Loads Analyse and System Thermodynamics) et DOE-2, qui ont été développés dans les années 80 et restés en développement avec une nouvelle version disponible tous les 6 mois. Il peut être utilisé par des ingénieurs, des architectes et des chercheurs et c'est le département de l'énergie des États Unis (DOE) qui finance cet outil, le LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) coordonnant le développement [Spitz C, (2012)].

EnergyPlus est uniquement un moteur de calcul sans interface graphique. D'autres outils se sont développés utilisant le moteur de calcul d'EnergyPlus mais avec leur propre interface graphique comme par exemple l'outil Design-Builder. Design-Builder permet la saisie graphique d'un modèle, la gestion de ses bases de données (matériaux, vitres, plannings d'activité, etc.) et gère de façon transparente la liaison au moteur de calcul jusqu'à la restitution des résultats sous forme graphique ou tableau (Figure V.1).

EnergyPlus permet de modéliser le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, la ventilation et de nombreux autres flux d'énergie. Il permet d'effectuer les simulations à un pas de temps inférieur à l'heure, de modéliser des systèmes énergétiques complexes, d'analyser le confort thermique, de traiter du multizone et de gérer la ventilation naturelle.

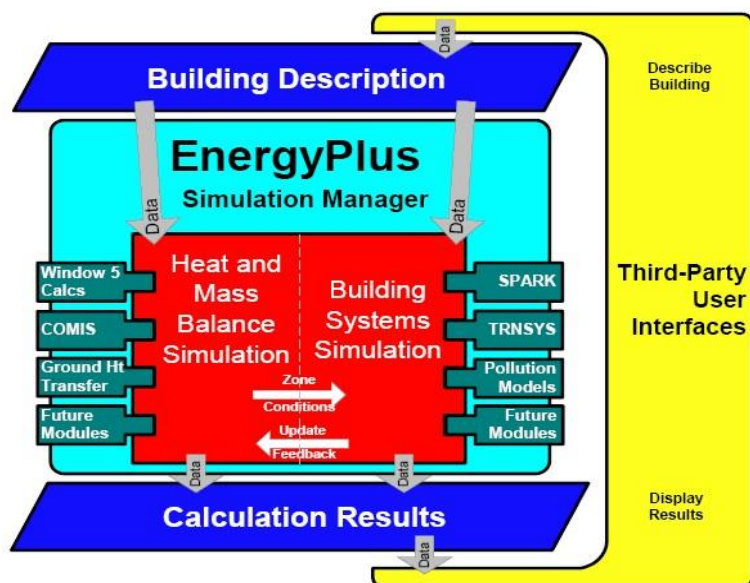


Figure V.1 : EnergyPlus (extrait du manuel d'utilisateur d'EnergyPlus).

## II.2. Fichiers d'entrées d'EnergyPlus

Les fichiers d'entrées d'EnergyPlus sont des fichiers textes caractérisés par l'extension « idf ». Un seul fichier est créé dans lequel chaque valeur de paramètre étudié est remplacée par une chaîne de caractères caractéristique. Les données nécessaires pour la simulation sont représentées dans l'annexe (04).

### III. Raisons et choix des compositions idéales

#### III.1. Description de la cellule

Un échantillon représentatif a servi de support à l'analyse détaillée du comportement thermique du bâtiment dans son contexte local. La distinction de cet échantillon est relative à plusieurs critères qui vont être mentionnés au fur et à mesure dans ce qui suit: Située à El-Goléa wilaya de Ghardaïa dans un climat chaud et aride, pluvieux en hiver, la maison se trouve dans une altitude de 397m avec une longitude de :  $2^{\circ}17$  mn Est et une latitude de:  $30^{\circ}57$  mn Nord et s'insère dans le suburbain du centre-ville figure (V.2). Elle est (f3) en R+t, construite avec double paroi en parpaing (30cm) figure (V.3). La maison ouverte sur la rue par la façade Est, figure (V.4) et sur une cour par la façade sud et ouest figure (V.5).



Figure V.2 : Situation de la maison.

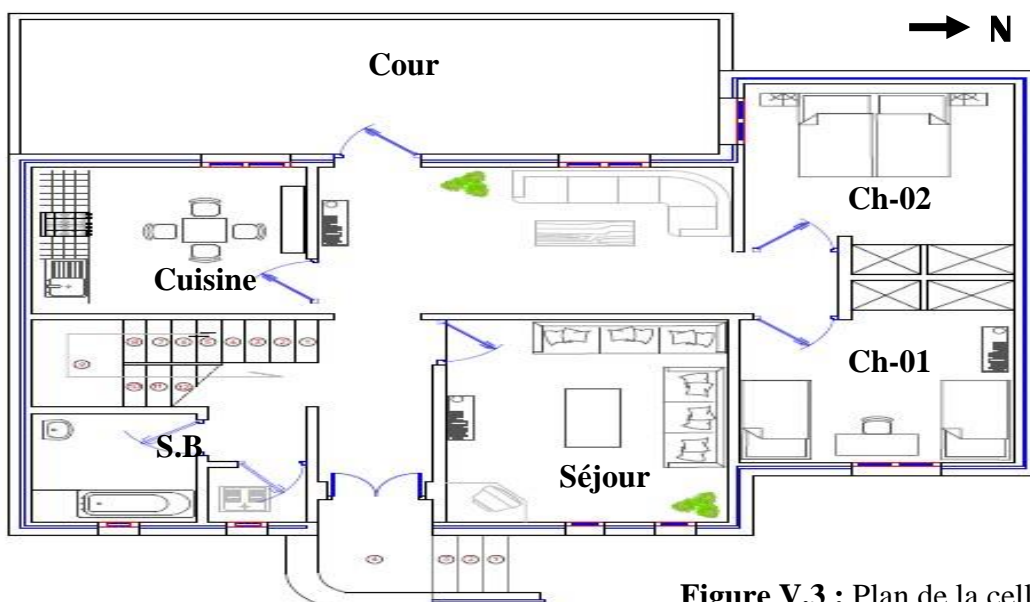


Figure V.3 : Plan de la cellule.



Figure V.4 : Vue sur la façade Est.



Figure V.5 : Vue sur la façade Ouest.

### III.2. Evaluation des propriétés thermo-physiques

L'inertie thermique peut simplement être définie comme la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit. Cette caractéristique est très importante pour garantir un bon confort notamment en été, c'est-à-dire pour éviter les surchauffes.

Cette capacité permet de limiter les effets d'une variation "rapide" de la température extérieure sur le climat intérieur par un déphasage entre la température extérieure et intérieure des murs et par amortissement de l'amplitude de cette variation.

D'après [Asan H, (1998), Chahwane L, (2011), Spitz C, (2012) et Bencheikh H, (2013)] ces propriétés de l'enveloppe du bâtiment sont intéressantes car d'une part elles peuvent être évaluées en fonction de la température des surfaces et fournissent des informations sur le comportement de celle-ci. D'autre part, elles peuvent aussi être simulées à partir des propriétés thermo physiques des matériaux constituant l'enveloppe.

#### III.2.1. Amplitude de la température harmonisée

Elle est définie par la différence des températures maximales et minimales pour un jour. Pour les deux surfaces externe et interne du mur, elle est déterminée par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 A_e &= T_{se \text{ (max)}} - T_{se \text{ (min)}} \\
 A_i &= T_{si \text{ (max)}} - T_{si \text{ (min)}}
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots (V. 1)$$

III.2.2. Temps de retard (déphasage)

C'est le temps de retard entre les pics de la température ( $T_e$ ) à la surface externe et de la température ( $T_i$ ), de la surface interne, il est déterminé par la formule suivante :

$$\phi = t_{T_{se-max}} - t_{T_{si-max}} \dots\dots\dots (V. 2)$$

Avec

$\phi$  : Le temps de retard en (h).

$t_{T_{se-max}}$ : temps correspondant à la température maximale de surface extérieure.

$t_{T_{si-max}}$ : temps correspondant à la température maximale de surface intérieure.

III.2.3. Facteur d'amortissement

C'est le rapport des amplitudes de la température de surface intérieure et de la température de surface extérieure. Plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties, il est déterminé par la formule suivante :

$$f = A_i/A_e \dots\dots\dots (V. 3)$$

Avec

$A_i$ : L'amplitude de la température de surface intérieure en (°C).

$A_e$ : L'amplitude de la température de surface extérieure en (°C).

La figure (V.6) présente le temps de retard et le facteur d'amortissement de l'onde thermique

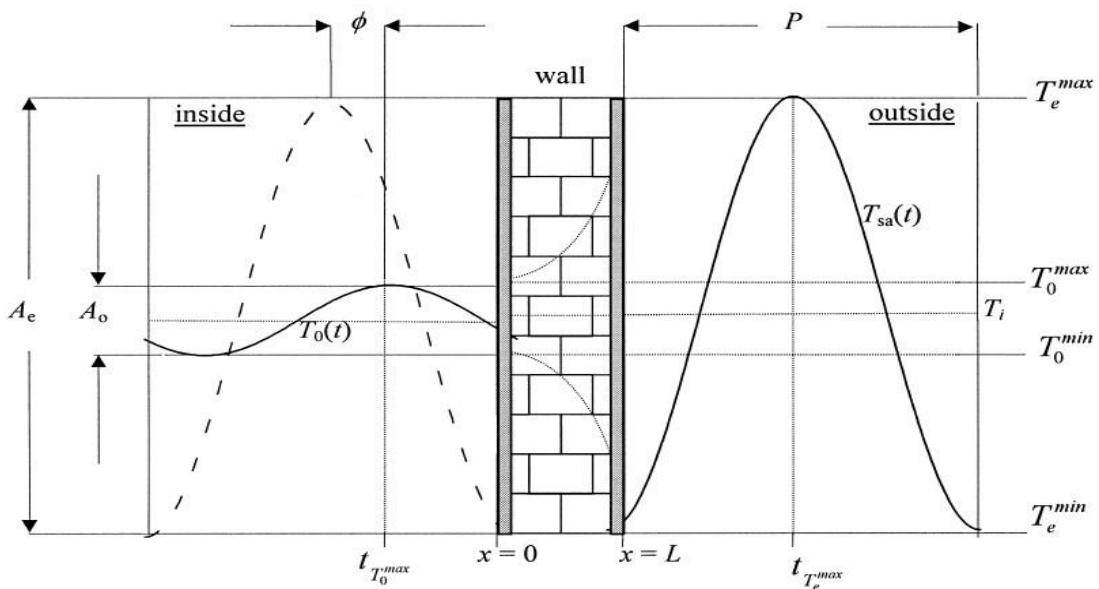


Figure V.6 : Déphasage et amortissement de la température extérieure [Asan H, (2000)].

### III.3. Choix de la composition optimale

Pour le choix raisonnable de l'une des compositions étudiées précédemment qui sont destinées à l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, nous allons essayer d'étudier le transfert thermique à travers un mur non isolé [Nguyen L.H, (2013) et Stéphane E, (2014)] par changement des constituants du mur extérieur de l'enveloppe du bâtiment (couches) [Benoudjafer I, (2010)] en utilisant l'une des cinq compositions suivante :

- **Composition 1** : (Plâtre de référence), Plâtre pur, noté  $P_{\text{réf}}$ .
- **Composition 2** : Plâtre + 50% copeaux de bois, noté :  $P_{\text{cp}}$  (50%).
- **Composition 3** : Plâtre, avec des pourcentages variables du sable dunaire (50 et 75%), ce mortier est noté :  $P_s$  (50%),  $P_s$  (75%).
- **Composition 4** : Plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois ce mortier est noté :  $P_s\text{-cp}$  (50%).

Le choix de ces cinq compositions parmi les quatorze compositions fait l'objet de comprendre :

- 1- L'effet de l'ajout des pourcentages maximaux des copeaux de bois (50%) sur les fluctuations des températures de l'air extérieures et intérieures.
- 2- L'effet de l'ajout des grains fins du sable dunaire sur les flottements des températures de l'air extérieures et intérieures.
- 3- L'effet de la combinaison des grains fins avec d'autre composition à base du plâtre et copeaux de bois sur la variation des températures de l'air extérieures et intérieures.

On note que la simulation prend en compte seulement les températures maximales et l'amplitude thermique journalier du **21 Juillet 2013**, qui est la journée la plus défavorable de l'été avec des températures de l'air extérieur de **30 à 47°C**.

En effet, la simulation prend en considération quatre paramètres essentiels :

- 1- Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment (latitude, longitude, altitude, orientation).
- 2- Propriétés thermo-physiques des cinq compositions étudiées.
- 3- L'épaisseur standardisée du mur (50mm, 60mm, 70mm, 100mm).
- 4- Données du jour ( $T_{\text{ae(max)}}$ ,  $T_{\text{ae(min)}}$ ), pression atmosphérique, vitesse et direction du vent, aspect du ciel).

### III.3.1. L'effet de l'épaisseur de la masse thermique

L'effet des propriétés thermo-physiques des compositions étudiées sur la température de surface intérieure est étudié en variant l'épaisseur du mur supposé construit par l'une des cinq compositions mentionnées précédemment.

Le choix des épaisseurs spécifiques (5cm, 6cm, 7cm, 10cm) est justifié par le fait que le produit final (composition optimale) est destiné à la correction et l'amélioration de l'isolation thermique. Les dimensions et la mise en place des produits sont suivants les conseils de [Calvat G, (2009) et Cordier M.M, (2012)]. Elles sont présentées dans l'annexe (05).

Les valeurs max et min obtenues par simulation numérique à l'aide de l'EnergyPlus de la température de la surface intérieure ( $T_{si}$ ) et extérieure ( $T_{se}$ ) du mur nous ont permis de calculer le temps de retard ( $\emptyset$ ) et le facteur d'amortissement ( $f$ ) des cinq compositions.

Les résultats de la simulation de l'effet de l'épaisseur de la masse thermique sont regroupés dans les tableaux suivants.

- Tableau (III.1), Pour un mur de 5cm.
- Tableau (III.2), Pour un mur de 6cm.
- Tableau (III.3), Pour un mur de 7cm.
- Tableau (III.4), Pour un mur de 10cm.

