

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1**

**FACULTE DES SCIENCES EXACTES**

**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre .....

Série .....

**THESE**

**PRESENTEE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES**

**EN PHYSIQUE**

**SPECIALITE : PHYSIQUE ENERGETIQUE**

**THEME**

**CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES ET  
MECANIQUES D'UN MATERIAU DE CONSTRUCTION : BETON  
DE FIBRES VEGETALES**

**Par**

**Mme BELKHARCHOUCHE DRIFA**

**Soutenue le 03/07/2024**

**Devant le jury**

<b>Président :</b>	<b>DJEZZAR Mahfoud</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Frères Mentouri Constantine1</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>CHAKER Abl</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Frères Mentouri Constantine1</b>
<b>Examineur :</b>	<b>BOUCHAER Merzoug</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Frères Mentouri Constantine1</b>
<b>Examineur :</b>	<b>AGOUDGIL Boudje maa</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Hadj Lakhdar Batna1</b>
<b>Examineur :</b>	<b>BOUHDJAR Amor</b>	<b>D.R</b>	<b>CDER- Alger</b>
<b>Examineur :</b>	<b>KITOUNI Saida</b>	<b>M.C.A</b>	<b>Univ. S. Boubnider Constantine3</b>

## Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon encadreur et directrice de thèse, le Professeur **Abla Chaker** de l'université frères Mentouri Constantine1, pour son aide, son soutien et sa patience tout au long de ma thèse.

Je remercie le Professeur **Djezzar Mahfoud** de l'université frères Mentouri Constantine1, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont au Professeur **BOUCHAER Merzoug** de l'université frères Mentouri, Constantine1, d'avoir accepté de faire partie du jury et examiner cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements au Professeur **AGOUDGIL Boudjemaa** de l'université Hadj Lakhdar de Batna1, pour avoir accepté d'examiner cette thèse et faire partie du jury.

J'exprime mes sincères remerciements au Professeur **BOUHDJAR Amor** du CDER d'Alger de faire partie du jury et d'évaluer ce travail.

Mes sincères remerciements vont également au Professeur **KITOUNI Saida** de l'université Salah Bounider Constantine3 d'avoir accepté de faire partie du jury et d'évaluer ce travail.

Enfin, je remercie toute personne qui de loin ou de près à participer à l'aboutissement de ce travail.

## Sommaire

Remerciements	
Sommaire.....	i
Nomenclature.....	viii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xvi
Introduction générale.....	xvii

### Chapitre I : Milieux poreux

Introduction.....	1
I.1 Isolation thermique.....	4
I.2 Effets de l'humidité sur l'habitat.....	4
I.3 Milieux poreux.....	5
I.3.1 Définition d'un milieu poreux.....	5
I.3.2 Représentation d'un milieu poreux.....	5
I.3.3 Grandeurs intrinsèques d'un milieu poreux.....	5
I.3.3.1 Hygroscopicité.....	6
I.3.3.2 Humidité relative.....	6
I.3.3.3 Porosité.....	7
I.3.3.4 Classification de la porosité.....	7
I.3.3.5 Tortuosité.....	7
I.3.3.6 Loi de laplace-Kelvin.....	8
I.3.3.7 Teneur en eau et saturation.....	9

I.4 Propriétés hydriques des matériaux.....	10
I.4.1 Sensibilité à l'humidité des matériaux poreux.....	10
I.4.2 Fixation de l'humidité .....	10
I.4.3 Isothermes de sorption.....	11
I.4.4 Mécanisme de transport d'humidité.....	14
I.5 Propriétés thermiques des matériaux poreux.....	15
I.6 Modèles de détermination de la conductivité et de la diffusivité thermique.....	16
I.6.1 Conductivité thermique.....	16
I.6.1.1 Interfaces solide-fluide planes.....	16
I.6.1.1.1 Modèles de Krischer .....	17
I.6.1.2 Modèles empiriques.....	19
I.6.1.2.1 Modèle Chandary.....	19
I.6.1.2.2 Modèle de Woodside.....	20
I.6.2. Diffusivité thermique.....	20
I.6.2.1 Méthode flash.....	20
I.6.2.2 Modèle de Parker.....	21
I.6.2.3 Modèle de Degiovanni.....	24
I.6.2.4 Modèle de Yazou.....	26
I.7 Matériaux de construction biosourcés.....	27
I.8 Quelques travaux sur les comportements thermodynamiques et mécaniques des matériaux de construction biosourcés.....	28
Conclusion .....	42
Référence .....	43

## Chapitre II : Matériaux étudiés et techniques de mesure

II.Introduction.....	47
II.1 Bétons allégés par les fibres végétales.....	47
II.1.1 Les fibres végétales .....	48
II.1.1.1 La production oléicole.....	49
II.1.1.2 Caractéristiques du fruit de l'olivier.....	49
II.1.1.3 Déchets oléicoles.....	50
II.1.1.3.1 Déchets liquides (margines).....	51
II.1.1.3.2 Déchets solides (grignons d'olive).....	51
II.1.2 Constituants du béton.....	54
II.1.2.1 Ciment.....	54
II.1.2.1.1 Composition et caractéristiques du ciment.....	55
II.1.2.1.2 Composition chimique du ciment .....	55
II.1.2.1.3 Le clinker.....	55
II.1.2.1.4 Propriétés physiques et mécaniques des ciments.....	55
II.1.2.1.5 Composition minéralogique du ciment.....	56
II.1.2.2 Les Granulats et l'eau de gâchage.....	56
II.1.2.2.1 Les Granulats.....	56
II.1.2.2.2 Eau de gâchage.....	57
II.1.2.2.3 Adjuvants.....	57
II.2 Méthodes de mesure des propriétés thermo physique du béton allégé .....	58
II.2.1 Les méthodes de mesure en régime permanent.....	58
II.2.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée.....	58
II.2.1.2 Méthode de la mini-plaque chaude .....	61
II.2.1.3 Méthode des boîtes.....	62
II.2.1.3.1 Description de l'appareillage et procédure expérimental.....	62
II.2.1.3.2 Détermination de la conductivité thermique apparente.....	64
II.2.1.3.3 Principe de mesure de la diffusivité thermique.....	66
II.2.2 Méthodes de mesure en régime transitoire .....	67

II.2.2.1 Méthode du fil chaud.....	67
II.2.2.2 Méthodes du plan chaud.....	69
II.2.2.3 Méthode du Hot Disc.....	69
II.2.2.4 Méthode flash.....	70
Conclusion.....	71
Références.....	72

### Chapitre III : investigation expérimentale

III.Introduction.....	76
III.1 Préparation des fibres de grignons d'olive.....	76
III.2 Courbes granulométriques des grignons d'olive.....	77
III.3 Composition de Béton classique.....	78
III.3.1 Constituants du béton.....	78
III.3.2 Formulation et élaboration des échantillons.....	79
III.4 Composition du Bétons allégés par les grignons d'olive.....	80
III.4.1 Première méthode.....	80
III.4.2 Deuxième méthode.....	80
III.5 Modes Opératoires.....	82
III.6 Essais de caractérisations thermophysiques des matériaux étudiés.....	84
III.6.1 Conductivité thermique.....	84
III.6.1.1 Description de l'appareillage.....	85
III.6.1.2 Procédure expérimentale.....	86
III.6.1.3 Détermination de la conductivité thermique apparente.....	87
III.6.1.3.1 Evaluation de la constante de déperdition thermique.....	87
III.6.1.3.2 Etalonnage des sondes.....	88
III.6.1.3.3 Erreurs de mesures.....	89

III.6.1.3.4 Précision de mesure.....	90
III.6.2 Diffusivité thermique.....	90
III.6.2.1 Méthodes du flash.....	91
III.6.2.2 Appareillage de mesure.....	91
III.7 Essais de capillarité des matériaux étudiés.....	92
III.7.1 Principe et objectif .....	93
III.7.2 Mode opératoire.....	93
III.8 Essais de caractérisations mécaniques des matériaux étudiés.....	93
III.8.1 Procédure expérimentale.....	93
Conclusion.....	95
Références .....	96

#### Chapitre IV : Exploitation des résultats expérimentaux

IV.Introduction.....	98
IV.1 Masse volumique.....	99
IV.2. Capillarite des matériaux étudiés.....	102
IV.2.1.Principe et objectif.....	102
IV.2.2.Comportement hygrométrique.....	102
IV.2.3.Étude du retrait d'eau.....	105
IV.3. La conductivité thermique apparente.....	108
IV.3.1 Effet de la masse volumique apparente sur la conductivité thermique.....	109
IV.3.2. Comparaison de la conductivité thermique du béton allégé par les grignons d'olive épuisés ou bruts aux états sec et saturée.....	110

IV.3.3 Influence de la teneur volumique en eau sur la conductivité thermique apparente ...	112
IV.3.4 Comparaison du pouvoir d'isolation des bétons allégés aux GOE ou GOB .....	114
IV.3.5 Comparaison de mesures expérimentales avec quelques modèles conceptuels de la conductivité thermique.....	116
IV.4 La diffusivité thermique.....	120
IV.4.1 La variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau..	121
IV.4.2. Comparaison des différents modèles de dépouillement de la diffusivité thermique .....	124
IV.5. Capacité calorifique thermique.....	127
IV.6. Résistance thermique.....	129
IV.7. Etude mécanique : Résistance à la compression .....	130
IV.7.1 Effet thermomécanique.....	133
Conclusion.....	134
Références .....	136
Résumé.....	142
Abstract.....	143

## Nomenclature

<u>Symboles</u>		<u>Unités</u>
a	Diffusivité thermique	(m <sup>2</sup> /s)
b	Coefficient d'évaporation	(Sans dimension)
B <sub>i</sub>	Nombre de Biot	(Sans dimension)
C	Coefficient de déperdition thermique	(W/°C)
e	Epaisseur	(m)
E/C	Taux de gâchage (Eau/Ciment)	(%)
h	Coefficient d'échange	(W/m <sup>2</sup> °C)
M <sub>t</sub>	Masse totale	(kg)
P <sub>o</sub>	Porosité ouverte	(%)
P <sub>f</sub>	Porosité fermée	(%)
P <sub>T</sub>	Porosité totale	(%)
P <sub>v</sub>	Pression de vapeur	(MPa)
P <sub>vs</sub>	Pression de vapeur de saturation	(MPa)
q <sub>ve</sub>	Densité de flux de vapeur sous L'effet de la convection	(kg/m <sup>3</sup> s)
q <sub>vd</sub>	Densité de flux de vapeur d'eau	(kg/m <sup>3</sup> )
q	Densité de flux de chaleur	(W/m <sup>2</sup> )
Q	Intensité de flux de chaleur	(W)
r	Résistance superficielle	(m <sup>2</sup> °C/W)
R <sub>th</sub>	Résistance thermique	(m <sup>2</sup> °C/W)
R <sub>tot</sub>	Résistance thermique totale	(m <sup>2</sup> °C/W)
R	Résistance mécanique à la compression	(MPa)