**Tableau V.1 : Propriétés thermo-physiques du mur de 5 cm.**

Compostions	$T_{si(max)}$ (°C)	$T_{si(min)}$ (°C)	$T_{se(max)}$ (°C)	$T_{se(min)}$ (°C)	( $\emptyset$ )	( $f$ )
<b>P<sub>réf</sub></b>	38,833	35,522	39,636	35,027	3h, 30min	0,718
<b>P<sub>cp</sub> (50%)</b>	38,737	35,361	41,018	33,976	4h, 50min	0,479
<b>Ps (50%)</b>	38,875	35,527	39,403	35,205	2h, 40min	0,797
<b>Ps (75%)</b>	38,903	35,528	39,271	35,308	2h, 20min	0,851
<b>Ps-cp (50%)</b>	38,890	35,359	40,296	34,503	4h, 00min	0,609

**Tableau V.2 : Propriétés thermo-physiques du mur de 6 cm.**

Compostions	$T_{si(max)}$ (°C)	$T_{si(min)}$ (°C)	$T_{se(max)}$ (°C)	$T_{se(min)}$ (°C)	( $\emptyset$ )	( $f$ )
<b>P<sub>réf</sub></b>	38,490	35,848	39,593	35,145	4h, 30min	0,593
<b>P<sub>cp</sub> (50%)</b>	38,298	35,752	41,087	33,993	6h, 20min	0,358
<b>Ps (50%)</b>	38,550	35,840	39,293	35,367	3h, 50min	0,690
<b>Ps (75%)</b>	38,591	35,833	39,109	35,506	3h, 10min	0,765
<b>Ps-cp (50%)</b>	38,482	35,732	40,295	34,592	5h, 10min	0,482

**Tableau V.3** : Propriétés thermo-physiques du mur de 7 cm.

Compositions	T <sub>si (max)</sub> (°C)	T <sub>si (min)</sub> (°C)	T <sub>se (max)</sub> (°C)	T <sub>se (min)</sub> (°C)	(Ø)	(f)
<b>P<sub>réf</sub></b>	38,231	36,095	39,622	35,185	5h, 10min	0,481
<b>P<sub>cp</sub> (50%)</b>	37,979	36,043	41,162	33,968	7h, 20min	0,269
<b>Ps (50%)</b>	38,306	36,075	39,287	35,435	4h, 40min	0,579
<b>Ps (75%)</b>	38,357	36,060	39,056	35,605	4h, 00min	0,665
<b>Ps-cp (50%)</b>	38,184	36,011	40,358	34,599	6h, 10min	0,377

**Tableau V.4** : Propriétés thermo-physiques du mur de 10 cm.

Compositions	T <sub>si (max)</sub> (°C)	T <sub>si (min)</sub> (°C)	T <sub>se (max)</sub> (°C)	T <sub>se (min)</sub> (°C)	(Ø)	(f)
<b>P<sub>réf</sub></b>	37,722	36,547	39,761	35,136	7h, 50min	0,253
<b>P<sub>cp</sub> (50%)</b>	37,374	36,546	41,257	33,903	10h, 40min	0,112
<b>Ps (50%)</b>	37,825	36,513	39,399	35,434	6h, 50min	0,330
<b>Ps (75%)</b>	37,898	36,486	39,129	35,649	6h, 00min	0,405
<b>Ps-cp (50%)</b>	37,602	36,522	40,502	34,519	8h, 50min	0,180

### III.3.1.1. Discussion et interprétation

- D'après les tableaux (V.1), (V.2), (V.3) et (V.4), on remarque que la composition plâtre + 50% copeaux de bois noté par **P<sub>cp</sub> (50%)** parait la meilleure, puisqu'elle présente un temps de retard toujours supérieure et un facteur d'amortissement plus faible. Par contre la composition plâtre +75% sable dunaire noté par **Ps (75%)** parait toujours la mauvaise. Ceci s'explique par leur temps de retard inférieure et leur facteur d'amortissement relativement élevée.

- D'après le tableau (V.1), on voit que le meilleur temps de retard enregistré est de **4h, 50min** pour la composition plâtre + 50% copeaux de bois, avec une différence de **2h, 30min** par rapport à la composition dite mauvaise (plâtre +75% sable dunaire).

- D'après le tableau (V.2), on observe que le meilleur temps de retard enregistré est de **6h, 20min** pour la meilleure composition mentionnée au-dessus. La différence entre le meilleur temps de retard et le mauvais temps est de **3h, 10min**.

- D'après le tableau (V.3), on regarde que le meilleur temps de retard enregistré est de **7h, 20min**, avec une différence de **3h, 20min**, par rapport à la composition plâtre +75% sable dunaire.

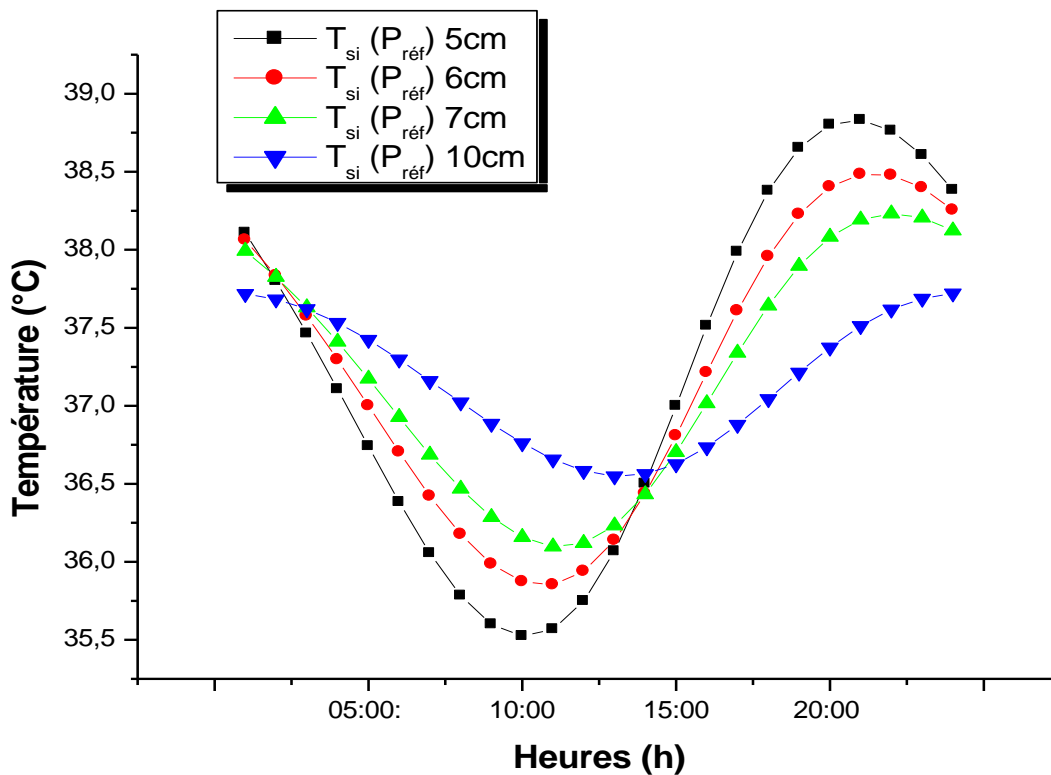
- D'après le tableau (V.4), on constate que le meilleur temps de retard arrivé est de **10h, 40min**, avec une différence de **4h, 40min**, par rapport à la composition plâtre +75% sable dunaire.

### III.3.2. Interprétation croisée des résultats

Cette interprétation croisée portera sur l'influence de l'effet d'épaisseur du mur pour les quatre cas étudiés et les propriétés thermo-physiques des cinq compositions étudiées sur les températures de surfaces intérieures ( $T_{si}$ ). D'après les résultats obtenus, l'évolution de la température de surface intérieure du mur, peut s'expliquer par :

**1. L'effet d'épaisseur :** avec l'augmentation de l'épaisseur de la masse thermique, la température de surface intérieure du mur est diminuée comme la montre les figures (V.7), (V.8), (V.9), (V.10) et (V.11).

**2. L'effet de la diffusivité thermique :** plus la diffusivité du matériau est faible, plus le temps de retard augmente et le facteur d'amortissement diminue.



**Figure V.7 :** L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre pur  $P_{ref}$  sur la température de surface intérieure ( $T_{si}$ ).

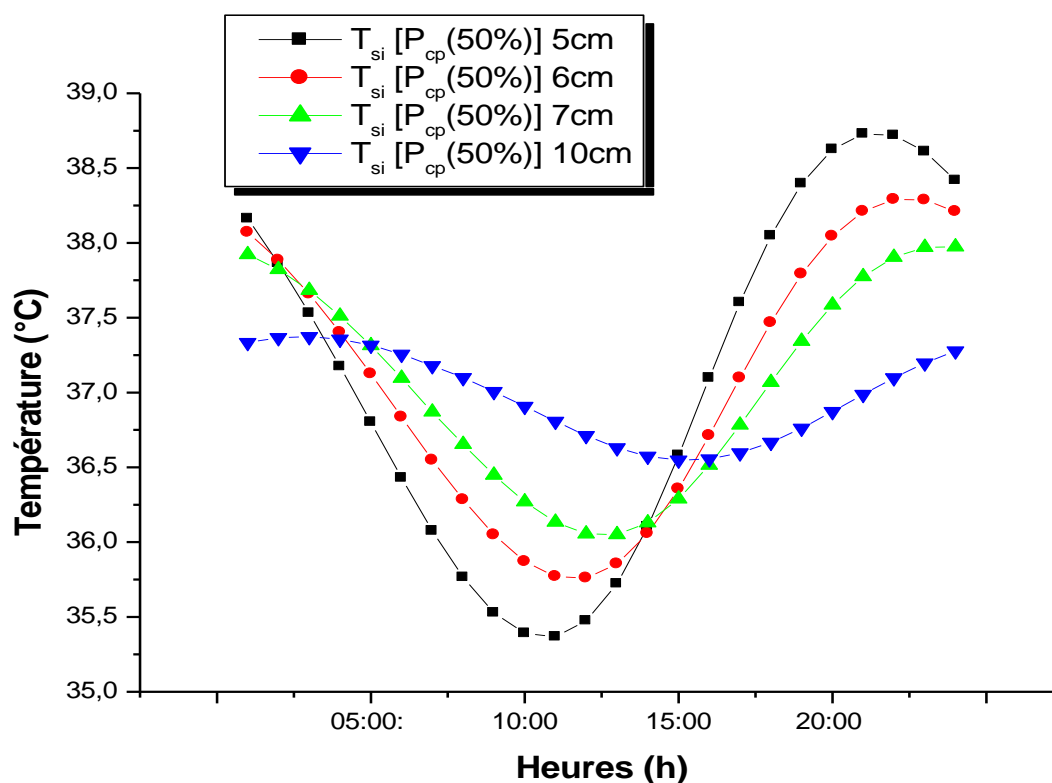


Figure V.8 : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%) sur la température de surface intérieure ( $T_{si}$ ).

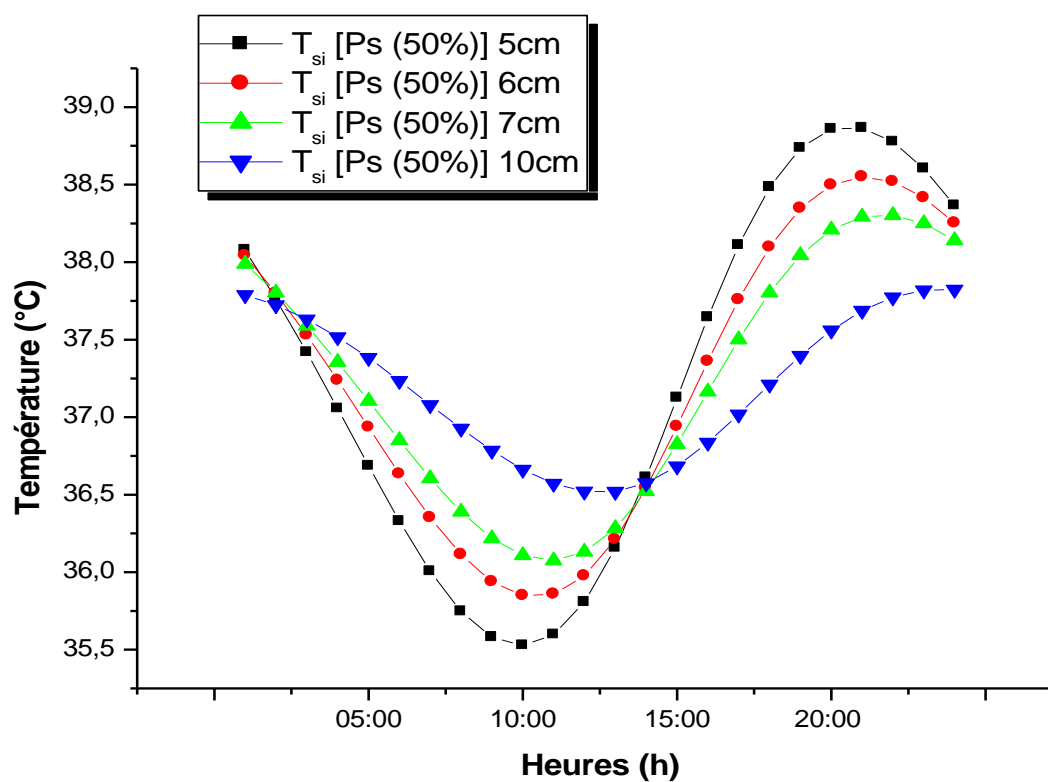


Figure V.9 : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 50% sable dunaire  $Ps$  (50%) sur la température de surface intérieure ( $T_{si}$ ).

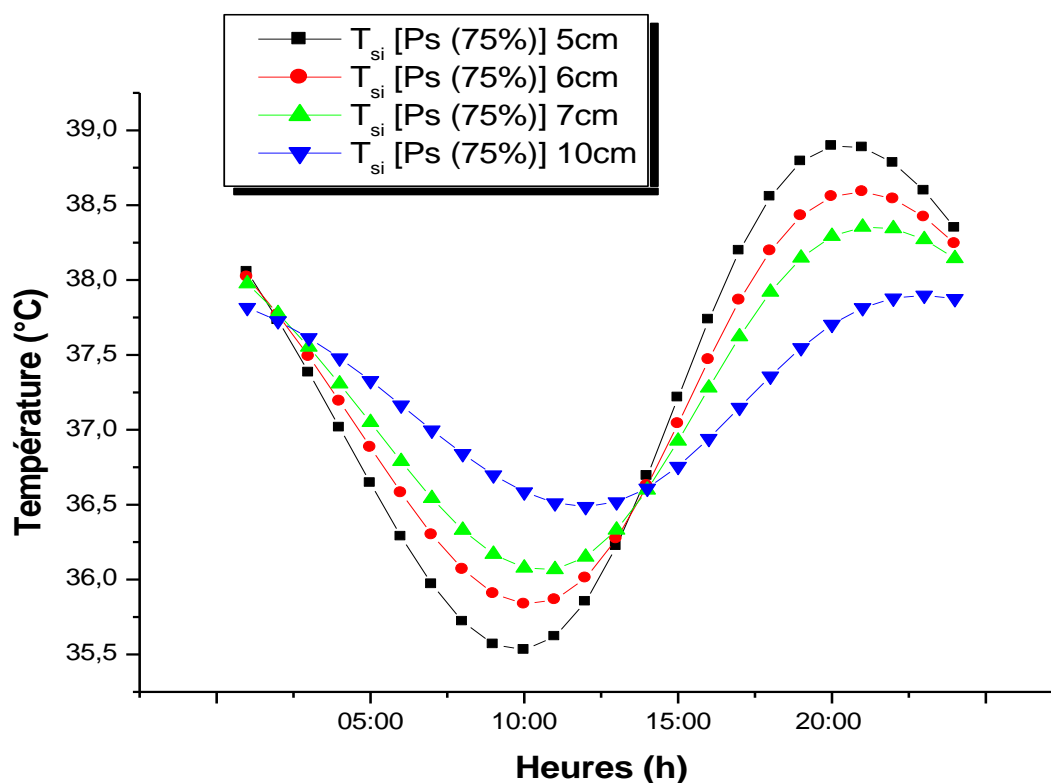


Figure V.10 : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 75% sable dunaire **Ps (75%)** sur la température de surface intérieure ( $T_{si}$ ).

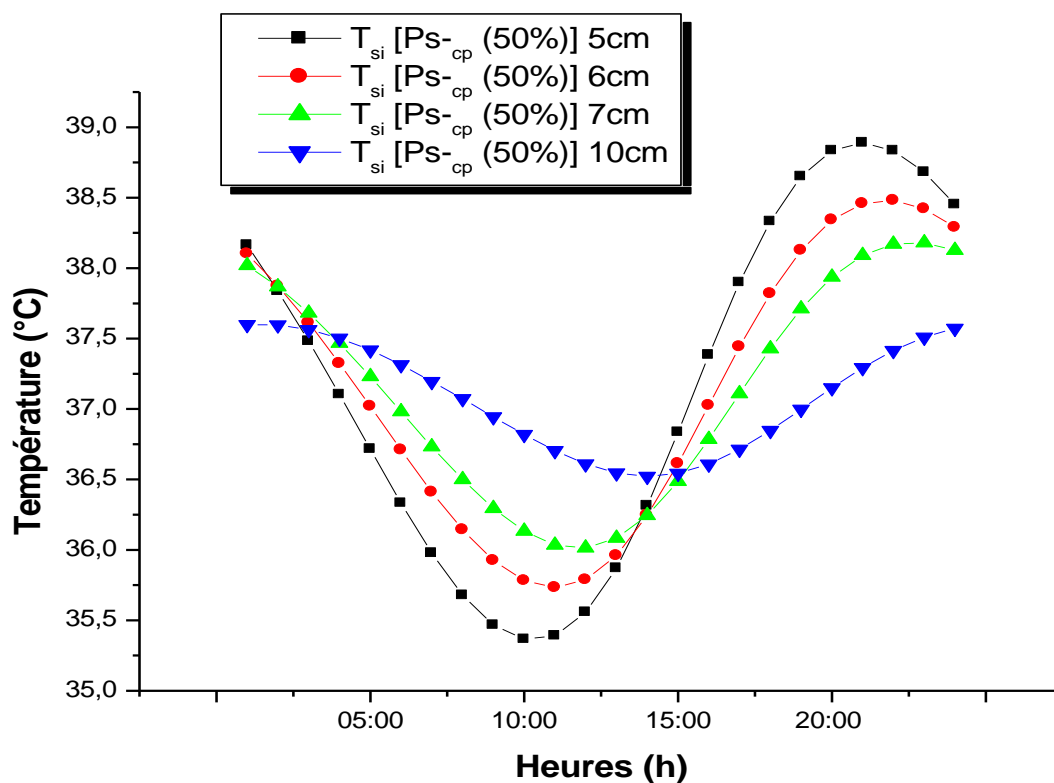


Figure V.11 : L'effet de l'épaisseur du mur en plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois **Ps-cp (50%)** sur la température de surface intérieure ( $T_{si}$ ).

### III.3.2.1. Discussion et interprétation

- D'après les figures (V.7), (V.8), (V.9), (V.10) et (V.11), on remarque que l'augmentation de l'épaisseur de la masse thermique des compositions étudiées diminue la température de surface intérieure ( $T_{si}$ ). Cette diminution est contribué à l'amélioration des performances thermiques c'est-à-dire, l'augmentation des temps de retard et la chute des facteurs d'amortissement.

- On constate que la composition plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%) donne toujours des meilleurs temps de retard, par contre la composition plâtre + 75% sable dunaire  $P_s$  (75%) donne des mauvais temps de retard. Ceci est dû au faible diffusivité thermique de la composition ( $0,494 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) par rapport à celle du plâtre + 75% sable dunaire ( $1,506 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

- D'après les figures (V.7), (V.8), (V.9), (V.10) et (V.11), on voit que l'amplitude de la température de surface intérieure ( $A_i$ ) décroît avec l'augmentation de l'épaisseur de la masse thermique. Thermiquement, la diminution de l'amplitude ( $A_i$ ) est souhaitable pour atteindre un confort des occupants, mais en pratique cette diminution est le synonyme de gaspillage de la matière première (10cm) par la surproduction de la composition dite idéale plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%).

- On peut constater que l'augmentation de la masse thermique peut conduire à des surchauffes des espaces intérieures, c'est le cas des vieux ksour particulièrement bâti par des matériaux locaux (terre, pierre). Rappelons que les matériaux à fort capacité thermique comme la terre et la pierre et même le plâtre joue un rôle très important pour accumuler la chaleur durant la journée et de la restituer plus tard lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment. Il est possible d'appliquer une ventilation naturelle. L'air ventilé favorise, par la convection, la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur. En outre, l'usage de brasseurs d'air permet d'accentuer le mouvement de l'air intérieur et d'intensifier les échanges convectifs [Chahwane L, (2011)].

- [Bencheikh H, (2007)] a étudié l'effet de la ventilation nocturne sur l'amortissement des fluctuations de la température de l'air extérieure, il a prouvé, que l'association de ventilation nocturne au système, peut diminuer la température de l'air intérieure de 3 à 4 °C dans la cellule. Cette étude nous a permis de comprendre les causes pour lesquelles la température de surface intérieure est variée pour chaque endroit proposé dans notre étude.

#### IV. Améliorations et correction thermique (cas d'été)

Cette partie est parfaitement réservée à la modalité des mises en place de la composition idéale plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%) sur un bâtiment réel. Cette action commence par une étude préalable (diagnostic) de l'enveloppe du bâtiment dans ses conditions climatiques et passe par la proposition de quatre configurations de la mise en place de la composition. Enfin, nous essayons d'évaluer l'efficacité des configurations proposées par l'application théorique de cette dernière dans les différents endroits à savoir : **El-Goléa, Laghouat, Béchar et Adrar.**

##### IV.1. Diagnostic du cas d'étude

La maison située à El-Goléa wilaya de Ghardaïa, elle est (f3) en R+t, construite avec double paroi en parpaing (30cm) sans isolation. Les caractéristiques thermiques des parois de la cellule étudiée sont présentées dans l'annexe (06).

Le diagnostic du cas d'étude s'établit par l'étude des fluctuations des températures de l'air extérieure et l'étude des rayonnements solaires directs. Ce dernier a pour but de justifier le choix d'orientation de l'enveloppe du bâtiment où la masse thermique sera placée.

Les résultats de la simulation du cas d'étude sous les conditions climatiques des quatre endroits proposés sont présentés dans le tableau (V.5).

**Tableau V.5 :** Diagnostic du cas d'étude.

Cas initial	$T_{ae}$ (max)	$T_{ae}$ (min)	$T_{si}$ (max)	$T_{se}$ (max)	$\emptyset$	f
El-Goléa	47	30	37,993	46,253	3h, 10min	0,214
Laghouat	43	29	34,899	42,556	3h, 20min	0,209
Béchar	43	28	36,784	42,638	3h, 20min	0,209
Adrar	49	30	39,884	48,562	3h, 20min	0,215

Les résultats de la simulation sont illustrés dans les figures (III.12), (III.13), (III.14), (III.15) et (III.16).

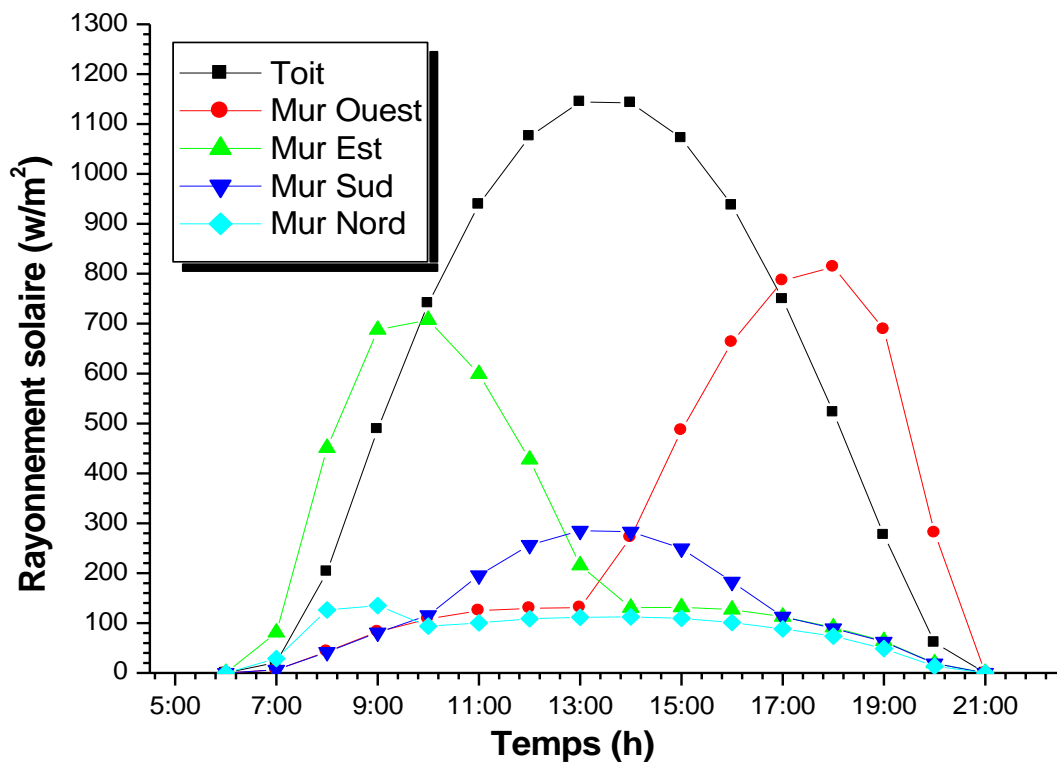


Figure V.12 : Rayonnement solaire direct pour les différentes orientations, cas de la ville d'El-Goléa.

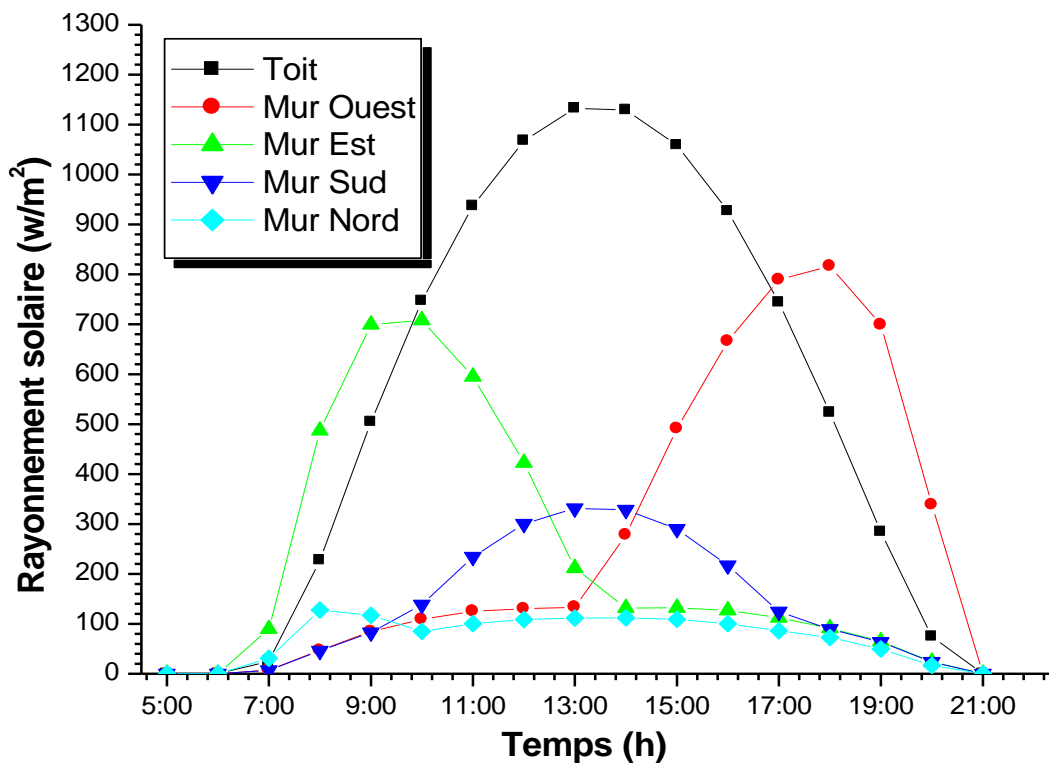


Figure V.13 : Rayonnement solaire direct pour les différentes orientations, cas de la ville de Laghouat.