S	Surface	(m <sup>2</sup> )
t	Temps	(s)
t <sup>*</sup>	Temps réduit	(Sans dimension)
T	Température	(°C)
T <sub>m</sub>	Température maximale	(°C)
T <sup>*</sup>	Température réduite	(Sans dimension)
T <sub>exp</sub>	Température expérimentale	(°C)
T <sub>c</sub>	Température de la face chaude	(°C)
T <sub>f</sub>	Température de la face froide	(°C)
T <sub>A</sub>	Température de l'ambiance chaude	(°C)
T <sub>F</sub>	Température de l'ambiance froide	(°C)
V <sub>t</sub>	Volume total	(m <sup>3</sup> )
V <sub>a</sub>	Volume apparent	(m <sup>3</sup> )
W <sub>m</sub>	Teneur massique en eau	(%)
W <sub>v</sub>	Teneur volumique en eau	(%)
W	Teneur volumique en vapeur	(%)
x	Variable d'espace	(m)
X	Direction de flux de chaleur	

### **Symboles grecs**

		<b><u>Unités</u></b>
ρ	Masse volumique apparente	(kg/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>c</sub>	Masse volumique réelle	(kg/m <sup>3</sup> )
λ	Conductivité thermique	(W/m°C)
λ <sub>s</sub>	Conductivité thermique de la phase solide	(W/m°C)
λ <sub>l</sub>	Conductivité thermique de la phase liquide	(W/m°C)
λ <sub>g</sub>	Conductivité thermique de la phase gazeuse	(W/m°C)
λ <sub>air</sub>	Conductivité thermique de l'air	(W/m°C)
λ <sub>exp</sub>	Conductivité thermique expérimentale	(W/m°C)
λ <sub>θ</sub>	Conductivité thermique à l'état sec	(W/m°C)

$\lambda_w$	Conductivité thermique à l'état saturé	(W/m°C)
$\theta$	Fraction volumique du système disposé perpendiculairement à la direction du flux de chaleur	(%)

## Liste des figures

**Figure I.1 :** Répartition des émissions de GES de divers secteurs économiques en 2022

**Figure I.2 :** Consommation énergétique de différents secteurs économiques en Algérie

**Figure I.3 :** Représentation d'un milieu poreux

**Figure I.4 :** Paramètres géométriques de la tortuosité et de l'orientation d'un pore

**Figure I.5 :** Occupation diphasique de l'espace poreux

**Figure I.6 :** Représentation schématique de l'adsorption physique de l'eau dans un pore

**Figure I.7 :** Diagramme schématique d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption

**Figure I.8 :** Classification des isothermes d'adsorption physique donnée par l'IUPAC

**Figure I.9 :** Effet bouteille d'encre

**Figure I.10 :** Transfert d'humidité en phases vapeur et liquide pour les conditions hivernales

**Figure I.11 :** Représentation du modèle parallèle

**Figure I.12 :** Représentation du modèle série

**Figure I.13 :** Modèle généralisé de Krischer

**Figure I.14 :** Représentation de Parker

**Figure I.15 :** Evolution de la température sur la face non irradiée en fonction du temps.

**Figure I.16 :** Evolution temporelle de la température sur la face non irradiée

**Figure I.17 :** Représentation de DIGIOVANNI

**Figure I.18 :** Variation de  $T^*/T_m^*$  en fonction de  $t_{5/6}^*$

**Figure I.19 :** Variation de la conductivité thermique de composites en fonction de la teneur en fibres

**Figure I.20 :** Variation de la résistance à la compression de composite en fonction de la teneur en fibres

**Figure I.21 :** Variation de la conductivité thermique d'un échantillon de brique de millet en fonction de la teneur en eau

**Figure I. 22 :** Conductivité thermique de trois mélanges en fibre en fonction de la teneur en eau

**Figure I. 23 :** Diffusivité thermique pour trois dosages en fibre en fonction de la teneur en eau

**Figure I.24 :** Variations de la conductivité thermique et de la résistance à la compression d'un mortier de sable allégé avec la laine de bois en fonction de la densité

**Figure I.25 :** Variation de la résistance à la compression du mortier de sable allégé en fonction de la concentration de la laine de bois pour les composites P0=0%, P1=35%, P2=46% , P3=58%.

**Figure I.26 :** Variation de la conductivité thermique de différents composites de mortier de sable en fonction de la teneur en eau

**Figure I.27 :** Variation de la diffusivité thermique de différents composites en fonction de la teneur en eau

**Figure I.28 :** Conductivité thermique de composites gypse/fibres de palmier dattier en fonction de la teneur en fibres

**Figure I.29 :** Résistance à la compression des composites gypse/fibres de palmier dattier en fonction de la teneur en fibres

**Figure I.30 :** Evolution de la conductivité thermique effective en fonction du pourcentage massique des fibres de palmier

**Figure I.31 :** (a) Résistance mécanique en fonction du pourcentage du liant (b) Effusivité thermique en fonction du pourcentage du liant (c) Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du liant

**Figure I.32 :** Résistance à la compression des bétons renforcés avec des fibres d'Alfa à 28 et 112 jours

**Figure I.33 :** Résistance à la flexion des mortiers fibrés avec des fibres de lins traitées

**Figure I.34 :** Conductivité thermique et retrait du mélange A (paille de lin) et B (paille de blé) en fonction de la teneur en eau

**Figure II.1 :** Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines

**Figure II.2 :** Composition physique de l'olive

**Figure II.3 :** Les différents sous-produits issus du pressage des olives et leurs caractéristiques physiques

**Figure II.4 :** Mesure de la conductivité par la méthode de la plaque chaude gardée

**Figure II.5 :** Modèle simplifié de la méthode de la plaque chaude gardée.

**Figure II.6 :** Schéma du dispositif de la mini-plaque chaude

**Figure II.7 :** Vue générale de la cellule de mesure de la méthode des boîtes

- Figure II.8 :** Boîte de mesure de la conductivité et position des sondes
- Figure II.9 :** Schéma d'un bloc échantillon pour les matériaux granulaires
- Figure II.10 :** Coupe longitudinale du dispositif expérimental de la méthode des boîtes symétriques.
- Figure II.11 :** Schéma de la mesure d'une température de surface par un thermocouple
- Figure II.12 :** Schéma d'un thermocouple à contacts séparés
- Figure II.13 :** Fils accolés à la surface de l'échantillon
- Figure II.14 :** Schéma d'un flux de chaleur non unidirectionnel sur les bords
- Figure II.15 :** Fil chaud
- Figure II.16 :** Schéma du montage de la méthode du fil chaud.
- Figure II.17 :** Schéma montage de la méthode du plan chaud.
- Figure II.18 :** Vue d'une sonde Hot disc
- Figure II.19 :** Schéma du principe du montage du Hot Disc
- Figure III.1 :** Grignons d'olive bruts (GOB)
- Figure III.2 :** Grignons d'olive épuisés (GOE)
- Figure III.3 :** Courbes granulométriques des grignons d'olive.
- Figure III.4 :** Les échantillons pour essais mécanique
- Figure III.5 :** Les échantillons pour essais thermique et hydrique
- Figure III.6 :** Cellule de mesure de la méthode des boîtes
- Figure III.7 :** Coupe d'une boîte B pour la mesure de conductivité thermique
- Figure III.8 :** Coupe d'une boîte pour mesures de diffusivité thermique.
- Figure III.9 :** Presse hydraulique et échantillons cylindriques
- Figure IV.1 :** Variation de la masse volumique du béton allégé par des grignons d'olive épuisés
- Figure IV.2 :** Variation de la masse volumique du béton allégé par des grignons d'olive bruts
- Figure IV.3 :** Variation du gain relatif de masse en fonction du temps pour le béton GOB.
- Figure IV.4 :** Variation du gain relatif de masse en fonction du temps pour le béton GOE.

**Figure IV.5 :** Variation de la teneur volumique en eau en fonction du temps pour le béton allégé par les grignons d'olive bruts.

**Figure IV.6 :** Variation de la teneur volumique en eau en fonction du temps pour le béton allégé avec les grignons d'olives épuisés.

**Figure IV.7 :** Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité volumique pour

(b) béton GOB

(a) béton GOE

**Figure IV.8 :** Variation de la conductivité thermique aux états sec et saturé cas du béton allégé par grignons d'olive bruts en fonction du pourcentage de fibres

**Figure IV.9 :** Variation de la conductivité thermique aux états sec et saturé cas du béton allégé par GOE en fonction de la densité volumique apparente

**Figure IV.10 :** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour les différents pourcentages en fibres

**Figure IV.11 :** Variation de la Conductivité thermique du béton GOB en fonction de la teneur volumique en eau pour les différents pourcentages de fibres

**Figure IV.12 :** Pouvoir d'isolation thermique des bétons allégés aux GOB ou aux GOE (1%)

**Figure IV.13 :** Pouvoir d'isolation thermique des bétons allégés aux GOB ou aux GOE (2%)

**Figure IV.14 :** Pouvoir d'isolation thermique des bétons allégés aux GOB ou aux GOE (3%)

**Figure IV.15 :** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (0%)

**Figure IV.16 :** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (1%)

**Figure IV.17 :** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (2%)

**Figure IV.18 :** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (3%)

**Figure IV.19 :** Variation de la diffusivité thermique avec la teneur volumique en eau des différents pourcentages en grignons d'olives : modèle de Parker

**Figure IV.20 :** Variation de la diffusivité thermique avec la teneur volumique en eau des différents pourcentages en grignons d'olives : modèle de Digiovanni

**Figure IV.21 :** Variation de la diffusivité thermique avec la teneur volumique en eau des différents pourcentages en grignons d'olives : modèle de Yezou

**Figure IV.22 :** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni pourcentage de fibres (0%)

**Figure IV.23 :** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni pourcentage de fibres (1%)

**Figure IV.24 :** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni pourcentage de fibres (2%)

**Figure VI.25 :** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni pourcentage de fibres (3%)

**Figure IV.26 :** Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur volumique en eau pour les différents pourcentages de fibres (modèle de Yezou)

**Figure IV.27 :** Variation de la résistance thermique du béton allégé en fonction de la densité aux états sec et saturé

**Figure IV.28 :** Variation de la résistance à la compression en fonction de la densité volumique des échantillons

**Figure IV.29 :** Variation de la résistance à la compression en fonction de différents pourcentages de fibres.

**Figure IV.30 :** Variation de la conductivité thermique du béton allégé en grignons d'olive en fonction de la résistance à la compression pour divers densités des échantillons

**Figure IV.31 :** Variation de la Résistance thermique du béton allégé en fonction de la résistance à la compression pour divers échantillons