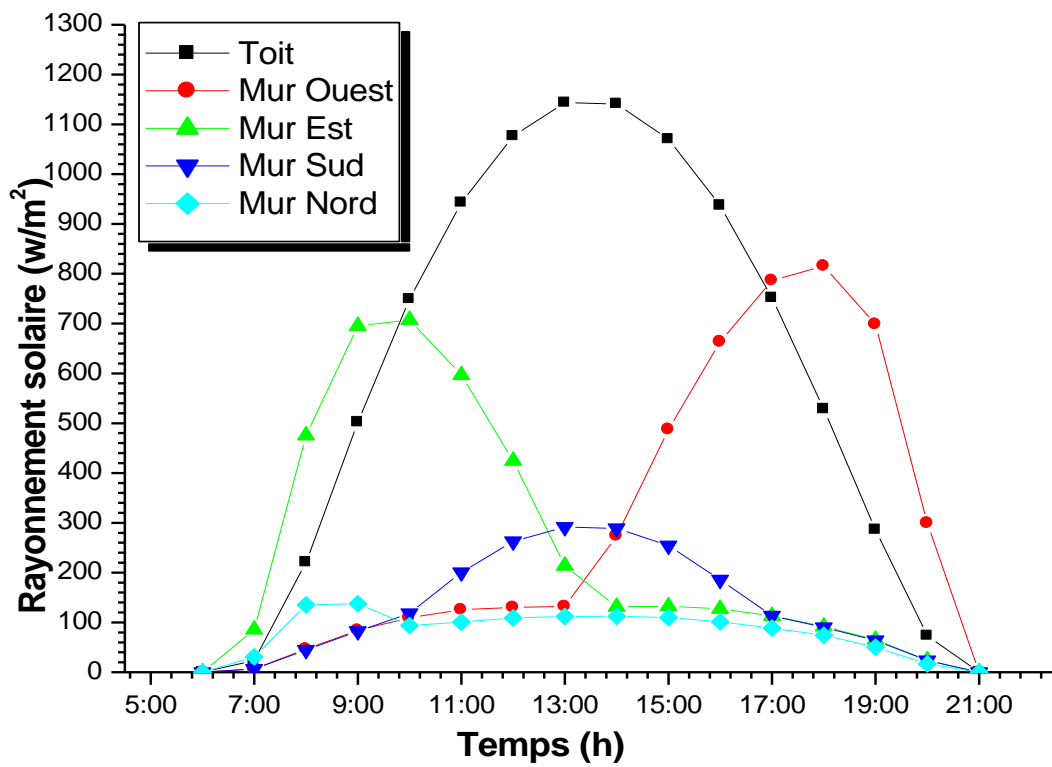


Figure V.14 : Rayonnement solaire direct pour les différentes orientations, cas de la ville de Béchar.

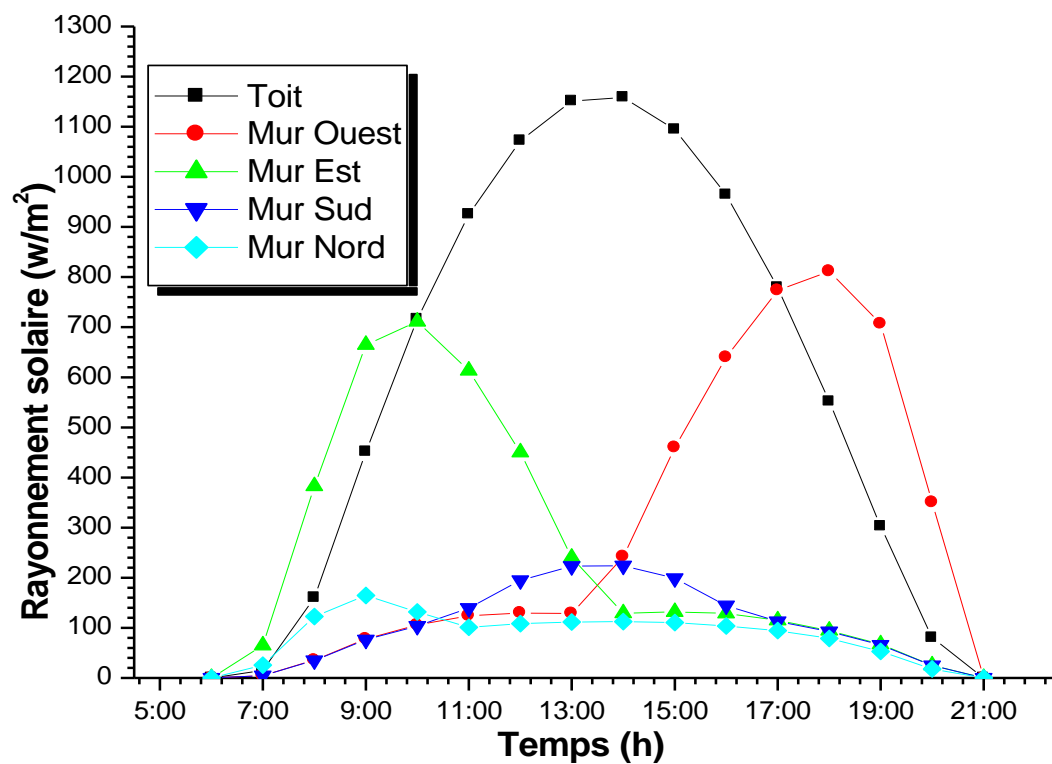


Figure V.15 : Rayonnement solaire direct pour les différentes orientations, cas de la ville d'Adrar.

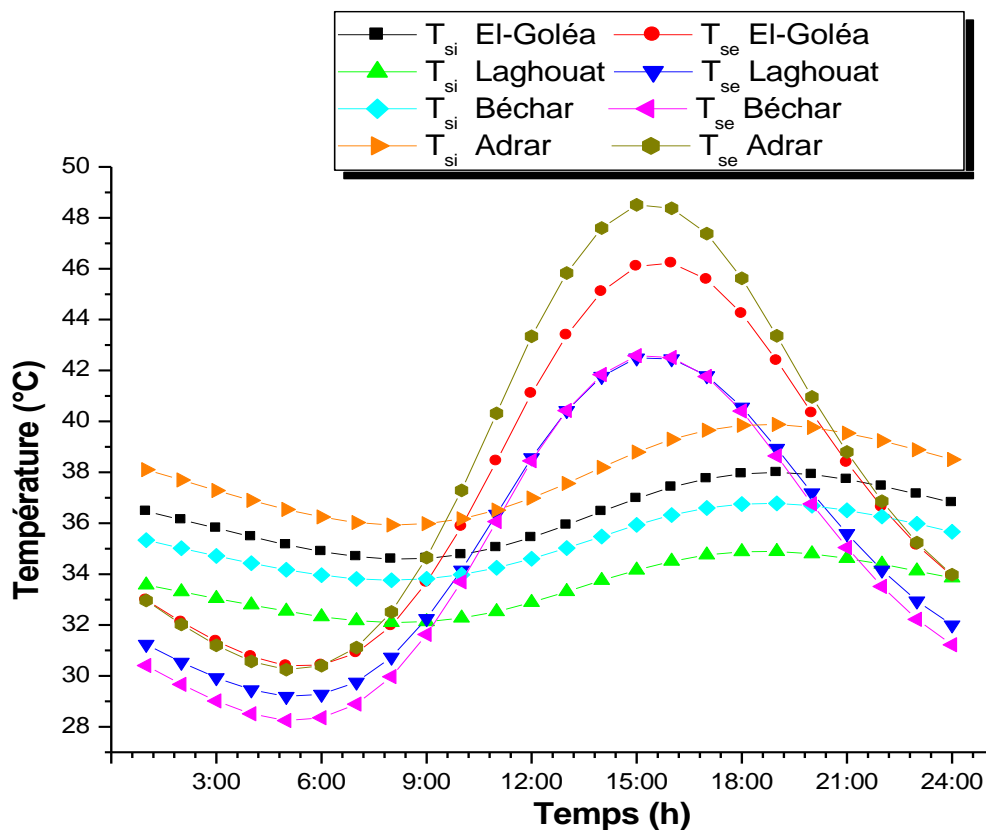


Figure V.16 : Comparaison des températures de surface des quatre villes (El-Goléa, Laghouat, Béchar et Adrar).

#### IV.1.1. Discussion et interprétation

- D'après le tableau (V.5) et la figure (V.16), on remarque que les températures de surface intérieure ( $T_{si}$ ) sont différentes d'un endroit à l'autre, bien que les composants de l'enveloppe soient identiques (mur de 30cm). Cette différence est due aux données géographiques et climatiques qui caractérisent chaque ville étudiée.

- On peut prospecter que l'identique (standardisation) des composants de l'enveloppe du bâtiment (**30 cm**) pour tout le territoire national pose lui-même un problème de l'inconfort des occupants notamment en zones arides.

- D'après les figures (V.12), (V.13), (V.14) et (V.15), on observe que les rayonnements solaires directs sont intenses et classés par ordre décroissant : Toit, mur ouest, mur est, mur sud et mur nord. Ils ont atteint sur une surface horizontale (toit) successivement à **1144,22. 1132,66. 1143,34. 1158,25  $W/m^2$**  pour les villes ; El-Goléa, Laghouat, Béchar et Adrar. Donc on peut conclure que le meilleur endroit où la masse thermique peut être placée est le mur ouest.

## IV.2. Améliorations des performances thermiques

Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur contribue toujours à l'amélioration des performances thermiques et donne des températures de surface intérieure confortables. Mais de point de vue économique, l'augmentation de cette dernière c'est le synonyme des coûts élevés (production, transport, mise en place).

A ce moment-là, les différentes configurations doivent répondre en premier lieu à la question d'économie d'épaisseur, et en deuxième lieu à la température de surface intérieure qu'on aura besoin d'atteindre pour un moment bien précis à minuit (00h).

### IV.2.1. Description des configurations d'amélioration

Pour atteindre à l'objectif fixé précédemment, nous proposons quatre configurations pour la réhabilitation thermique des maisons existantes. Ces dernières font partie des recherches bibliographiques de [Eumorfopoulou E.A, (2008), Medjelekh D, (2010) et Kontoleon K.J, (2013)].

Les significations des quatre configurations sont présentées brièvement dans le tableau (V.6)

**Tableau V.6 :** Description des configurations.

Configuration	Signes	Epaisseur de la masse thermique	Epaisseur de lame d'air	Epaisseur de la masse thermique
<b>C-01</b>	MA <sub>3</sub> M	Variable	3cm	Variable
<b>C-02</b>	A <sub>3</sub> M	-	3cm	Variable
<b>C-03</b>	A <sub>2</sub> M	-	2cm	Variable
<b>C-04</b>	M	Variable	-	-

On note que les configurations :

**C-01 :** Configuration compose par deux couches de plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%) dissocié par une lame d'air de 3cm.

**C-02 :** Configuration compose par une lame d'air de 3cm et une couche de plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%).

**C-03 :** Configuration compose par une lame d'air de 2cm et une couche de plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (50%).

**C-04 :** Configuration compose par une monocouche de plâtre + 50% copeaux de bois.

**IV.3. Evaluation de l'efficacité des configurations proposées**

Dans le but d'élargir le champ d'application des configurations proposées, qui utilise des compositions à base de plâtre et des copeaux de bois **P<sub>cp</sub> (50%)** en zones chauds et arides, nous proposons une étude théorique par simulation dynamique de la cellule sous les conditions climatiques des (1+3) zones arides (El-Goléa, Laghouat, Béchar et Adrar).

Le choix des (1+3) villes est justifié par la différence des zones climatiques d'été mentionnées sur les données du [ministère de l'habitat, (1993)]. Les différentes zones climatiques en Algérie sont présentées dans l'annexe (07). Les caractéristiques des villes étudiées sont récapitulées dans le tableau (V.7).

**Tableau V.7 : Caractéristiques des villes étudiées.**

Villes	Coordonnées			Températures	Zones climatiques	
	Latitude (degré)	Longitude (degré)	Altitude (m)	Δt (°C)	Signification	Appellation
1-El-Goléa	30,57	2,17	397	17	E4	Sahara
2-Laghouat	33,46	2,56	746	14	E3	Pré Sahara
3-Béchar	31,65	2,26	811	15	E3	
4-Adrar	27,84	0,19	280	19	E5	Tanegrouft

Pour évaluer l'efficacité des configurations proposées nous avons effectué des centaines des simulations pour aboutir à l'épaisseur minimale pour que la température de surface intérieure (**T<sub>si</sub>**) soit max à minuit et le flux de chaleur par conduction (**Q<sub>cond</sub>**) soit min à ce moment (00h).

D'après [Bencheikh H, (2007)] le flux de chaleur par conduction (**Q<sub>cond</sub>**) est l'échange d'énergie entre un nœud de la surface intérieure et son environnement qui se fait par conduction avec un nœud adjacent. Le flux de chaleur par conduction est exprimé par la relation :

$$Q_{cond} = \lambda_1 A_{si} (T_I - T_{si}) / \Delta x \dots\dots\dots (V. 4)$$

**Avec** **Q<sub>cond</sub>** : Flux de chaleur par conduction (W).

**λ<sub>1</sub>** : Conductivité thermique du nœud adjacent (W/m.k).

**A<sub>si</sub>** : Surface d'échange intérieure (m<sup>2</sup>).

**T<sub>I</sub>** : Température du nœud adjacent (°C).

**T<sub>si</sub>** : Température de la surface intérieure (°C).

Les résultats de la simulation pour l'évaluation de l'efficacité des configurations proposées sont regroupés dans le tableau (V.8) et illustrés dans les figures (V.17), (V.18), (V.19) et (V.20).