## **Liste des tableaux**

**Tableau I.1** : Classification de la porosité selon l'IUPAC

**Tableau II.1** : Composition chimique indicative des différents types de grignons en pourcentage de la matière sèche

**Tableau II.2** : Les composants minéraux des cendres ainsi que leurs teneurs respectives (%)

**Tableau II.3** : Composition chimique du ciment Portland de Hamma Bouziane (en % massique)

**Tableau II.4** : Les principales propriétés physiques des ciments utilisés

**Tableau II.5** : Composition minéralogique du ciment

**Tableau II.6** : Dimensions et caractéristiques des familles de granulats

**Tableau II.7** : Propriétés des granulats utilisés

**Tableau III.1** : Propriétés des granulats utilisés

**Tableau III.2** : Formulation du béton classique adopté

**Tableau III.3** : Compositions des bétons de grignons d'olive épuisés

**Tableau III.4** : Compositions des bétons de grignons d'olive bruts

**Tableau IV.1** : Masse volumique des échantillons de béton allégé par les GOE

**Tableau IV.2** : Masse volumique des échantillons de béton allégé par les GOB

**Tableau VI.3** : Valeurs de gain en masse en fonction du temps pour le béton GOB

**Tableau VI.4** : Valeurs de gain en masse en fonction du temps pour le béton GOE

**Tableau VI.5** : Retrait d'eau pour béton de grignons d'olive épuisés à différents pourcentage sur 14 heures

**Tableau VI.6** : Retrait d'eau pour béton de grignons d'olive bruts à différents pourcentage sur 14 heures

**Tableau IV.7** : Conductivité thermique apparente des échantillons de béton GOE.

**Tableau IV.8** : Conductivité thermique apparente des échantillons de béton GOB.

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'énergie est une ressource indispensable au développement économique d'une nation. Cependant, son utilisation inefficace engendre d'importants problèmes économiques et environnementaux. Que ce soit dans l'industrie ou le secteur résidentiel, l'énergie est devenue une ressource précieuse et une composante budgétaire significative. La plupart des bâtiments et des habitations sont des systèmes qui requièrent une consommation énergétique considérable pour garantir un confort thermique satisfaisant à leurs occupants. Dans cette optique, la mise en place de programmes d'économie d'énergie dans les bâtiments devrait être une priorité.

Pour réduire cette consommation croissante d'énergie dans le secteur de la construction, les chercheurs se sont penchés sur l'optimisation de l'utilisation rationnelle de l'énergie, en particulier dans la construction de bâtiments. Jusqu'à présent, le principe de construction reposait sur l'assemblage de différents matériaux, chacun ayant une fonction spécifique. Cependant, cette accumulation de matériaux divers devient de moins en moins avantageuse en raison de ses coûts élevés et de l'espace qu'elle occupe. C'est dans ce contexte que de nouvelles techniques de construction et de nouveaux matériaux d'isolation thermique ont été développées pour réduire les coûts de construction et les dépenses énergétiques. Parmi ces matériaux, le béton allégé suscite un intérêt particulier, car il peut agir à la fois comme isolant thermique tout en maintenant des performances adéquates.

L'association de matériaux isolants avec des matériaux de construction est une technique bien connue pour améliorer leurs propriétés d'isolation thermique. Cette méthode est traditionnellement utilisée en Algérie depuis l'Antiquité, un exemple notable étant les briques fabriquées à partir d'un mélange de terre et de fibres végétales, telles que la paille.

La construction durable vise à répondre de manière cohérente à trois préoccupations essentielles : le confort, l'impact environnemental et la santé. Elle vise à minimiser l'impact environnemental de la construction tout en assurant un environnement intérieur sain et confortable.

L'utilisation d'agrégats végétaux dans la fabrication du béton s'inscrit dans une démarche de développement durable. Cette approche présente l'avantage d'utiliser des ressources renouvelables, contrairement aux carrières de granulats qui s'épuisent progressivement. Cependant, les bétons allégés sont des matériaux poreux et sensibles à l'eau, ce qui peut avoir

un impact significatif sur leurs performances thermiques et mécaniques, en plus des enjeux liés à la durabilité. Bien que de nombreuses recherches aient été menées sur les matériaux de construction à base de fibres végétales, le domaine offre encore de vastes opportunités d'étude.

La présente thèse s'inscrit dans cette démarche en ayant pour objectif la caractérisation thermophysique, hydrique et mécanique d'un nouveau composite à base de grignons d'olive et de béton, en vue de son utilisation comme matériau d'isolation thermique dans le bâtiment. Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres, précédés d'une introduction et suivis d'une conclusion générale.

Le premier chapitre aborde la problématique de la consommation énergétique dans le secteur de la construction et propose une synthèse bibliographique des milieux poreux. Il présente également un panorama des travaux théoriques, numériques et expérimentaux disponibles dans la littérature, portant sur les comportements hydriques et thermiques de matériaux poreux allégés par des fibres végétales.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties. La première partie traite des matériaux étudiés et de leurs composants, tandis que la seconde se penche sur les différentes techniques de mesure des propriétés thermophysiques des bétons allégés par les fibres végétales.

Le troisième chapitre est dédié à l'investigation expérimentale visant à déterminer les propriétés thermophysiques des matériaux étudiés. Il présente les matériaux utilisés pour la fabrication des échantillons, le dispositif expérimental ainsi que l'ensemble des mesures de conductivité et de diffusivité thermiques effectuées sur ces échantillons.

Le quatrième chapitre analyse et exploite les résultats expérimentaux de conductivité et de diffusivité thermiques obtenus à l'aide de la méthode des boîtes, pour les différents échantillons élaborés. Il examine l'influence de la teneur en eau volumique et de la masse volumique sur l'évolution des propriétés thermophysiques, et présente les résultats relatifs à la résistance thermique, à la chaleur massique et à l'effusivité thermique des échantillons. Une comparaison des capacités isolantes de différents types de matériaux clôture ce chapitre.

Enfin, une conclusion générale résume les principales découvertes de cette thèse et propose des perspectives pour de futures recherches.

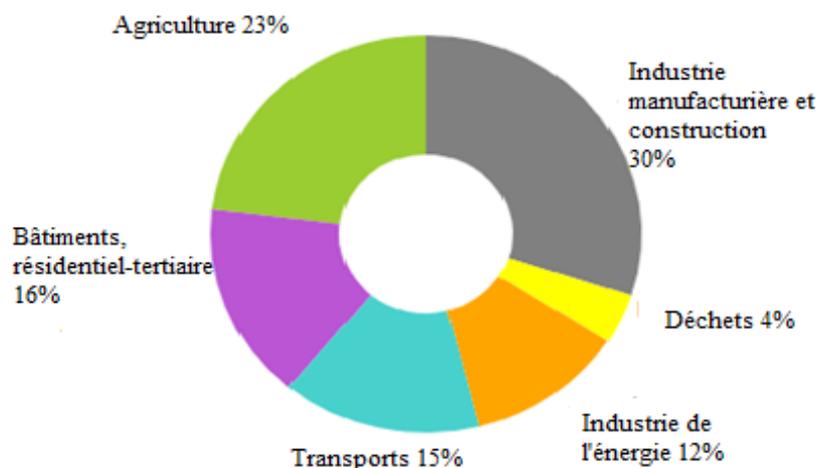
**CHAPITRE I**  
**Milieux poreux**

## I. Introduction

Depuis la nuit des temps, le climat a toujours joué un rôle capital dans la forme du bâti. L'homme de l'antiquité avait construit en ces temps un "abri" en utilisant des matériaux locaux disponibles, ne nécessitant ni main d'œuvre spécialisée, ni matériel mécanisé, pour se protéger des aléas du climat (neige, vent, surchauffe d'été,...) et pour avoir un minimum de confort.

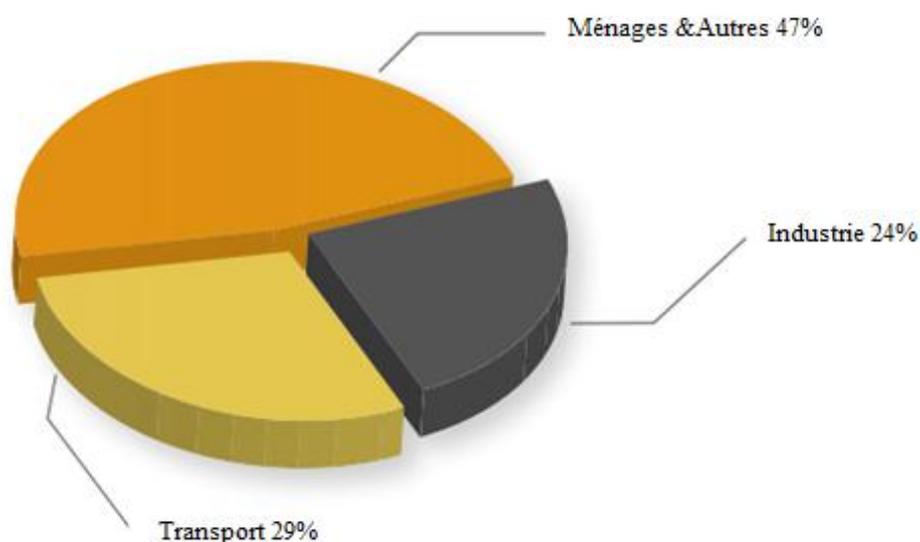
À partir du 18<sup>ème</sup> siècle, la découverte de nouvelles techniques de construction, la standardisation des procédés de construction, et les moyens de transport améliorés, notamment le développement des chemins de fer, ont contribué au déclin de l'utilisation des matériaux locaux, également appelés "traditionnels". Ces matériaux étaient pourtant bien adaptés aux conditions climatiques régionales. Depuis lors, la consommation mondiale d'énergie n'a cessé d'augmenter. Entre 1971 et 2014, la consommation finale totale (TFC) a plus que doublé, passant de 4 244 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtoe) à 9 426 Mtoe, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE). En 2021, la consommation mondiale d'énergie primaire s'est élevée à 595,15 exajoules (EJ), atteignant ainsi un niveau de consommation sans précédent dans l'histoire [1].

L'exploitation excessive des énergies fossiles et la forte consommation énergétique des secteurs résidentiels et tertiaires ont conduit à l'épuisement des ressources énergétiques, aggravant la pollution, notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces émissions sont la principale cause de l'augmentation des températures de l'air et de la surface des océans, ainsi que du réchauffement climatique global. En effet, les températures moyennes à la surface de la Terre ont augmenté de 1,1 °C par rapport aux niveaux préindustriels au cours de la période 2011-2020, et le niveau moyen des mers a augmenté de 0,9 mètre entre 1993 et 2019 [2]. Les émissions mondiales de GES provenant de divers secteurs économiques sont illustrées dans la figure I.1 (GIEC, 2022). Il est à noter que la part du secteur du bâtiment dans les émissions mondiales de GES a atteint environ 16 %.



**Figure I. 1** Répartition des émissions de GES de divers secteurs économiques en 2022 [2]

Comme la plupart des pays, l'Algérie est confrontée à des défis énergétiques de plus en plus importants, en grande partie liés au développement du secteur de la construction. L'augmentation rapide de sa population, avec la construction croissante de logements, ainsi que l'amélioration des conditions de vie des citoyens en matière de confort thermique (chauffage, climatisation, éclairage, appareils électroménagers, équipements électroniques, etc.), combinée aux subventions gouvernementales sur le prix de l'énergie, ont entraîné une explosion de la consommation énergétique du secteur du ménages et autres. Cette consommation représente actuellement près de 47 % de la consommation totale d'énergie, comme le montre la figure I.2.