**Tableau V.8 :** Evaluation de l'efficacité des configurations proposées

Villes	Confi	Epaisseurs des couches (cm)	$T_{si} (max)$ (°C)	$T_{se} (max)$ (°C)	$Q_{cond} (moy)$ (W)	f	Avis
1- El-Goléa	MA <sub>3</sub> M	3,25+3+3	35,935	46,235	0,7811	0,002571	
	A <sub>3</sub> M	<b>3+6</b>	<b>35,936</b>	<b>46,257</b>	<b>0,6541</b>	<b>0,004654</b>	+
	A <sub>2</sub> M	2+6,5	35,934	46,257	0,6974	0,005330	
	M	8cm	35,916	46,221	0,8175	0,007647	
2- Laghouat	MA <sub>3</sub> M	<b>0,25+3+1</b>	<b>33,525</b>	<b>42,557</b>	<b>1,3374</b>	<b>0,028088</b>	+
	A <sub>3</sub> M	3+1,75	33,495	42,567	1,3384	0,024089	
	A <sub>2</sub> M	2+2,75	33,513	42,567	1,4349	0,019585	
	M	5,75cm	33,519	42,545	1,6437	0,014527	
3- Béchar	MA <sub>3</sub> M	<b>2,5+3+2,25</b>	<b>35,219</b>	<b>42,616</b>	<b>-0,5565</b>	<b>0,003144</b>	+
	A <sub>3</sub> M	3+4,75	35,212	42,628	-0,6619	0,008365	
	A <sub>2</sub> M	2+5	35,223	42,588	-0,6436	0,009624	
	M	6cm	35,206	42,624	-0,6713	0,014320	
4- Adrar	MA <sub>3</sub> M	4,25+3+4	37,218	48,536	0,0413	0,003829	
	A <sub>3</sub> M	<b>3+7,4</b>	<b>37,269</b>	<b>48,554</b>	<b>-0,1402</b>	<b>0,003991</b>	+
	A <sub>2</sub> M	2+7,75	37,223	48,464	-0,2001	0,003839	
	M	9cm	37,227	48,532	-0,0175	0,005890	

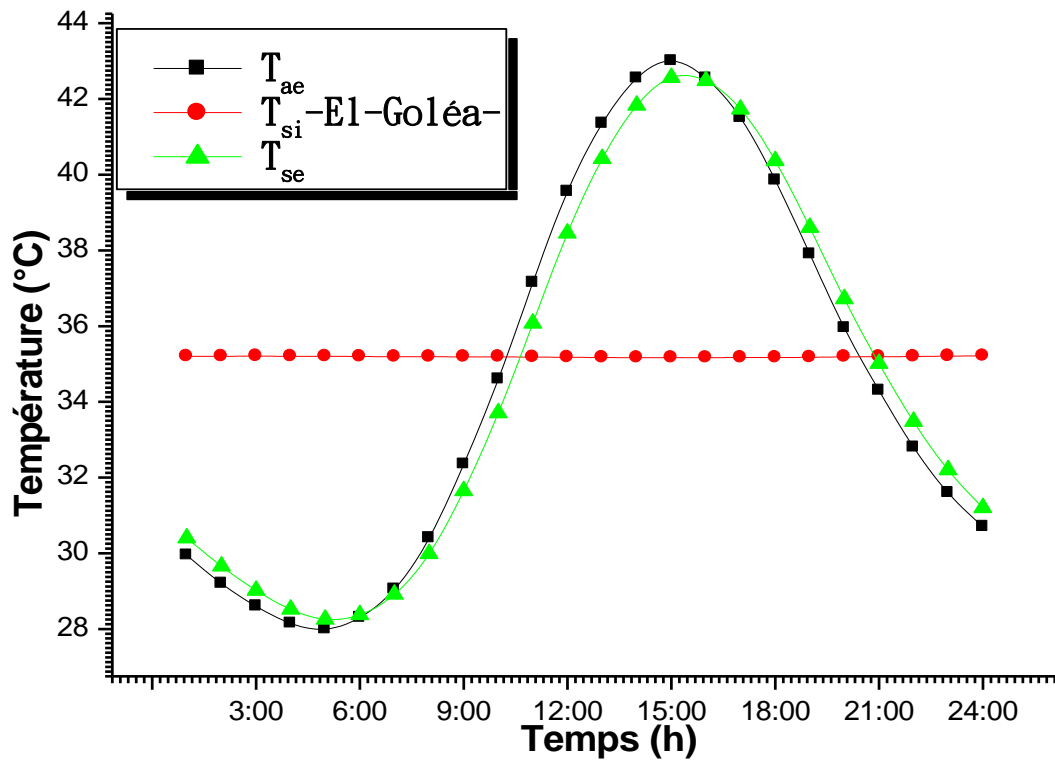


Figure V.17 : Variation des températures de surface sous la configuration (C-02), Cas de la ville d'El-Goléa.

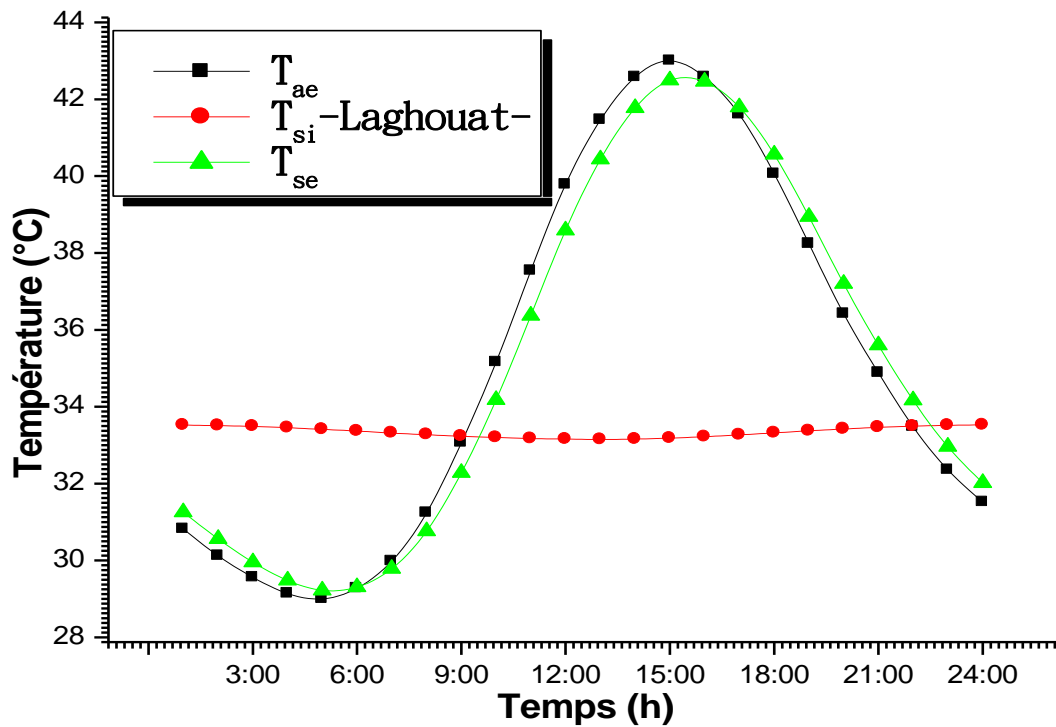


Figure V.18 : Variation des températures de surface sous la configuration (C-01), Cas de la ville de Laghouat.

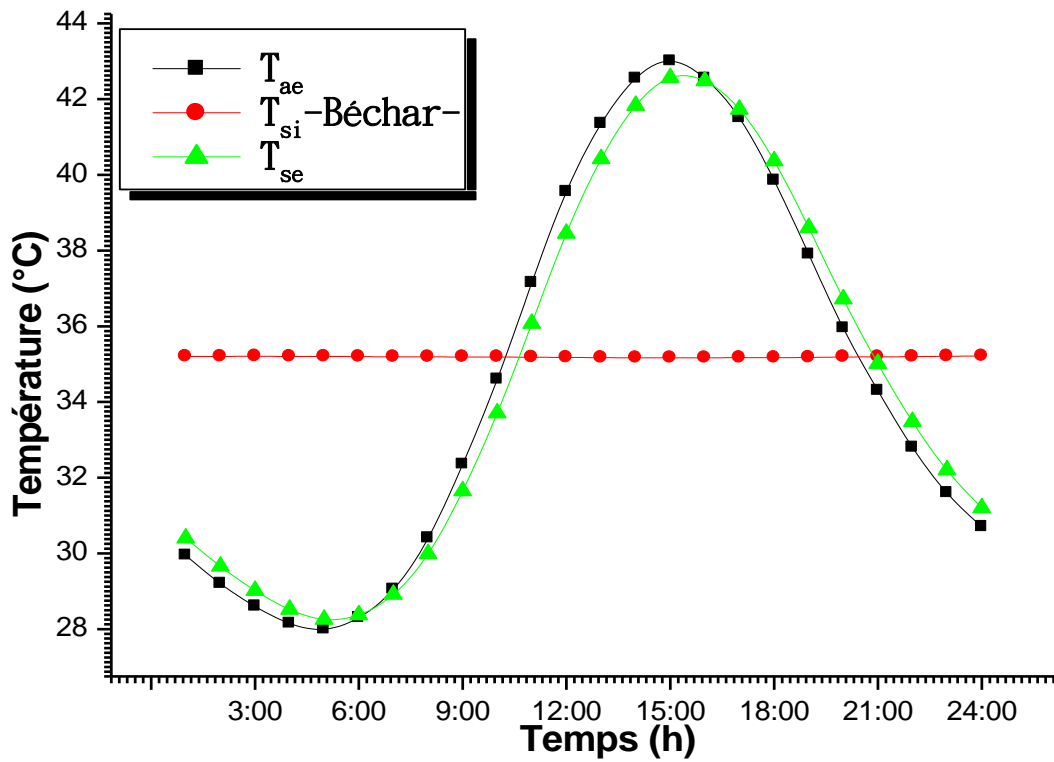


Figure V.19 : Variation des températures de surface sous la configuration (C-01),  
Cas de la ville de **Béchar**.

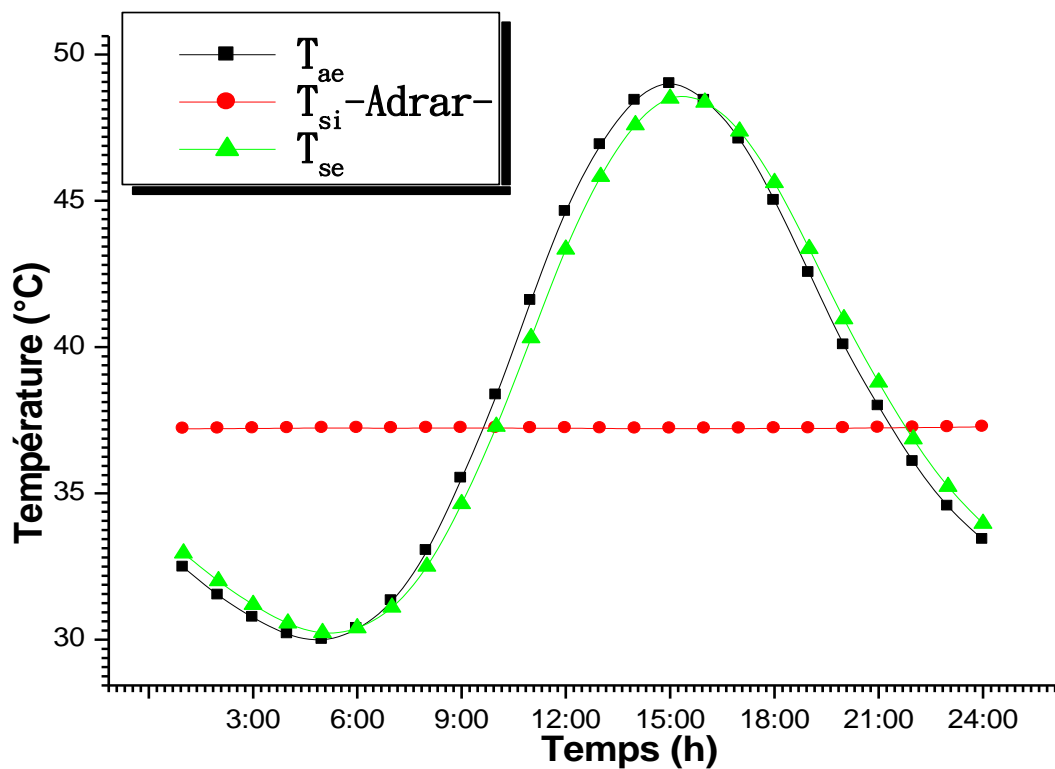


Figure V.20 : Variation des températures de surface sous la configuration (C-02),  
cas de la ville d'**Adrar**

### IV.3.1. Discussion et interprétation

- D'après le tableau (V.8), on voit que l'évaluation des configurations proposées montre que l'augmentation de l'épaisseur pour les quatre zones n'est pas efficace. Le choix de la configuration convenable pour les quatre villes est toujours justifié par la sélection d'épaisseur minimale et un flux de chaleur par conduction journalier ( $Q_{cond}$ ) minimal.

- D'après le tableau (V.8), on montre que :

- 1- La configuration (C-01) est plus adéquate pour la zone climatique (E3) où l'écart de température de l'air extérieure ( $T_{ae}$ ) est important entre la nuit et le jour (14 à 15 °C).

- 2- Contrairement pour les deux autres zones climatiques (E4, E5), où l'écart de température de l'air extérieure ( $T_{ae}$ ) est très important (17 à 19°C). La configuration (C-02) est plus adéquate.

- On remarque que chaque configuration dans l'une des villes étudiées est marquée par une épaisseur spécifique. Ceci peut être justifié par l'effet de l'altitude, vitesse et direction des vents et pression atmosphérique.

- D'après les figures (V.17), (V.18), (V.19) et (V.20), on constate que la température de surface extérieure ( $T_{se}$ ) est plus rapprochée de la température de l'air extérieure ( $T_{ae}$ ). Ce rapprochement est dû aux propriétés thermo-physiques de la couche extérieure qui s'expose au rayon solaire (phénomène de l'absorption solaire).

- Les figures (V.17), (V.18), (V.19) et (V.20) montrent que quelle que soit la constante de temps, la température de surface intérieure ( $T_{si}$ ) est presque invariable. Ceci est dû à l'effet de l'inertie calorifique de la masse thermique. A titre d'exemple, on a enregistré les amplitudes de la température de surface intérieure ( $A_i$ ) suivants :

- 1- **0,073 °C** pour la ville d'El-Goléa.
- 2- **0,374 °C** pour la ville de Laghouat.
- 3- **0,045 °C** pour la ville de Béchar.
- 4- **0,063 °C** pour la ville Adrar.

Rappelons que l'accumulation de ces températures contribue à des surchauffes à l'intérieure du bâtiment et la seule manière de les réduire et d'appliquer un débit de sur ventilation pour évacuer l'énergie stockée au cours de la journée.

## V. Conclusion

D'après l'étude précédente, on constate que l'augmentation de l'épaisseur de la masse thermique donne des meilleures solutions qui demande un gaspillage des matières premières pour atteindre au confort des occupants.

L'évaluation de l'efficacité des quatre configurations proposées montre que malgré la ville de Laghouat et Béchar sont situées dans la même zone climatique, avec une différence d'amplitude ( $A_e$ ) égale à ( $1^\circ\text{C}$ ), reste toujours les températures de surface intérieure ( $T_{si}$ ) inégales. Cela peut introduire l'idée de rajouter une étude thermique préalable de l'enveloppe des bâtiments lors de conception architecturale notamment en zone aride.