**Figure I. 2** Consommation énergétique de différent secteur économique en Algérie [3]

## **I.1 Isolation thermique**

L'objectif principal est de réduire la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de confort thermique satisfaisant. Les avantages de l'isolation thermique sont doubles, avec des impacts à la fois économiques et environnementaux significatifs.

L'isolation thermique offre d'autres avantages importants, notamment la préservation de l'intégrité des structures des bâtiments. Les variations de température importantes peuvent provoquer des mouvements thermiques indésirables susceptibles d'endommager la structure du bâtiment. En utilisant une isolation thermique appropriée, il est possible d'atténuer ces fluctuations thermiques et d'augmenter ainsi la durée de vie des structures du bâtiment. De plus, une bonne isolation thermique contribue à prévenir la condensation de la vapeur d'eau à la surface du bâtiment et à minimiser les effets néfastes de l'humidité [4].

## **I.2 Effets de l'humidité sur l'habitat**

Elle représente l'une des principales causes de détérioration des structures de construction. Les problèmes et les dommages se manifestent lorsque les taux d'humidité atteignent des niveaux critiques dans les matériaux de construction. Cette humidité peut provenir de diverses sources, notamment les précipitations extérieures telles que la pluie et la neige, les remontées capillaires du sol, ainsi que les infiltrations liées aux activités des occupants du bâtiment.

Les effets néfastes de l'humidité dans le bâtiment peuvent être regroupés en trois catégories, en fonction du rôle de l'humidité [5]:

- Les altérations dues à l'action propre de l'humidité : le transfert d'humidité à travers la paroi entraîne la modification des propriétés thermo-physiques des matériaux. Ce changement des caractéristiques des matériaux de construction peut altérer ses performances et provoquer sa dégradation.
- Lorsqu'un matériau est exposé à un environnement à hygrométrie élevée, ses pores ont tendance à se remplir davantage d'eau par adsorption, créant ainsi des pressions capillaires au sein de la matrice solide. Ces pressions peuvent fragiliser le matériau, provoquant des variations dimensionnelles telles que le gonflement et le retrait, et entraînant des altérations significatives [6].
- Les altérations dues à la migration de l'humidité : L'humidité peut migrer à travers les pores d'un matériau poreux de manière continue, ce qui peut entraîner la dégradation de ce matériau, notamment par le gel. De plus, l'humidité sert de vecteur de transport pour des agents

agressifs tels que les chlorures et les sulfates, qui peuvent provoquer des dommages, tels que la cristallisation interne des sels, en exerçant des contraintes sur la matrice poreuse [7].

Les matériaux abordés dans cette étude sont de nature poreuse. Par conséquent, dans ce qui suit, nous présenterons les notions essentielles pour une meilleure compréhension d'un milieu poreux.

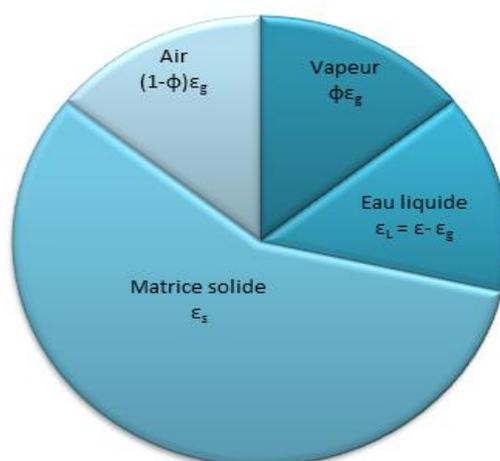
### I.3. Milieux poreux

#### I.3.1 Définition d'un milieu poreux

Les milieux poreux présentent une grande diversité, non seulement en ce qui concerne leurs caractéristiques structurales (forme des particules solides, géométrie des pores et de la matrice solide), mais aussi en ce qui concerne la nature des matériaux constitutifs et leurs interactions physico-chimiques. À l'échelle macroscopique, une description complète d'un tel milieu nécessite donc la caractérisation de chaque phase présente et de leurs proportions relatives.

#### I.3.2 Représentation d'un milieu poreux

En 1979, Huang C. a développé une méthode de représentation d'un milieu poreux en utilisant les fractions volumiques de ses différents composants, notamment les phases solide, liquide, vapeur et gaz.



**Figure I.3** Représentation d'un milieu poreux [8]

#### I.3.3 Grandeurs intrinsèques d'un milieu poreux

On distingue principalement :

### I.3.3.1 L'hygroscopicité

Un matériau est qualifié d'hygroscopique lorsqu'il peut adsorber et retenir une quantité significative d'humidité provenant de l'air ambiant. Cette capacité d'adsorption et de rétention d'eau dépend de l'humidité relative de l'air. Les caractéristiques microstructurales jouent un rôle déterminant dans la propriété d'hygroscopicité des matériaux poreux de construction. Les matériaux avec des pores très fins (inférieurs à 100 nm) présentent une hygroscopicité plus marquée, et la quantité d'humidité adsorbée par adsorption et condensation capillaire peut être significative. Les pores de taille plus importante sont moins sensibles à ce phénomène.

Il existe deux concepts fondamentaux de transfert d'eau pour ces matériaux :

- L'écoulement d'eau capillaire au sein du matériau.
- L'écoulement de l'eau funiculaire au sein du matériau, tandis que l'eau pendulaire reste autour des pores sans s'écouler. Cette eau reste en place.

Ces distinctions sont essentielles pour comprendre la manière dont l'humidité interagit avec les matériaux de construction poreux et comment cela peut influencer leur comportement thermique et mécanique.

### I.3.3.2 Humidité relative

Elle représente la proportion de la capacité maximale de l'air à contenir de la vapeur d'eau dans les conditions spécifiques considérées.

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (I.1)$$

La pression  $P_{vs}$  est donnée par une expression empirique en fonction de la température, valable pour  $0 < T < 80^\circ\text{C}$  avec une précision de  $\pm 0.15\%$  [9] :

$$P_{vs} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042.9}{T - 37.58}\right) \quad (I.2)$$

### I.3.3.3 Porosité

L'humidité relative peut être exprimée sous deux formes différentes :

- La porosité totale est définie comme le rapport entre le volume occupé par les pores (en incluant les pores fermés) et le volume total du milieu. Cette mesure donne une indication de la quantité totale de vides présents dans le matériau, qu'ils soient ouverts ou fermés.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume apparent} - \text{Volume solide}}{\text{Volume apparent}}$$

- La porosité ouverte est une notion importante, car seuls les pores ouverts sont impliqués dans l'écoulement des fluides (gaz et liquides) à travers le matériau. Elle est définie comme le rapport entre le volume des pores accessibles aux fluides et le volume total du matériau. En d'autres termes, c'est la mesure des vides qui sont réellement utilisables pour le transport de fluides.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume accessible}}{\text{Volume total}}$$

#### I.3.3.4 Classification de la porosité

Selon l'IUPAC (Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée), la classification des pores en fonction de leur taille est présentée dans le tableau I.1.

**Tableau I.1** Classification de la porosité selon l'IUPAC [10]

Diamètre des pores	Classe
< 2nm	Microporosité
De 2 à 50 nm	Mésoporosité
> 50 nm	Macroporosité

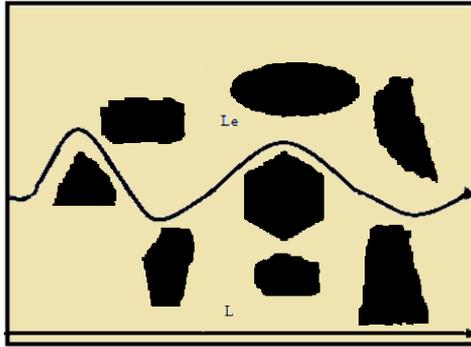
Dans le cas du béton, la proportion volumique de pores isolés est négligeable, et  $\varepsilon$  peut être considérée comme égale à la porosité totale.

En général, les propriétés d'un matériau poreux dépendent à la fois de la géométrie et de la taille de ses pores, ainsi que de leur distribution.

#### I.3.3.5 Tortuosité

La tortuosité, par exemple, reflète le caractère non rectiligne des trajectoires (voir figure I.4). Elle peut être définie comme le rapport de la longueur effective de la trajectoire moyenne du fluide ( $L_e$ ) à la longueur apparente du milieu poreux ( $L$ ) [11] :

$$\tau = \frac{L_e}{L}$$



**Figure I. 4** Paramètres géométriques de la tortuosité et de l'orientation d'un pore

Plusieurs approches expérimentales, empiriques et théoriques ont été élaborées pour tenter de déterminer la tortuosité, parmi lesquelles les travaux [12] et [13], qui ont développé l'expression suivante basée sur des mesures :

$$\tau = 1 - 0.49 \ln \varepsilon \quad (I.3)$$

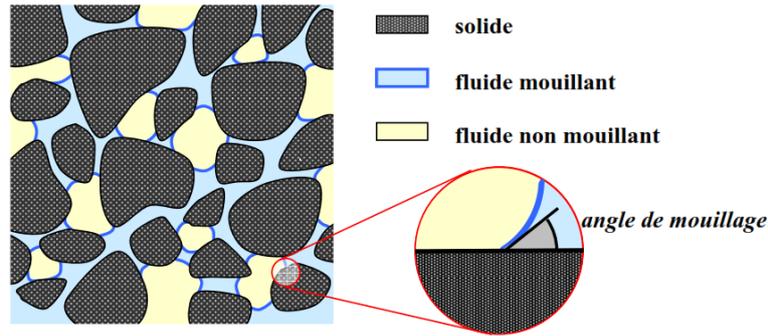
Une relation empirique connue est celle de Bruggeman [14], qui exprime la tortuosité en fonction de la porosité, un paramètre déterminé expérimentalement :

$$\tau = \varepsilon^{0.5} \quad (I.4)$$

La tortuosité est une propriété de la microstructure qui permet de rendre compte de la complexité du chemin parcouru par le fluide dans le milieu poreux.

### I.3.3.6 Loi de Laplace-Kelvin

À l'échelle microscopique, lorsque l'eau liquide rencontre la vapeur d'eau, elle est soumise au phénomène de tension superficielle. Ce phénomène résulte de l'énergie nécessaire pour former une interface entre ces deux phases. Cette interface liquide-gaz forme un angle (appelé angle de mouillage  $\theta$ ) aigu du côté du fluide mouillant (comme illustré dans la figure I.5). Si  $\theta=0$ , cela signifie que le mouillage est total. Si  $0<\theta<90$ , on parle de mouillage partiel, ce qui signifie que le liquide mouille partiellement la surface solide. En revanche, lorsque  $\theta>90$ , le fluide est non-mouillant, et il cherche à minimiser sa surface de contact avec le solide.



**Figure I. 5** Occupation diphasique de l'espace poreux [15]

L'équilibre à l'interface liquide-gaz est régi par la loi de Laplace, où la pression capillaire est la différence entre la pression de l'air ( $P_a$ ) et la pression du liquide ( $P_l$ ) :

$$P_c = P_a - P_l = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_k} \quad (\text{I.5})$$

La relation entre l'humidité ambiante et la pression capillaire (suction) est régie par l'une des lois fondamentales de la thermodynamique, à savoir la loi de Kelvin, dont l'expression est la suivante :

$$P_c = \frac{RT\rho_l}{M} \ln(HR) \quad (\text{I.6})$$

### I.3.3.7 Teneur en eau et saturation

La teneur en eau désigne la quantité d'eau contenue dans un matériau donné. On distingue :

La teneur en eau massique  $\omega_l$  représente le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau ( $m_l$ ) sur la masse du matériau sec ( $m_s$ ) :

$$\omega_l = \frac{m_l}{m_s} \quad (\text{I.7})$$

La teneur en eau volumique  $\theta_l$  est définie par le rapport du volume d'eau liquide  $V_l$  au volume apparent du matériau sec  $V_s$  :

$$\theta_l = \frac{V_l}{V_s} \quad (\text{I.8})$$

La teneur en eau volumique qui peut être déterminée à partir de la teneur en eau massique à l'aide de la formule suivante :

$$\theta_l = \frac{\rho_s}{\rho_l} \omega_l \quad (\text{I.9})$$

La saturation qui est le volume de fraction des vides remplie de liquide :

$$S = \frac{V_e}{V_{\text{pore}}} \quad (\text{I.10})$$

Elle est comprise entre 0 (quand le milieu est sec) et 1 (quand le milieu est saturé).

La relation entre la teneur en eau et la saturation est :

$$\omega_l = \frac{\varepsilon \rho_e}{(1-\varepsilon)\rho_s} S \quad (\text{I.11})$$

Où  $\rho_e$  et  $\rho_s$  sont respectivement la densité d'eau et la densité du solide.

## I.4. Propriétés hydriques des matériaux

### I.4.1 Sensibilité à l'humidité des matériaux poreux.

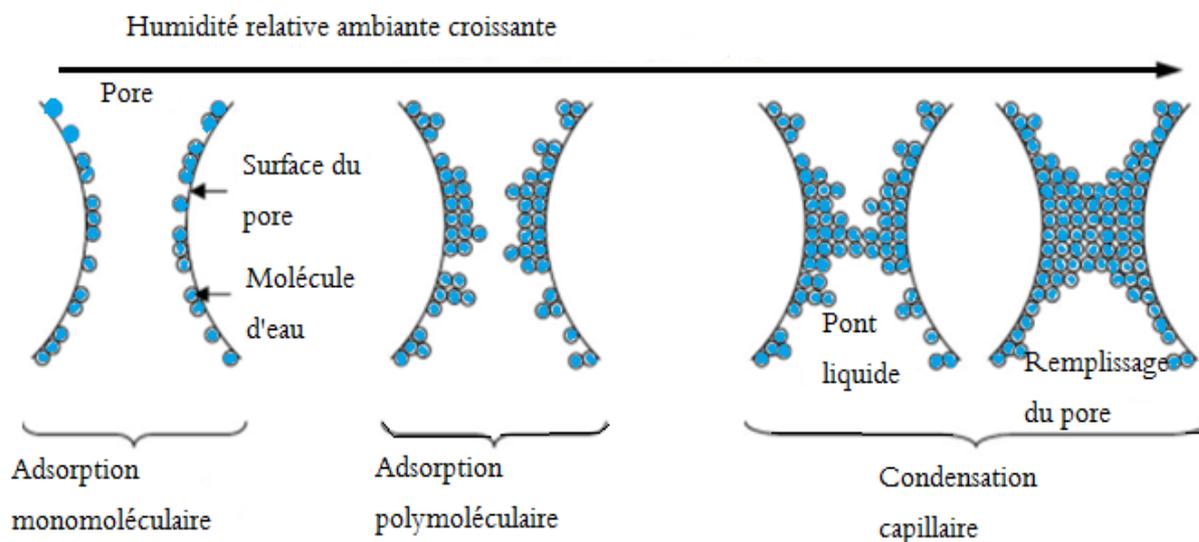
Les matériaux poreux ont la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air environnant. Une augmentation de l'humidité de l'air à proximité du matériau entraîne un accroissement de la teneur en eau du matériau, dû à la fixation des molécules d'eau à la surface du matériau. Ce phénomène est appelé adsorption.

Inversement une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une baisse de la teneur en eau ou en masse apparente (c'est le phénomène de désorption).

Cette caractéristique physique est représentée par des courbes d'équilibre dans des conditions isothermes, appelées courbes d'adsorption et de désorption. Ces courbes revêtent une importance cruciale pour évaluer la sensibilité des matériaux à l'eau, d'autant plus que les changements de teneur en eau induisent des modifications significatives de leurs propriétés thermiques. En effet, l'eau liquide ayant une conductivité thermique ( $\lambda_{\text{eau}} = 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ) environ trente fois supérieure à celle de l'air sec ( $\lambda_{\text{air}} = 0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ), sa présence dans le milieu poreux modifie la conductivité thermique globale des matériaux.

### I.4.2 Fixation de l'humidité

C'est le phénomène d'adsorption, résultant des forces d'attraction entre les molécules d'un fluide et les atomes ou les ions de la matrice solide d'un matériau [16]. Les mécanismes de fixation de l'humidité peuvent être décrits en trois étapes distinctes (voir figure I. 6).



**Figure I. 6** Représentation schématique de l'adsorption physique de l'eau dans un pore [16]

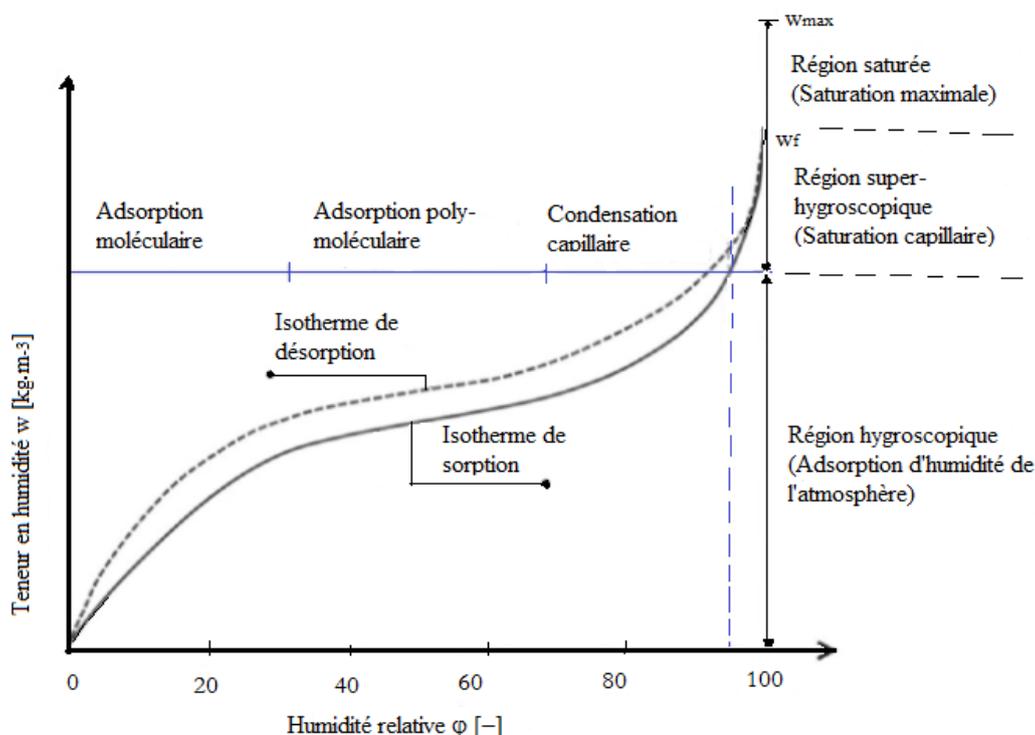
- L'adsorption mono-moléculaire se caractérise par la fixation d'une couche de molécules d'eau à la surface des pores. Ce phénomène est attribuable aux forces intermoléculaires de Van der Waals agissant sur les molécules de vapeur.
  - L'adsorption pluri-moléculaire (multicouche) se manifeste par la fixation d'une ou plusieurs couches de molécules d'eau au-dessus de la première couche adsorbée.
  - La condensation capillaire survient lorsque l'humidité relative devient très élevée et que le diamètre des pores est suffisamment réduit. Les couches pluri-moléculaires se rejoignent alors pour former un pont liquide distinct de la phase gazeuse, séparé par un ménisque.
- Ces processus d'adsorption et de condensation influencent significativement les propriétés thermiques des matériaux poreux.

### I.4.3 Isothermes de sorption

En ce qui concerne les transferts hygrothermiques, les isothermes de sorption représentent les courbes qui fournissent les valeurs, en équilibre thermodynamique, de la teneur en eau du matériau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant, pour une température donnée.

La quantité d'humidité adsorbée par unité de masse du solide dépend de la pression, de la température et de la nature du solide, ce qui permet d'évaluer la capacité du matériau à stocker de l'eau.

La forme des isothermes d'adsorption et de désorption (comme illustré dans la figure I.7) décrit les différents états d'équilibre du matériau avec l'environnement [17].



**Figure I. 7** Diagramme schématisé d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption [17]

Les isothermes de sorption des matériaux poreux de construction peuvent être divisées en trois régions distinctes qui reflètent le comportement du matériau à l'échelle microscopique :

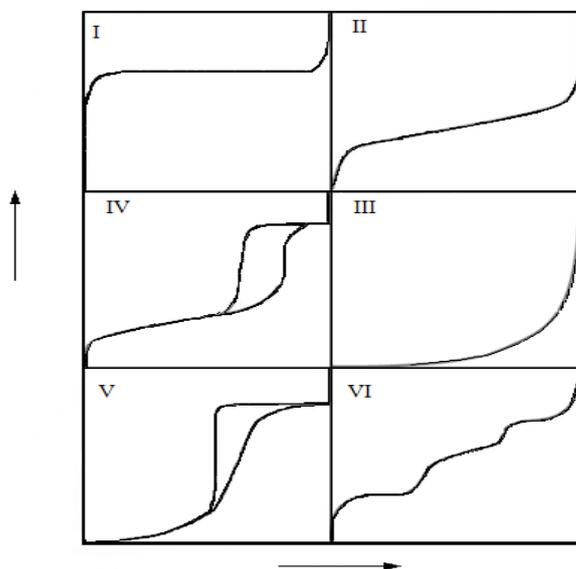
1. Région hygroscopique (ou de sorption) : Cette région s'étend du matériau sec jusqu'à une humidité relative d'environ 85 %. Elle englobe toutes les teneurs en eau résultant de la

sorption d'humidité et de la condensation capillaire jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint.

2. Région super-hygroscopique : Cette région suit la région de sorption et s'étend jusqu'à la saturation libre de l'eau. Dans cette zone, l'eau occupe la majeure partie de l'espace poreux, laissant des poches où la vapeur peut circuler.