Avec l'augmentation des amplitudes des températures entre la nuit et le jour (Adrar, El-Goléa, Béchar et Laghouat), la question de la standardisation des constructions en zones arides est toujours posée.

Par exemple, pour la ville de Laghouat une paroi de **3cm** (lame d'air) et **1,25cm** de la composition plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (**50%**) suffit pour atteindre à une température de surface intérieure ( $T_{si}$ ) égale à (**33,52°C**) à minuit. Contrairement pour la ville d'Adrar on a besoin au moins de **3cm** (lame d'air) et **7,4cm** de la composition plâtre + 50% copeaux de bois  $P_{cp}$  (**50%**) pour atteindre à une température de surface intérieure ( $T_{si}$ ) égale à (**37,16°C**) à minuit.

D'après l'étude précédente, on peut conclure que la configuration masse thermique plus 3cm lame d'air plus une autre masse thermique similaire noté par (**MA<sub>3</sub>M**) est économique pour la zone climatique (**E3**). Par contre la configuration 3cm lame d'air plus une masse thermique noté par (**A<sub>3</sub>M**) est raisonnable pour les zones climatiques (**E4, E5**).

## Conclusion Générale

Les zones arides de notre pays se caractérisent par un climat très chaud en été et très froid en hiver. Notre héritage matériel a été fondé sur l'idée de la masse thermique et non d'isolant thermique. Cette dernière a été largement utilisée dans la construction traditionnelle bâtie en terre ou en maçonnerie lourde. C'est une technique d'économie d'énergie simple peut coûteuse qui est souvent ignorée dans la construction dite moderne qui présente des mauvaises qualités non seulement de vie mais aussi acoustique et thermique et aussi esthétique par la dissimulation du cachet architectural.

Le présent travail vise essentiellement de montrer que l'emploi d'ajout de nature cellulosique au plâtre peut offrir de nouveaux matériaux de construction qui contribuent facilement à l'amélioration de l'isolation thermique des enveloppes des bâtiments notamment en zones arides. A ce moment-là nous nous sommes alors attachés à rechercher les formulations les plus optimales en termes de la résistance mécanique et thermique.

Ce travail est subdivisé essentiellement en deux parties principales :

- ❖ Étude physico-mécanique consolidé par des études préalables (caractérisation des matériaux et techniques expérimentales).

- ❖ Étude thermo-physique renforcé par des mesures et des propriétés thermiques, et prouvé par la simulation dynamique sous l'EnergyPlus.

L'étude physico-mécanique des compositions, nous a permis d'avancer certaines conclusions :

1. L'ajout des copeaux de bois au plâtre diminue la masse volumique à l'âge de 28jours de **1162,49** à **775,12 kg/m<sup>3</sup>**, **1364,45** à **923,95 kg/m<sup>3</sup>** respectivement pour les compositions plâtre + copeaux de bois (**P<sub>cp</sub>**) et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (**Ps<sub>-cp</sub>**).

2. L'augmentation des teneurs en copeaux de bois augmente la porosité à l'âge de 28jours de **37,36** à **61,79 %**, **26,22** à **46,34 %** respectivement pour les compositions plâtre + copeaux de bois (**P<sub>cp</sub>**) et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (**Ps<sub>-cp</sub>**).

3. L'ajout du sable dunaire augmente la masse volumique et diminue la porosité de **37,36** à **22,32 %**.

4. L'introduction des copeaux de bois, sable dunaire diminue la résistance à la flexion à l'âge de 28 jours de **4,21 à 1,49 MPa**, **4,21 à 3,32 MPa**, **3,62 à 1,35 MPa** respectivement pour les compositions plâtre + copeaux de bois, plâtre + sable dunaire et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (**P<sub>cp</sub>**, **Ps**, **Ps<sub>-cp</sub>**).

5. L'introduction des copeaux de bois, sable dunaire diminue la résistance à la compression à l'âge de 28 jours de **7,86 à 1,91 MPa**, **7,86 à 5,74 MPa**, **6,70 à 1,69 MPa** respectivement pour les compositions plâtre + copeaux de bois, plâtre + sable dunaire et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (**P<sub>cp</sub>**, **Ps**, **Ps<sub>-cp</sub>**).

6. Les valeurs importantes du retrait égales à **0,352 mm/m** pour la composition plâtre + 50% sable dunaire + 50% copeaux de bois **Ps<sub>-cp</sub>(50%)**.

On conclure que l'ajout des copeaux de bois au plâtre a un effet négatif sur le comportement physico-mécanique (masse volumique, résistances mécaniques).

L'étude thermo-physique des compositions nous permet d'avancer certaines conclusions :

1. L'ajout des copeaux de bois diminue la masse volumique et augmente la porosité ce qui conduit à la diminution de la conductivité thermique de **0,736 à 0,276 W/m.K**, **1,00 à 0,451 W/m.K** successivement pour les compositions plâtre + copeaux de bois et plâtre + 50% sable dunaire + copeaux de bois (**P<sub>cp</sub>**, **Ps<sub>-cp</sub>**).

2. On constate, aussi, que l'introduction de 50% des copeaux de bois peut diminuer la conductivité thermique jusqu'à **62,50%** et que la récupération de ces grandes quantités de déchets de bois peut contribuer à la protection de notre environnement.

3. La conductivité thermique augmente de **0,736 à 1,293 W/m.K** avec l'ajout du sable dunaire.

4. L'étude de la capacité thermique montre que cette dernière est relativement élevée par rapport au béton **1231 KJ/m<sup>3</sup>.K** [F.Hafsi, 2010] ce qui justifie la haute efficacité énergétique des compositions.

5. Le pouvoir isolant de la composition plâtre + 50% copeaux de bois **P<sub>cp</sub> (50%)** est meilleur que les autres compositions. Ce qui postule que cette dernière peut être la composition optimale.

6. L'évaluation des propriétés thermo-physiques des compositions démontre que l'augmentation de l'épaisseur de la masse thermique donne des meilleurs temps de retard et des facteurs d'amortissement minimaux qui n'est pas une solution souhaitée.

7. L'évaluation des configurations proposées peut justifier l'idée d'économie de l'épaisseur de la masse thermique et donne la possibilité de valider l'épaisseur suffisante pour les quatre villes étudiées (El-Goléa, Laghouat, Béchar et Adrar). Cette constatation peut contribuer à la réduction de consommation d'énergie de chauffage, en hiver, ou de climatisation en été; Ce qui peut être une solution pour la consommation excessive d'électricité et par conséquent la protection de l'environnement.

On conclure que le succès de l'isolation thermique ne dépend pas seulement des caractéristiques thermo-physiques du matériau, mais aussi des données climatiques et de l'orientation de l'enveloppe et aussi des modes de pose de l'isolant thermique.

Espérons que notre objectif de départ, qui vise la recherche des parois à base de matériaux de différentes compositions pour l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, est atteint relativement et nous recommandons pour les concepteurs de faire une étude thermique au préalable de l'enveloppe du bâtiment lors des conceptions architecturales surtout en zones arides.

## Références bibliographiques

- Asan H, (2000):** Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and decrement factor, *Energy and Building* 32(2000) 197-203.
- Asan H, (2006):** Numerical computation of time lag and decrement factors for deferent building materials, *Building and Environment* 41(2006) 915-620.
- Asan H, Y.S Sancaktar, (1998):** Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy and Building* 28(1998) 159-166.
- Bederina M, (2000) :** Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux, Effet des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau, mémoire de magister en génie civil, Centre universitaire de Laghouat.
- Bederina M, (2007) :** Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois, thèse de doctorat en génie civil, Ecole nationale polytechnique.
- Bekkouche M, (2008) :** Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, thèse de doctorat en physique, université Abou-Bakr Belkaïd Tlemcen.
- Belhadj B, (2007) :** Amélioration des propriétés thermo-physiques des bétons de sables allégés par des copeaux de bois en milieux arides (Cas de la ville de Laghouat), mémoire de magister en architecture, université de Laghouat.
- Bencheikh H, (2007) :** Étude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporative dans les climats chauds et arides, thèse de doctorat en architecture, université Mentouri Constantine.
- Bencheikh H, Belhadj B, Khenfer M.M, (2013):** The effect of alleviating the sand concrete by wood shavings on wall time lag and decrement factor, *Civil and Environmental Research*, Vol.5 (2013).
- Benmalek M.L, Houari H, Bali A, Queneudec M, (2000) :** Comportement d'un composite fine minérale - ciment - bois élaboré à l'aide de déchets industriels solides, *Revue Sciences & TechnologieD – N°13*, Juin (2000).
- Benmansour N, (2011) :** Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment, mémoire de magister en physique, université El hadj Lakhdar Batna.
- Benoudjafer I, Ghomari F, Mokhtari A, (2010) :** L'amélioration du confort thermique des ambiances intérieures du bâtiment dans le contexte saharien . Cas la ville de Béchar, 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, *Journal of Scientific Research* N° 0 vol. 1 (2010).
- Bonehomme A, (1979) :** Isolation thermique des bâtiments, édition le Moniteur.
- Brahma A, (1996) :** Le béton, édition office des publications universitaires.
- Balaras C.A, (1996):** The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods, *Energy and Buildings*, vol 24 (1996).
- Cherait Y et Nafa Z, (2006) :** Eléments de matériaux de construction et essai, édition Direction de publication universitaire Guelma.
- C.N.E.R.I.B, (1993) :** Recommandations pour la construction en plâtre. Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées au Bâtiment.
- Calvat G, (2009) :** Les cloisons et les escaliers, édition G.R presse.
- Chahwane L, (2011) :** Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, thèse de doctorat en Génie Civil et Sciences de l'Habitat, université de Grenoble.
- Chelghoum Z et Belhamri A, (2011) :** Analyse des propriétés thermiques des matériaux de constructions utilisés dans la ville de Tamanrasset, *Revue Sciences & Technologie D – N°33*, Juin (2011) ,47-56.
- Cordier MM, (2012) :** Le guide des murs, édition comprendrechoisir.com.

- Couasnet Y, (2007) :** Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction, Mémento, Le Moniteur.
- Dakhlaoui R, (2006) :** Analyse du comportement mécanique des constituants d'un alliage polycristallin multiphasé par diffraction des rayons X et neutronique, thèse de doctorat en mécanique et matériaux, ENAT.
- Daligand D,** Plâtre, Techniques de l'ingénieur, traité Construction, n' C 910.
- Ddreux G, (1995) :** Nouveau guide du béton, édition Eyrolles.
- Degallaix S, Ilschner B, (2007) :** Caractérisation expérimentale des matériaux 1 « propriétés physiques, thermiques et mécaniques », édition presses polytechniques et universitaires romandes.
- Djoudi A, (2002) :** Caractérisation structurale et rhéologique de béton de plâtre et leur renforcement par les fibres végétales du palmier dattier, mémoire de magister génie civil, centre universitaire Laghouat.
- Djoudi A, Khenfer M.M, Bali A, (2009) :** Étude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier, SBEIDCO -1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (2009).
- Dominguez C, (2009) :** Eco-habiter le dictionnaire de l'habitat écoefficient, édition Hachette Pratique.
- Dupain R, Lanchon R, Saint Arroman J.C, (1995) :** Granulats, sols, ciments et Bétons, édition Casteilla .
- Festa J, (1995) :** Le plâtre et ses applications traditionnelle et moderne, éd Eyrolles.
- Fragos MM, (2012) :** Le guide de l'isolation, édition comprendrechoisir.com.
- Gotteicha M, (2005) :** Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités, mémoire de magister en génie civil, UAT Laghouat.
- Hafsi F, (2010) :** Contribution à l'étude de l'isolation thermique des bâtiments dans les régions sahariennes, mémoire de magister en génie civil, université Kasdi Merbah Ouargla.
- Hetzel J, (2007) :** Bâtiment HQE et développement durable, éd Afnor.
- Hamida M.L, (2010) :** Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction, mémoire de magister en physique énergétique, UMC
- Hegger M, Auch Schwelk V, Fuchs M, Rosenkranz T, (2009) :** Construire, Atlas des matériaux, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Khab H, (2007) :** Étude du comportement hygrothermique d'éléments de construction application aux toitures, mémoire de magister en physique énergétique, université Mentouri Constantine.
- Kontoleon K.J, Th.G. Theodosiou, K.G. Tsikaloudaki, (2013):** The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements, Applied Energy 112 (2013) 325–337.
- Kontoleon K.J,E.A. Eumorfopoulou, (2008):** The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region, Renewable Energy 33 (2008) 1652–1664.
- Langlais C,** Isolation thermique à température ambiante "Propriétés", Techniques de l'ingénieur, traité Construction, document n' C 3 371.
- Liebard A et A.D.Herde, (2005) :** Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, éd le Moniteur.
- Mazari M, (2012) :** Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public. Cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou), mémoire de magister en architecture, UMMTO.
- Mazria E, (2005) :** Le Guide de la maison solaire, édition Parenthèses.
- Mechti W, Rouis M.J and. Mnif T, (2013):** Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing finely ground sand, Chemistry and Materials Research, Vol.4 (2013)
- Medjelekh D, (2010) :** Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure, Revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°2 (2010) 265-273.
- Ministère de l'habitat, (1993) :** Recommandations architecturales, édition ENAG.
- Nguyen L.H, (2013) :** Bétons de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées approche expérimentale et modélisation numérique, thèse de doctorat en Génie Civil, université de Cergy Pontoise.
- Papadakis M, (1970) :** Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre, édition Dunod.

- Réunion D, (1968) :** Matériaux de construction, collection des cours de l'école chez soi, édition Eyrolles.
- Rachedi M, (2013)** Contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier, mémoire de magister en génie civil, université Kasdi Merbah Ouargla.
- Rougeron C, (1979) :** L'isolation acoustique et thermique dans le bâtiment, 3eme éd, éd Eyrolles.
- Stéphan E, Cantin R, Caucheteux A, Guernouti S, Tasca, Michel P, (2014) :** Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings, *Building and Environment* 80 (2014) 241-248.
- Sotehi N, (2010) :** Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation, thèse de doctorat en physique énergétique, UMC
- Spitz C, (2012) :** Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments, thèse de doctorat en Génie Civil et Sciences de l'Habitat, université de Grenoble.
- Triboulot P et Marie-Christine Trouy-Triboulot,** Matériau bois "Structure et caractéristiques", Techniques de l'ingénieur, traité Construction, document n' C 925.
- Vitton R, (2006) :** Bâtir « manuel de la construction », édition Presses polytechniques et universitaires Romandes.
- Wackermann G, (2005) :** Ville et environnement, éd Ellipses.
- Wright D, (2004) :** Manuel d'architecture naturelle, édition parenthèses.
- Xing J, Zhang X, Cao Y, Wang G, (2012):** Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor, *Energy and Buildings* 47 (2012) 369–374.  
[www-climat.arch.ucl.ac.be](http://www-climat.arch.ucl.ac.be)  
[www.ageden.org](http://www.ageden.org)  
[www.thermoconcept-sarl.com](http://www.thermoconcept-sarl.com)  
[www.publicchem.com](http://www.publicchem.com)

The page features five horizontal green bars. The top bar is a single long bar. The second bar is a shorter bar on the left, followed by the word 'Annexes' in a large, outlined, sans-serif font, followed by a shorter bar on the right. The third bar is a single long bar. The fourth bar is a single long bar. The fifth bar is a single long bar.

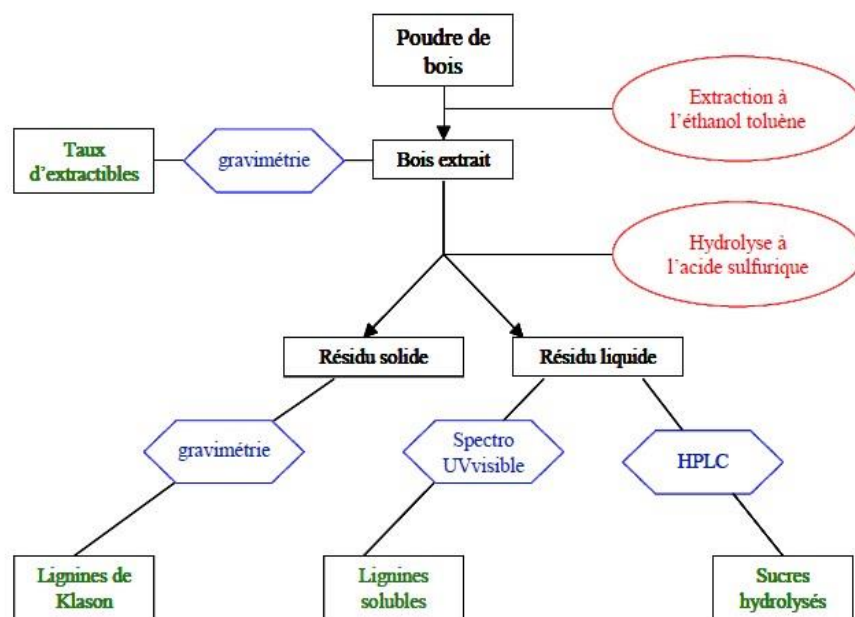
# Annexes

## Annexe (01)

Méthode de mesure de la composition chimique du bois.

## 1- Démarche globale

La mesure de la composition chimique du bois s'effectue sur du bois fragmenté et tamisé entre 212 et 560  $\mu\text{m}$ . On pèse exactement environ 2 grammes de bois préalablement rendu anhydre par étuvage à 103°C et séchage sous  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Le schéma global que nous avons suivi pour déterminer la composition chimique de nos échantillons est présenté dans la figure A-1.1



**Figure A-1.1** : Schéma du principe de l'évaluation de la composition chimique du bois.

Le bois est d'abord extrait (extraction à l'éthanol toluène) pour déterminer le taux d'extractibles. Une fois extrait, le bois est soumis à une hydrolyse acide qui attaque les polysaccharides (cellulose et hémicelluloses). Le résidu solide de cette attaque acide est la lignine de Klason. Le résidu liquide (filtrat) contient une partie de lignine soluble et surtout les sucres résultant de l'hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses. Ce liquide est analysé par spectrophotométrie UV visible pour déterminer la quantité de lignines solubles, et par HPLC (Chromatographie en phase liquide à haute performance) pour déterminer la quantité des différents sucres présents.

## **2- Détermination du taux d'extractives**

Le taux de composés extractibles est déterminé simplement par gravimétrie. La procédure suivie est celle de la norme ASTM D1 107-96 (ASTM 1998a). Les échantillons de poudre de bois sont extraits avec un mélange d'éthanol/toluène (2/1 vol/vol) dans un Soxhlet pendant 6 à 8 heures. Le bois extrait est ensuite séché en étuve à 103°C jusqu'à masse constante puis refroidi au dessiccateur. La différence de masse entre le bois naturel anhydre et le bois extrait anhydre permet de calculer le taux d'extractibles.

## **3- Détermination du taux de lignine de Klason**

Le taux de lignine de Klason est déterminé suivant la norme ASTM D1 106-96 (ASTM 1998b), qui consiste à hydrolyser le bois à l'acide sulfurique à 72 %. 1 g de bois extrait est précisément pesé à l'état anhydre, rincé dans 100 ml d'eau chaude pour une durée de 3 h, rincé à l'éthanol et séché à l'air. Ensuite, on mélange ce gramme de bois avec 15 ml d'acide sulfurique à 72 % dans un bécher. Le mélange est régulièrement homogénéisé par agitation mécanique, puis dilué dans 560 ml d'eau déminéralisée. L'hydrolyse est poursuivie à température d'ébullition pour une durée de 4 h. La solution est ensuite filtrée. La partie solide est séchée en étuve, refroidie en dessiccateur, puis pesée. La masse obtenue donne la quantité de lignine de Klason de l'échantillon en % massique de bois extrait anhydre. Le filtrat est complété jusqu'à 1 litre avec de l'eau déminéralisée. Il contient la lignine soluble, ainsi que les sucres simples résultant de l'hydrolyse des polysaccharides. Il est donc récupéré et neutralisé à l'hydroxyde de baryum pour les analyses ultérieures.

## **4- Détermination du contenu en lignine soluble**

La méthode de détermination de la lignine soluble est une méthode semi-quantitative, qui permet de doser les phénols totaux. Le résultat de ce test ne donne pas un résultat en % massique de lignine soluble dans le bois. Il donne seulement une évaluation des phénols totaux par comparaison à un composé phénolique donné (la catéchine). Il permettra de comparer les échantillons entre eux. Afin de totaliser les différents composés phénoliques issus des lignines, on mélange en milieu tampon basique (pH 10-10,5) la solution à analyser avec du réactif de Folin-Ciocalteu (constitué d'acide phosphomolybdique et phosphotungstique). Ce dernier est réduit par les phénols en un composé de couleur bleue. Ce composé peut être dosé par spectrophotométrie visible à 740 nm (dans le rouge).

La procédure consiste à prélever 2 ml de solution à analyser, auxquels on ajoute 10 ml de carbonate de calcium à 10% (mas/vol). On place le tout au bain-marie à 37°C durant 15 min. Ensuite, on ajoute le réactif (Folin-Ciocalteu eau à 1/2 vol/vol). Après 10 min, à température ambiante, l'absorbance est mesurée à 740 nm avec un spectrophotomètre UV.

#### **5- Détermination du taux de sucres issus des polysaccharides**

La détermination des différents sucres peut s'effectuer par chromatographie liquide à haute pression (HPLC), après neutralisation (pH entre 6,5 et 7,5) à l'aide d'acide sulfurique et d'hydroxyde de baryum. La solution est centrifugée, filtrée puis injectée dans un système HPLC WATERS, comprenant un contrôleur (WATERS 600S) qui commande une pompe (WATERS 616 pump) dotée d'une boucle d'injection de 10 µl, ainsi qu'un détecteur d'indice de refraction (WATERS 2410). La colonne de séparation est une Supelcogel Pb® maintenue à 80°C au cours de l'analyse. Le débit est réglé à 0,3 ml/min. L'éluant est de l'eau déminéralisée dégazée en ligne. La durée de la mesure avoisine 45 min.



**Figure A-1.2 :** Incorporation des copeaux de bois à l'eau pendant 24h avant

## Annexe (02)

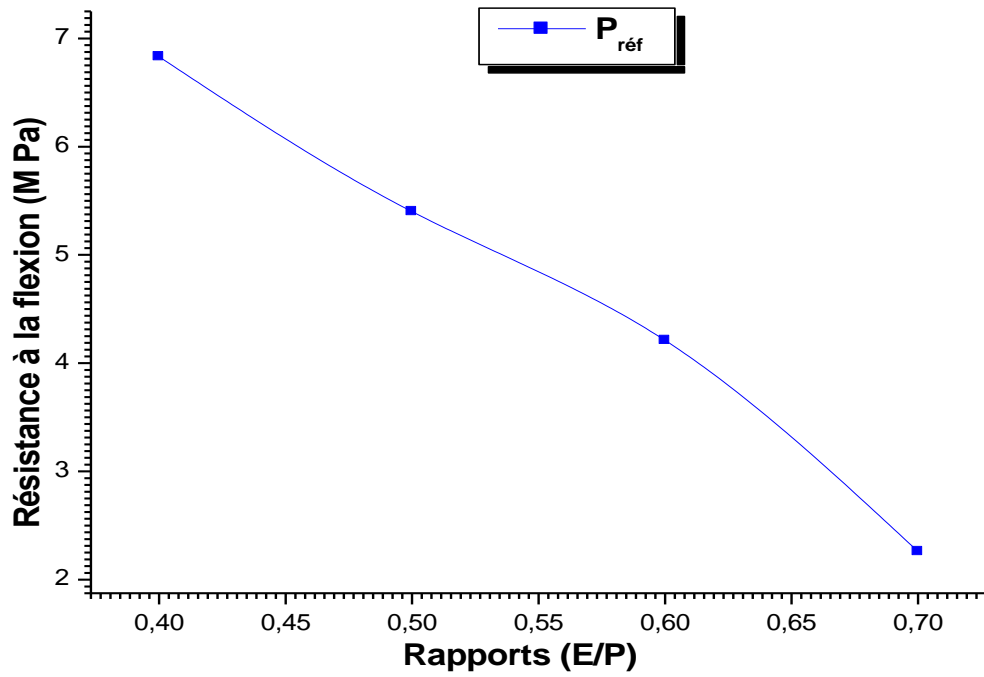


Figure A-2.1 : L'influence du rapport (E/P) sur la résistance à la flexion.

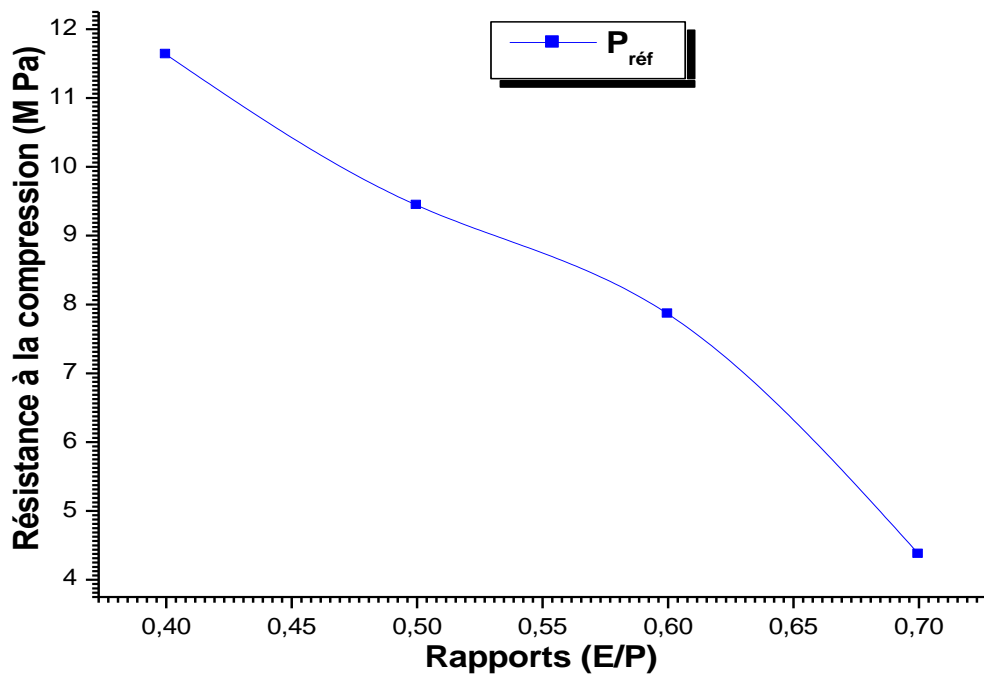



Figure A-2.2 : L'influence du rapport (E/P) sur la résistance à la compression.