3. Région saturée : Si le matériau reste en contact continu avec de l'eau liquide ou si la pression sur ses faces est artificiellement augmentée, les petites poches d'air résiduelles sont dissoutes jusqu'à ce que la saturation maximale soit atteinte.

Les isothermes de sorption sont classées en six types (figure I. 8) selon l'allure de la courbe représentant ce phénomène :



**Figure I. 8** Classification des isothermes d'adsorption physique donnée par l'IUPAC [18]

Les isothermes de sorption d'eau peuvent être classées en différents types en fonction de leur comportement caractéristique :

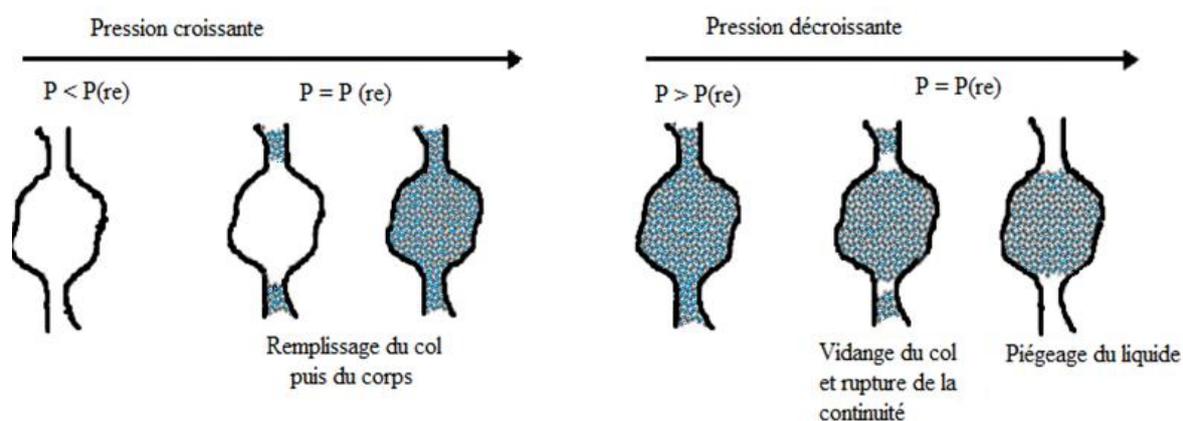
- Type I : Ces isothermes se caractérisent généralement par une section horizontale indiquant la saturation du matériau, même avec l'augmentation de la pression. Elles sont obtenues pour des matériaux poreux avec uniquement des micropores, qui se remplissent à des pressions de plus en plus basses à mesure que leur taille diminue.

- Type II et III : Ces isothermes montrent une augmentation très progressive de l'adsorption en fonction de la pression relative d'équilibre. Elles sont obtenues pour des matériaux ayant une large distribution de tailles de pores, notamment des matériaux non poreux et macroporeux. Ce comportement caractérise une adsorption multimoléculaire.

- Type IV et V : Ils ressemblent respectivement aux types II et III pour les pressions relatives les plus basses. Ces types d'isothermes sont associés à des adsorbants mésoporeux où se produit la condensation capillaire. Une hystérésis de désorption par rapport à l'adsorption est généralement observée, due au changement physique du matériau lorsque l'eau se retire.

- Type VI : Ces isothermes correspondent à une adsorption multicouche caractéristique des matériaux non poreux et très homogènes, où les couches adsorbées se forment successivement.

L'hystérésis entre l'adsorption et la désorption, observable sur la figure I.9, est généralement attribuée à des changements dans l'angle de contact entre l'eau et le matériau. De plus, la non-uniformité géométrique des pores, appelée effet de bouteille d'encre, est l'une des principales raisons de cette hystérésis. Cet effet est plus prononcé lorsque la variation de la section dans le pore est importante.



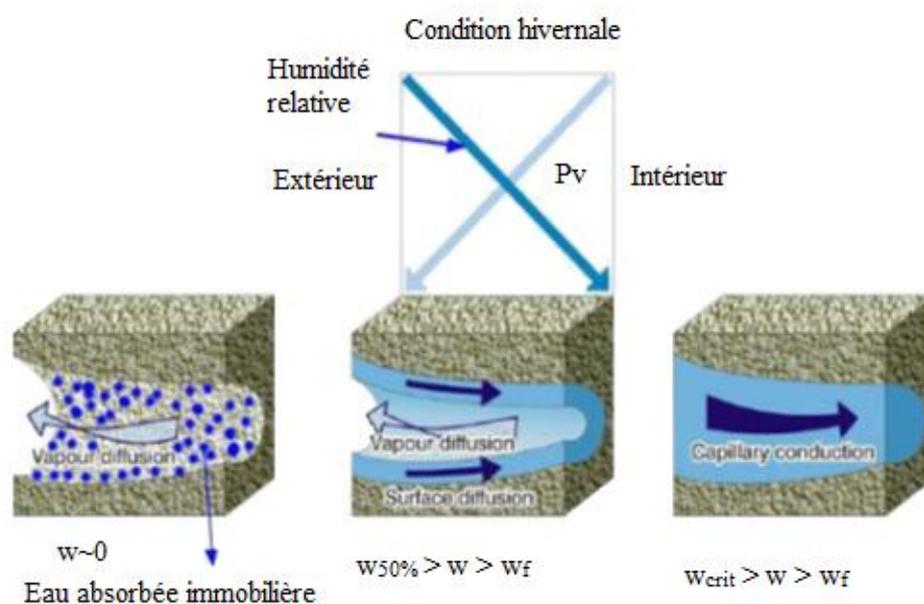
**Figure I. 9** Effet bouteille d'encre [19]

La figure I.9 illustre clairement l'effet de bouteille d'encre à l'échelle d'un pore. Lorsque la pression augmente, les molécules d'eau sont progressivement adsorbées sur la matrice solide, et le pore en forme de bouteille d'encre se remplit de manière graduelle. Pendant le processus de séchage, aucune humidité ne peut s'échapper du pore tant que la pression n'atteint pas à nouveau cette valeur ( $P_e$ ). À ce moment-là, le ménisque qui bloque l'humidité à l'intérieur du

pore, en remplissant le col d'entrée, subit une perte soudaine et se retire, rompant la continuité du liquide dans le pore. Cela entraîne la rétention d'une certaine quantité d'eau à l'intérieur du pore même lorsque la pression diminue.

#### I.4.4 Mécanisme de transport d'humidité

Le transport de l'humidité au sein des matériaux poreux de construction résulte de l'interaction complexe de divers phénomènes qui influencent le déplacement des phases liquide et vapeur. À une échelle macroscopique, cette interaction entre la diffusion de la vapeur et le transfert liquide à travers une paroi de l'enveloppe du bâtiment peut être illustrée comme le montre la figure I.10.



**Figure I. 10** Transfert d'humidité en phases vapeur et liquide pour les conditions hivernales

[20]

Pendant la période hivernale, lorsque la température intérieure est supérieure à celle de l'extérieur, la diffusion de la vapeur se produit du chaud vers le froid. En revanche, le transport par capillarité se produit de l'extérieur vers l'intérieur en raison de l'exposition de la face extérieure à une humidité relative élevée. L'eau absorbée par les parois reste immobile en raison des forces d'adhérence élevées, formant ainsi un film d'eau dont l'épaisseur est plus importante sur la face extérieure, où l'humidité relative est plus élevée. Ce film d'eau devient

mobile, migré vers les zones où il est plus mince. Ce processus est désigné sous le terme de diffusion de surface [20].

### **I.5 Propriétés thermiques des matériaux poreux**

Les caractéristiques thermophysiques des matériaux étudiés jouent un rôle déterminant dans la prédiction du confort thermique des espaces qu'ils enveloppent. En effet, ces paramètres reflètent la capacité d'un matériau à propager ou à stocker la chaleur.

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux humides implique les mécanismes suivants :

- Conduction au sein des phases solide, liquide et gazeuse.
- Convection.
- Rayonnement.
- Évaporation-condensation de l'eau.
- Diffusion de vapeur d'eau due à un gradient de pression partielle.

### **I.6 Modèles de détermination de la conductivité et de la diffusivité thermique**

Nous rappelons dans ce qui suit quelques modèles qui permettent de prévoir la conductivité et la diffusivité thermique des matériaux poreux étudiés.

#### **I.6.1 Conductivité thermique**

On entend par conductivité thermique pure, celle due au transfert de chaleur par conduction dans les phases solide et fluide d'un milieu poreux, en supposant de plus que le transfert convectif est négligeable, hypothèse due à la faible valeur relative du diamètre moyen des pores des matériaux étudiés.

En première analyse, il a été remarqué que la valeur de la conductivité thermique d'un milieu poreux donné, se situe entre les valeurs des coefficients de conduction de la phase solide  $\lambda_s$  et de la phase fluide  $\lambda_f$ .

L'équation de l'énergie thermique qui régit le transfert de chaleur par conduction pure dans un milieu poreux saturé par un seul fluide (immobile), où les effets de changement de phase (vaporisation ou condensation), de réactions physico-chimiques (absorption ou hydratation) et l'influence sur le champ thermique sont négligés est donnée par [21] :

$$\Delta(\lambda \nabla T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I.20})$$

Pour le cas d'un milieu isotrope, la conductivité thermique se réduit à un scalaire. Dans notre étude il ne figure que les propriétés thermophysiques résultant de la résolution de l'équation de transfert de chaleur unidirectionnel.

L'ensemble des modèles existants tente de prévoir la valeur de la conductivité thermique pure  $\lambda_c$  en se basant sur plusieurs hypothèses différentes relatives à la nature des interfaces solide-fluide [22].

### I.6.1.1 Interfaces solide-fluide planes

Le matériau poreux est considéré comme étant formé d'un empilement de plusieurs couches planes, dans ce cas les modèles usuels sont :

#### I.6.1.1.1. Modèle de Krischer [23]

Dans ce modèle, le transfert de chaleur par conduction s'effectue à travers un milieu poreux supposé formé d'une juxtaposition de couches alternées des différentes phases (solide, liquide, gaz) constituant le milieu poreux, disposés parallèlement à la direction du flux de chaleur (modèle parallèle) ou verticalement à ce flux (modèle série).

##### a-modèle parallèle

Dans ce modèle (figure I.11), le flux thermique se partage entre les trois milieux précédemment définis et placés en parallèle.

La conductivité thermique, a pour expression :

$$\lambda_c = (1-P_T) \lambda_s + P_T s \lambda_l + P_T (1-s) \lambda_g \quad (I.21)$$

avec :

$P_T$  : Porosité totale.

$s$  : Degré de saturation des pores.



Figure I.11 : Représentation du modèle parallèle

**b- Modèle série**

Le matériau global est supposé être constitué d'éléments disposés comme l'indique la figure I.12, traversés successivement, par le même flux de chaleur.

La conductivité thermique est donnée alors par :

$$\lambda_c = \frac{\lambda_s \lambda_l \lambda_g}{\lambda_l \lambda_g + PT \lambda_l (\lambda_s - \lambda_g) + PT \lambda_s (\lambda_g - \lambda_l) S} \quad (I.22)$$



**Figure I-12** Représentation du modèle série

**c- Modèle série-parallèle**

A partir des représentations série et parallèle, Krischer a établi un modèle qui suppose que le matériau poreux est équivalent à un empilage de plaques planes (matrice solide) séparées par la phase fluide. Ces plaques sont disposées en parallèle ou en série de façon à ce que la conductivité thermique de la structure soit égale à celle du matériau poreux considéré. Le matériau fictif sera formé de deux ensembles de plaques en parallèle ayant pour conductivité  $\lambda_{//}$  et en série ayant pour conductivité  $\lambda_{\perp}$  par rapport à la direction du flux de chaleur.

La conductivité thermique, en fonction des conductivités thermiques de chaque phase est donnée par :

$$\lambda_c = \frac{1}{\frac{1-\theta}{\lambda_{//}} + \frac{\theta}{\lambda_{\perp}}} \quad (I.23)$$

Avec : 
$$\lambda_{//} = (1-P_T) \lambda_s + P_T \lambda_g \quad (I.24)$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{1-P_T}{\lambda_s} + \frac{P_T}{\lambda_g}} \quad (I.25)$$

$P_T$ ,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_g$  ; sont respectivement la porosité totale, les coefficients de conductivité thermique de la phase solide et de la phase gazeuse.

$\theta$ ,  $(1-\theta)$  ; désignent respectivement les fractions du milieu poreux disposées perpendiculairement et parallèlement à la direction du flux de chaleur ( $0 \leq \theta \leq 1$ ).

Krischer a généralisé son modèle (I.23), en tenant compte du transfert de chaleur par évaporation de la phase liquide, dans ces conditions les modèles série et parallèle s'écrivent :

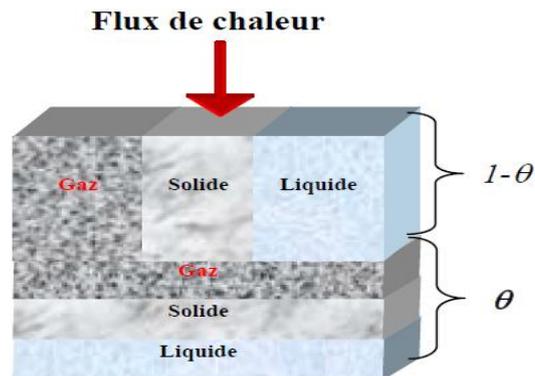
$$\lambda_{//} = (1-P_T)\lambda_s + (P_T - W) b \lambda_v + W\lambda_l + (P_T - W)(1-b)\lambda_g \quad (I.26)$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{1-P_T}{\lambda_s} + \frac{W}{\lambda_l} + \frac{(P_T - W)}{\lambda_v} + \frac{(P_T - W)(1-b)}{\lambda_g}} \quad (I.27)$$

Avec :

W : teneur en humidité.

b : coefficient d'évaporation.



**Figure I.13** Modèle généralisé de Krischer

- Si  $b=0$  (évaporation nulle), la conduction de la phase gazeuse est assimilée à celle de l'air sec.
- Si  $b=1$  (évaporation intense), la conduction de la phase gazeuse se ramène à celle de la vapeur d'eau.

### I.6.1.2 Modèles empiriques

#### I.6.1.2.1 Modèle de Chaudary [24]

Chaudary s'est basé principalement sur la combinaison des modèles série et parallèle, ce qui lui permis de proposer la relation suivante :

$$\lambda = \lambda_{//}^{(1-\theta)} \lambda_{\perp}^{(\theta)} \quad (\text{I.28})$$

Avec :

$$\theta_{dry}(\lambda_s) = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_{dry}}{\lambda_{//}}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{//}}\right)} \quad (\text{I.29})$$

$$\theta_{sat}(\lambda_s) = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_{//}}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{//}}\right)} \quad (\text{I.30})$$

#### I.6.1.2.2 Modèle de Woodside [25]

Dans ce modèle, l'auteur a proposé l'utilisation d'une relation moyenne géométrique pondérée des conductivités thermiques des trois phases (solide, liquide, gaz) :

$$\lambda = \lambda_s^{(1-P_T)} \cdot \lambda_a^{(P_T-W)} \cdot \lambda_l^W \quad (\text{I.31})$$

Avec :

$$\lambda_s = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_{dry}}{\lambda_a^{(P_T-W)} \cdot \lambda_l^W}\right)}{(1-P_T)} \quad (\text{I.32})$$

### 1.6.2 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique  $a$  caractérise la vitesse de diffusion d'un flux de chaleur conductif au sein d'un matériau. C'est une propriété intervenant dans tous les processus de transfert de chaleur en régime non stationnaire. Elle permet en outre d'accéder indirectement à la conductivité thermique lorsque la capacité thermique massique et la masse volumique sont connues car ces grandeurs sont reliées .

Quelques méthodes de mesure permettant d'atteindre, en régime transitoire, les propriétés thermiques des matériaux, en particulier la diffusivité seront rappelées dans ce qui suit.

### I.6.2.1 Méthode du flash

La méthode du flash a été introduite par PARKER pour mesurer simultanément la diffusivité thermique et la chaleur massique des matériaux. Tous les modèles issus de cette méthode utilisent la réponse en température d'un échantillon soumis sur l'une de ces faces à une impulsion thermique très brève. L'exploitation de la réponse en température, « thermogramme expérimental », conduit à la détermination de la diffusivité thermique des matériaux.

Ses principaux avantages sont la rapidité et la simplicité de mise en œuvre.

### I.6.2.2 Modèle de PARKER

Pour le développement de son modèle, Parker a utilisé des échantillons cylindriques et parfaitement isolés latéralement (figure I.14).

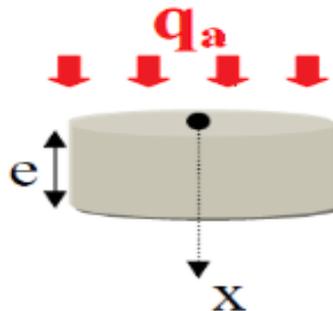


Figure I-14 Représentation de Parker

L'auteur suppose que le transfert de chaleur est unidirectionnel. L'impulsion thermique, d'une durée infiniment courte, est supposée répartie uniformément sur la face avant de l'échantillon. Dans ces conditions, la méthode de séparation des variables, donne l'évolution de la température sur la face non irradiée de l'échantillon :

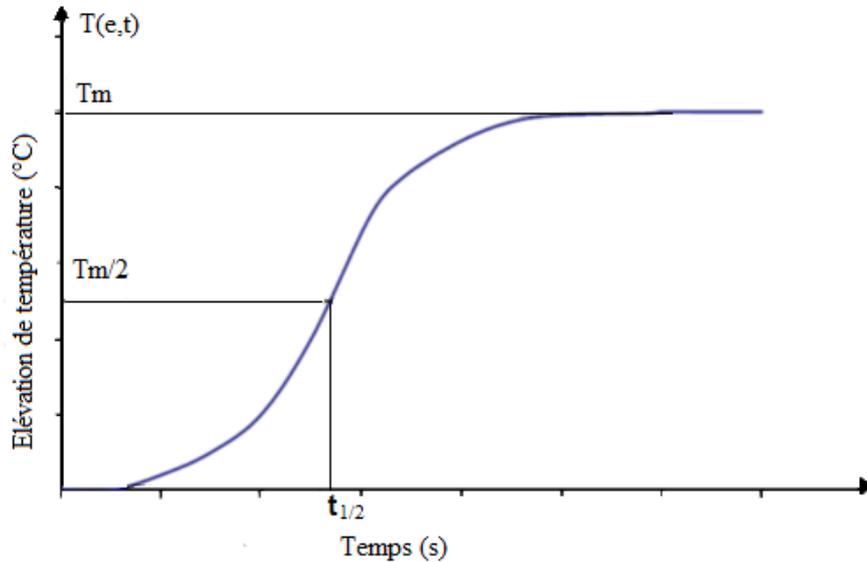
$$T(e, t) = \frac{q_a}{(\rho c)e} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n\pi^2/e^2at} \right) \quad (\text{I.33})$$

Avec :

$q_a$  : Energie absorbée

$e$  : Epaisseur de l'échantillon.

La diffusivité thermique  $a$  et la chaleur massique  $c$  du matériau sont déduites de l'expression de la courbe traduisant l'évolution de la température (figure I-15).



**Figure I-15** Evolution de la température sur la face non irradiée en fonction du temps.

$$a = 0.139 \frac{e^2}{t_{1/2}} \quad (\text{I.34})$$

$$c = \frac{q_a}{T_m \cdot e} \quad (\text{I.35})$$

$T_m$  : Température maximale.

$t_{1/2}$  : Temps correspondant à  $T(e,t)/T_m = 1/2$

Ce modèle, d'une application simple et pratique, néglige plusieurs aspects de la réalité physique. En effet, les fuites thermiques sur les différentes faces de l'échantillon ne sont jamais nulles. L'impulsion thermique n'est jamais de courte durée et rarement répartie d'une façon homogène sur la face avant de l'échantillon.

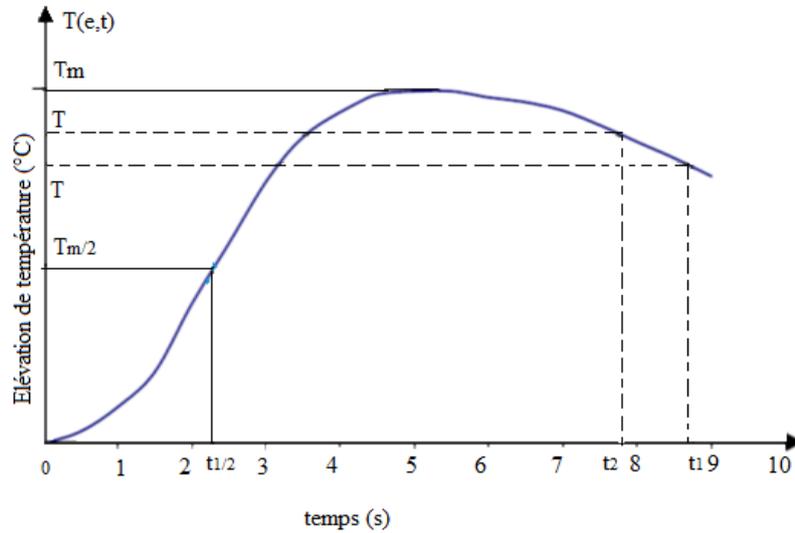
Dans le but d'étendre cette technique à des cas plus réalistes, plusieurs modèles ont été développés [26] et [27], dont celui de JENKINS qui présente le premier modèle de PARKER corrigé.

Les auteurs introduisent sur la face recevant l'impulsion, un coefficient d'échange  $h_0$ . Seule la condition aux limites à l'entrée ( $x=0$ ) est modifiée :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = h_0 T \quad ; \text{ pour } t > 0 \quad \text{et } 0 < r < R$$

R est rayon du cylindre.

L'évolution de la température sur la face non irradiée est illustrée par la figure I-16.