## Annexe (03)

**Tableau A-3** : Fiche technique d'hydrofuge de surface pour support poreux à cinq polymères [[www.publicchem.com](http://www.publicchem.com)]

<b>Description</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• l'hydrofuge de surface est de type (<b>Le TECHNISIL</b>), qui est un liquide, prêt à l'emploi et destiné à l'hydrofugation de différents supports poreux verticaux et horizontaux dans la construction.</li><li>• Le TECHNISIL est un hydrofuge de surface incolore, à hautes performances, sur base d'un mélange de 5 polymères du type: <b>silanes, siloxanes, silicones</b> renforcées par un <b>complexe organométallique</b> et d'une <b>résine</b> de pontage polyoléfinique.</li><li>• Le mélange des 5 polymères à poids moléculaire croissant en phase solvant, assure une efficacité optimale dans un large éventail de circonstances et une durabilité élevée sur tous types de supports poreux.</li></ul>	
<b>Performances</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• L'hydrofuge a été testé par le Centre Scientifique et Technique de la Construction le 20 juin 1986; Rapport N°H.D. 340/133-30.</li><li>• L'hydrofuge possède un Agrément Technique UBATc avec certification depuis <b>1992</b> (le 1<sup>er</sup> hydrofuge en Belgique à posséder un ATG avec certification).</li><li>• L'hydrofuge est un hydrofuge de classe A (&gt; 95% d'efficacité).</li><li>• Rapports d'essais portant sur l'absorption d'eau, la diffusion à la vapeur d'eau et sur le vieillissement accéléré.</li></ul>	
<b>Caractéristiques techniques</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Densité: 0,87 (solvant à très haut pouvoir de pénétration).</li><li>• Aspect: liquide incolore.</li><li>• Matières actives: 10%.</li><li>• Essais de vieillissement: inférieur à 0,1 ml d'absorption après 10 ans (selon C.S.T.C. et ATG).</li><li>• Viscosité: 100 cPs.</li><li>• Modification de la tension superficielle: de 15 à 20 mN/m.</li><li>• Angle de mouillage: supérieur à 60° selon Method used ASTM D5946.</li><li>• Perméabilité à la vapeur d'eau: coefficient <math>\mu</math> inf. à 10%.</li><li>• Imperméabilité à l'eau selon Test Méthode Pipe de Verre: 100%.</li><li>• Efficacité maximum: après 3 jours.</li><li>• Pontage des fissures: contient une résine polyoléfinique qui pontage des fissures de 300 microns.</li></ul>	 <p>The image shows three containers of TECHNISIL hydrofuge. From left to right: a small 5-liter plastic bottle, a medium 20-liter plastic bottle, and a large 200-liter metal drum. Each container has a label with the product name and technical information.</p>

## Annexe (04)

**Tableau A-4 : Données nécessaires pour la simulation d'EnergyPlus.**

<p style="text-align: center;"><b>Bâtiment</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nom du bâtiment.</li> <li>2. Orientation par rapport.</li> <li>3. Localisation du site.</li> <li>4. Tolérance de la chaleur.</li> <li>5. Tolérance de la température.</li> <li>6. Distribution solaire.</li> </ol>	<p style="text-align: center;"><b>Matériaux (Verre)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nom.</li> <li>2. Epaisseur</li> <li>3. Transmission solaire à incidence normale.</li> <li>4. Réflexion solaire.</li> <li>5. Emissivité.</li> <li>6. Conductivité thermique.</li> </ol>
<p style="text-align: center;"><b>Intervalle de temps</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nombre d'intervalle de temps par heure.</li> </ol>	<p style="text-align: center;"><b>Construction</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Composition des couches thermiques.</li> </ol>
<p style="text-align: center;"><b>Localisation</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nom du lieu.</li> <li>2. Latitude.</li> <li>3. Longitude.</li> <li>4. Faisceau horaire.</li> <li>5. Altitude.</li> </ol>	<p style="text-align: center;"><b>Zone thermique</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Numéro de la zone.</li> <li>2. Orientation de la zone.</li> <li>3. Coordonnées du point de repère</li> </ol>
<p style="text-align: center;"><b>Données du jour</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Jour et mois de l'année.</li> <li>2. Maximum absolu de la température.</li> <li>3. Amplitude de température.</li> <li>4. Pression atmosphérique.</li> <li>5. Vitesse et direction du vent.</li> <li>6. Aspect du ciel.</li> </ol>	<p style="text-align: center;"><b>Composition du volume</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Coordonnées de chaque face en commençant par le coin haut gauche.</li> </ol>
<p style="text-align: center;"><b>Température du sol</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Température mensuelle moyenne de tous les mois.</li> </ol>	<p style="text-align: center;"><b>Composition des ouvertures</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Coordonnées de chaque ouverture en commençant par le coin haut gauche.</li> </ol>
<p style="text-align: center;"><b>Matériaux utilisés</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nom.</li> <li>2. Etat de surface.</li> <li>3. Epaisseur.</li> <li>4. Conductivité thermique.</li> <li>5. Masse volumique.</li> <li>6. Chaleur spécifique.</li> </ol>	<p style="text-align: center;"><b>Type de programme</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Température de façon continue.</li> </ol>
<p style="text-align: center;"><b>Lame d'air</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nom.</li> <li>2. Résistance thermique.</li> </ol>	<p style="text-align: center;"><b>Rapport</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Température de l'air extérieur.</li> <li>2. Température de la surface extérieure.</li> <li>3. Température de la surface intérieure.</li> <li>4. Température de l'air intérieur.</li> </ol>

## Annexe (05)

**Tableau A-5** : Dimensions à respecter pour le montage d'une cloison [MM. Cordier, 2012].

Types de carreaux	Epaisseur	Hauteur	Distance horizontale entre les raidisseurs
Carreau standard	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40 mm</li> <li>• 50 mm à 60 mm</li> <li>• 70 mm à 80 mm</li> <li>• 100 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2,60 m</li> <li>• 2,60 m</li> <li>• 3 m</li> <li>• 4m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 m</li> <li>• 5 m</li> <li>• 6 m</li> <li>• 8m</li> </ul>
Carreau hydrofuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50 mm</li> <li>• 60 mm</li> <li>• 70 mm</li> <li>• 100 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2,60 m</li> <li>• 2,60 m</li> <li>• 3 m</li> <li>• 4m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 m</li> <li>• 5 m</li> <li>• 6m</li> <li>• 8m</li> </ul>

## Annexe (06)

**Tableau A-6** : Caractéristiques thermiques des parois de la cellule étudiée.

Eléments	Matériaux	Epaisseur (m)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (j/kg.k)	Conductivité thermique (w/m.k)	Résistance thermique (e/λ)
<b>Mur extérieur</b>	Enduit au mortier de chaux	0,02	1400	1000	1,4	0,014
	Parpaing	0,15	-	-	1,3	0,115
	Vide d'air	0,05	1,2	1005	0,026	3,846
	Parpaing	0,10	-	-	1,3	0,076
	Enduit au mortier de ciment	0,015	1500	1000	1,5	0,010
	Composition P <sub>cp</sub> (50%)	0,1	775,12	7203,17	0,276	0,362
<b>Plancher bas</b>	Carrelage grès cérame	0,03	2000	1000	1,2	0,025
	Mortier de Pose	0,05	1800	1000	0,8	0,062
	Dalle flottante	0,1	2400	1080	1,8	0,056
	Sable de carrière	0,51	2000	1000	2	0,255
<b>Plancher haut</b>	Carrelage grès cérame	0,03	2000	1000	1,2	0,025
	Mortier bâtard	0,03	1800	1000	0,8	0,038
	Sable de carrière	0,05	2000	1000	2	0,025
	Dalle de compression en béton	0,04	2400	1080	1,8	0,022
	Corps creux	0,16	1800	1000	1,15	0,139
	Enduit au mortier de ciment	0,015	1500	1000	1,5	0,010

## Annexe (07)

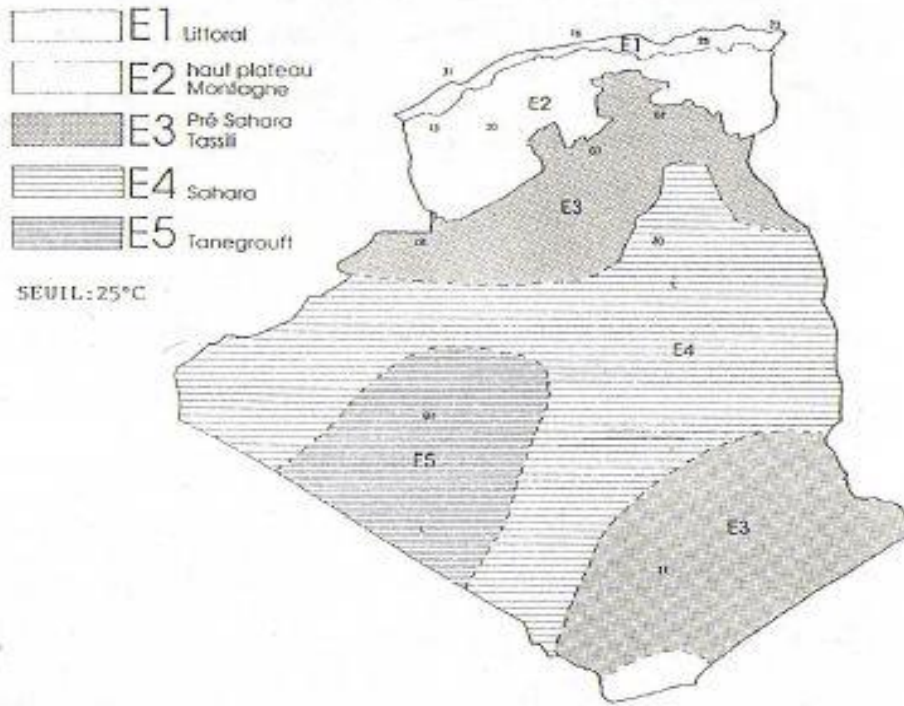


Figure A-7.1 : Différentes zones climatiques d'été en Algérie Ministère de l'habitat [1993].

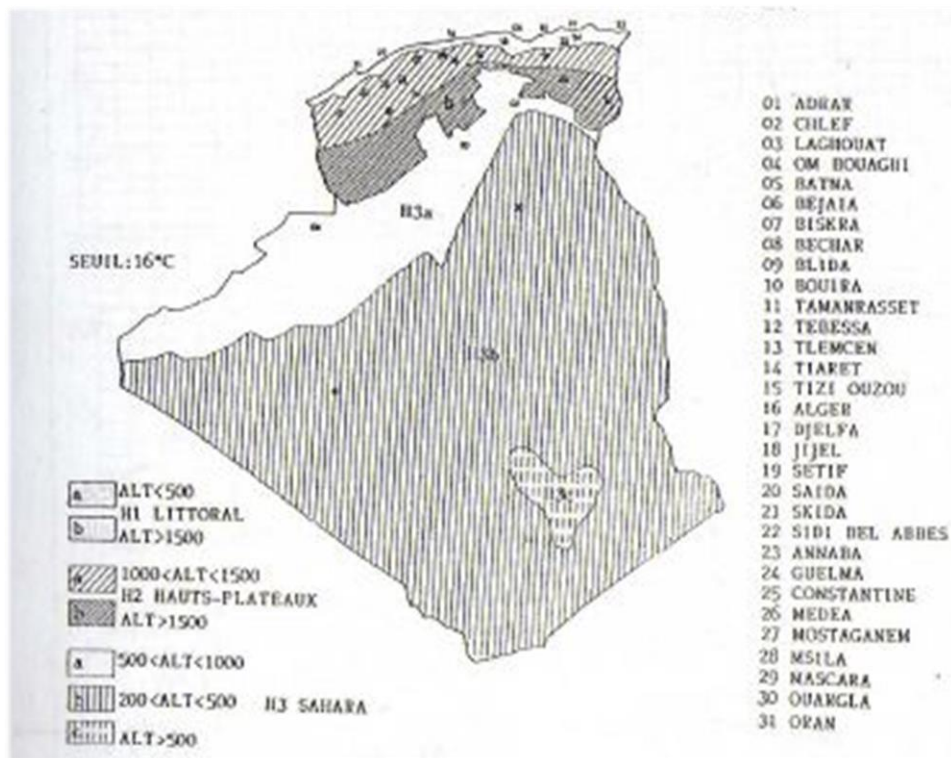


Figure A-7.2 : Différentes zones climatiques d'hiver en Algérie Ministère de l'habitat [1993].

## Annexe (08)

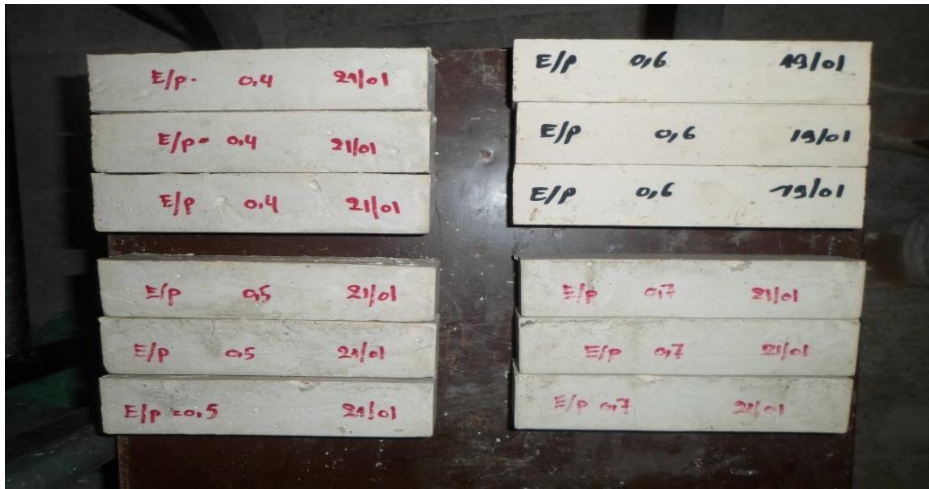


Figure A-8.1 : Différentes rapport (E/P) distingué à la caractérisation mécanique.



Figure A-8.2 : Différentes échantillons distingué à la caractérisation physico-mécaniques et thermique.

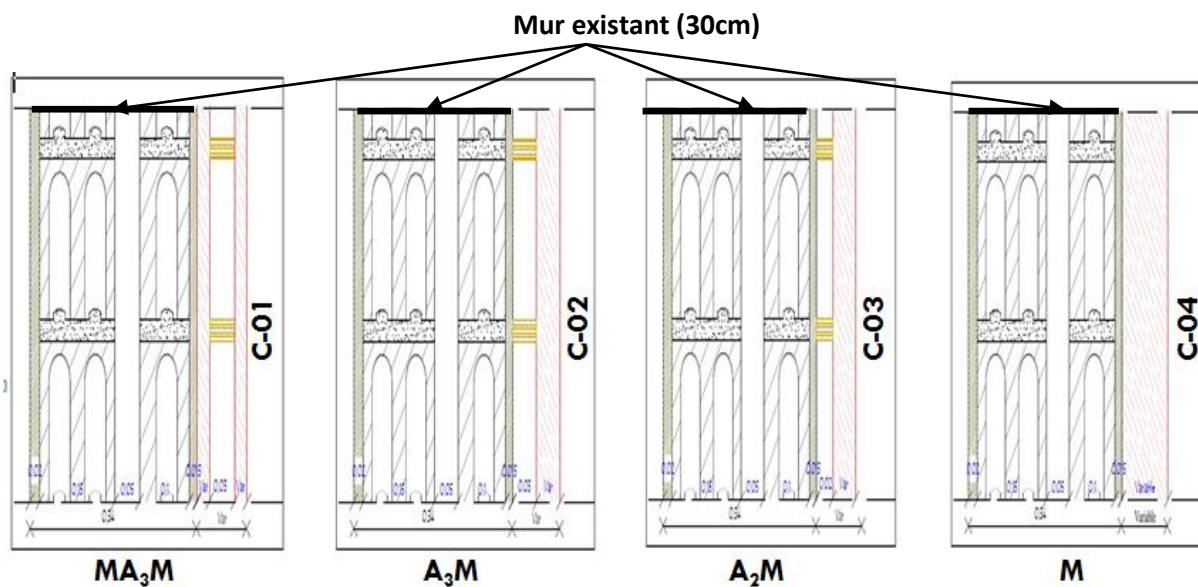


Figure A-8.3 : Configurations distingué à l'amélioration des performances thermiques en zone aride.