**Figure I-16** Evolution temporelle de la température sur la face non irradiée  
(Modèle de Jenkins).

En utilisant la méthode de séparation des variables, on obtient :

$$T(e, t) = \frac{q_a}{(\rho c)e} 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{i_0}^2 + U_n^2}{B_{i_0} + B_{i_0}^2 + U_n^2} \cos(U_n) \exp\left(\frac{-a U_n^2 t}{e^2}\right) \quad (\text{I.36})$$

$B_{i_0} = h_0 \cdot e / \lambda$ , étant le nombre de Biot sur la face recevant l'impulsion thermique.

$U_n$  est la solution d'ordre  $n$  de l'équation transcendante suivante :

$$U \cdot \text{tg}(U) = B_{i_0}$$

La diffusivité thermique est donnée par :

$$a = \frac{e^2}{\pi^2 t_{1/2}^*} t_{1/2}^* \quad (\text{I.37})$$

où  $t_{1/2}$ , est le temps expérimental correspondant à la demi-élévation de la température maximale enregistrée.

$$t_{1/2}^* = a \pi^2 \frac{t_{1/2}}{e^2}; \text{ est un temps réduit qui ne dépend que de } B_{io}.$$

### I.6.2.3 Modèle de DIGIOVANNI

L'originalité de ce modèle réside dans son approche qui tient compte des pertes thermiques sur toutes les faces de l'échantillon cylindrique (où  $h_o$ ,  $h_e$  et  $h_R$  ne sont pas nécessairement égaux) sans nécessiter une évaluation préalable de ces pertes.

L'auteur a également étudié l'influence de la position des capteurs de température, situés à une distance  $r_e$  de l'axe sur la face arrière de l'échantillon, dans le but de déterminer la diffusivité thermique (comme illustré dans la figure I.17).

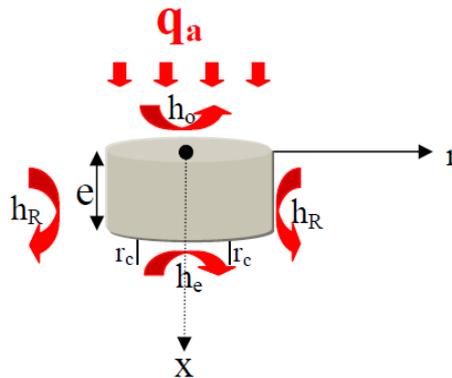


Figure I-17 Représentation de DIGIOVANNI

Pour un flash appliqué uniformément sur la face  $x=0$ , l'évolution de la température de la face  $x=e$  à une distance  $r_e$  de l'axe du modèle, est donnée sous sa forme réduite par :

$$T^*(e, r_c, t^*) = 2 \sum_n \sum_p A_{np} F_p(r_c) G_n(e) e^{-\alpha_{np} t^*} \quad (I.38)$$

Avec :  $F_p(r_c) = J_0(W_p r_c / R)$

$$G_n(e) = U_n \cos(U_n) + B_{io} \sin(U_n)$$

$T^*(e, r_c, t^*) = T(e, r_c, t^*) (c.e) / q_a$  ; température réduite .

$t^* = a.t/c^2$  ; temps réduit (nombre de Fourier).

$R$  : rayon de l'échantillon.

Les coefficients  $A_{np}$  et  $\alpha_{np}$  sont donnés par :

$$A_{np} = \frac{U_n^2}{U_n^2 + B_{io} + \frac{\sin U_n \cos U_n}{U_n} (U_n^2 - B_{io}^2) + 2 B_{io} \sin U_n} \cdot \frac{2 B_{io}}{(B_{io} + W_p^2) J_0(W_p)} \quad (I.39)$$

$$\alpha_{np} = U_n^2 + \frac{e^2}{R^2} W_p^2 \quad (I.40)$$

$U_a$  solution de l'équation transcendante :

$$\text{Tg}(U) = \frac{(B_{io} + B_{ie})U}{U^2 - B_{io}B_{ie}} \quad (I.41)$$

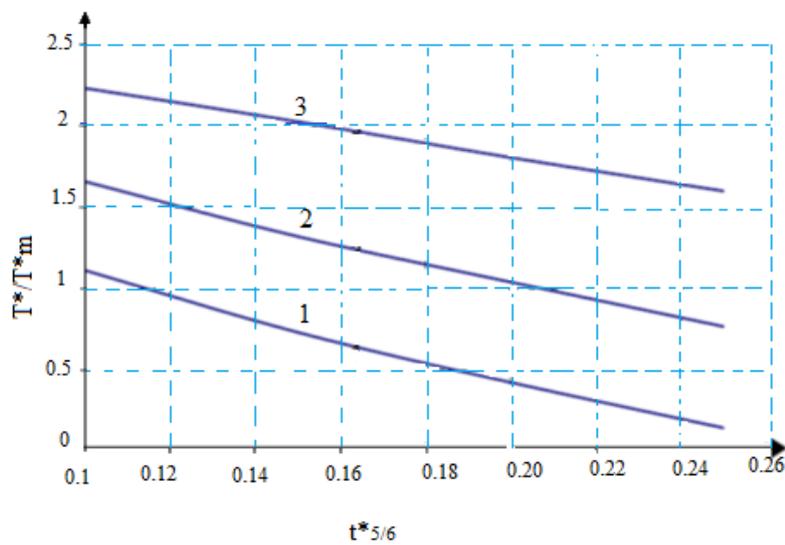
$W_p$  est solution de :

$$W \cdot J_1(W) = B_{iR} \cdot J_0(W) \quad (I.42)$$

$J_0$  et  $J_1$  sont les fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 et 1.

De Giovanni caractérise les courbes  $T = f(t)$  en utilisant le temps réduit particulier  $t^{5/6}$ , qui correspond à l'abscisse du point d'ordonnée 5/6 de l'évolution maximale de la température. L'auteur a démontré numériquement que les courbes théoriques de  $T^*/T_m^*$  en fonction de  $t^*/t^{5/6}$  sont indépendantes des pertes thermiques et des paramètres géométriques du système, tels que  $B_{io}$ ,  $B_{ie}$ ,  $B_{iR}$ ,  $e/R$  et  $r_m/R$ .

Dans ces conditions, et en première approximation, les courbes obtenues peuvent être assimilées à des droites, comme illustré dans la figure I-18.



**Figure I-18** Variation de  $T^*/T_m^*$  en fonction de  $t^*/t_{5/6}$  de :

$$1 : t_{2/3}/t_{5/6} \quad ; \quad 2 : t_{1/2}/t_{5/6} \quad ; \quad 3 : t_{1/3}/t_{5/6}$$

Les trois expressions de la diffusivité thermique sont alors :

$$\begin{aligned}
 a_{2/3} &= e^2 \frac{1.150 t_{5/6} - 1.250 t_{2/3}}{t_{5/6}} \\
 a_{1/2} &= e^2 \frac{(0.761 t_{5/6} - 0.926 t_{1/2})}{t_{5/6}} \\
 a_{1/3} &= e^2 \frac{(0.617 t_{5/6} - 0.862 t_{1/3})}{t_{5/6}}
 \end{aligned}
 \tag{I.43}$$

Ces trois relations ont été vérifiées numériquement sur un très large éventail de valeurs couvrant tous les cas réels et même au-delà tel que :  $0 \leq R \leq 10$ .

Les  $t_{i/j}$  sont obtenues directement sur le thermogramme expérimental.

#### I.6.2.4 Modèle de YEZOU

Ce modèle a été utilisé pour la première fois pour mesurer la diffusivité thermique des matériaux de construction sur des échantillons parallélépipédiques de dimensions  $(50 \times 50 \times 50) \text{ cm}^3$ , en prenant en compte le temps d'impulsion  $t_0$ . De plus, au lieu d'utiliser une approximation linéaire de la température en fonction du temps et de l'épaisseur, l'auteur propose deux relations basées sur une approximation parabolique.

Les hypothèses de travail que l'auteur suppose expérimentalement vérifiées sont les suivantes :

- Une face plane de l'échantillon est soumise au rayonnement thermique pendant une durée  $t_0$ , et l'excitation thermique est maintenue par une lampe à incandescence de forte puissance (de l'ordre de 2000 W) ;
- Les transferts thermiques sont unidirectionnels ;
- Le modèle est linéaire, ce qui signifie que les grandeurs thermophysiques sont considérées comme indépendantes de la température ;
- Les coefficients d'échange superficiels sont supposés égaux sur les deux faces de l'échantillon.

L'évolution de la température sur la face non irradiée pendant et après l'échauffement a été obtenue en utilisant la méthode du changement de variable [28].

Elle est donnée par

- pour  $0 < t < t_0$  :

$$T(e, t) = 2q \frac{e}{\lambda} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{U_k^2 + B_i^2 + 2B_i} \left( 1 - e^{-aU_k^2 \frac{t}{e^2}} \right) \quad (I.44)$$

- Pour  $t > t_0$  :

$$T(e, t) = 2q \frac{e}{\lambda} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{U_k^2 + B_i^2 + 2B_i} \left( 1 - e^{-aU_k^2 \frac{t}{e^2}} \right) \left( e^{-aU_k^2 \frac{t-t_0}{e^2}} \right) \quad (I.45)$$

$U_k$  étant la solution de l'équation transcendante suivante :

$$\text{tg}(U) = \frac{2BiU}{U^2 + B_i^2} \quad (I.46)$$

$Bi = h.e/\lambda$  est le coefficient d'échange adimensionnel (nombre de Biot).

Pour le dépouillement, l'auteur tient compte de la durée d'éclairement  $t_0$  et montre que sa méthode se réduit à celle du flash si l'on prend comme origine des temps  $t_0/2$ . La diffusivité thermique qui en résulte est donnée par :

$$a_{5/6} = \frac{e^2}{t_{5/6} + t_0/2} \left( 0.731 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right)^2 - 1.812 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right) + 1.037 \right) \quad (I.47)$$

$$a_{1/2} = \frac{e^2}{t_{5/6} + t_0/2} \left( -0.4032 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right)^2 + 0.1103 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right) + 0.2027 \right)$$

Les  $t_{i/j}$  correspondant aux fractions  $i/j$  de l'augmentation de la température maximale sont directement déduits du thermogramme expérimental. Cette méthode, qui repose sur un dispositif expérimental simple, est particulièrement adaptée aux matériaux de construction présentant une variété de granulats.

## I.7 Matériaux de construction biosourcés

Un matériau de construction est qualifié de biosourcé lorsqu'il intègre des composants issus de la biomasse végétale ou animale. Cette biomasse est constituée de matières d'origine biologique renouvelable, comme les végétaux, les arbres, les résidus agricoles, les algues, etc., à l'exclusion des matériaux d'origine géologique ou fossile [29]. En effet, l'utilisation de ces matériaux contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre en absorbant le dioxyde

de carbone (CO<sub>2</sub>), à optimiser l'utilisation des ressources, à réduire les déchets générés par de nombreuses industries (agriculture, agroalimentaire, etc.) et à alléger les matériaux de construction.

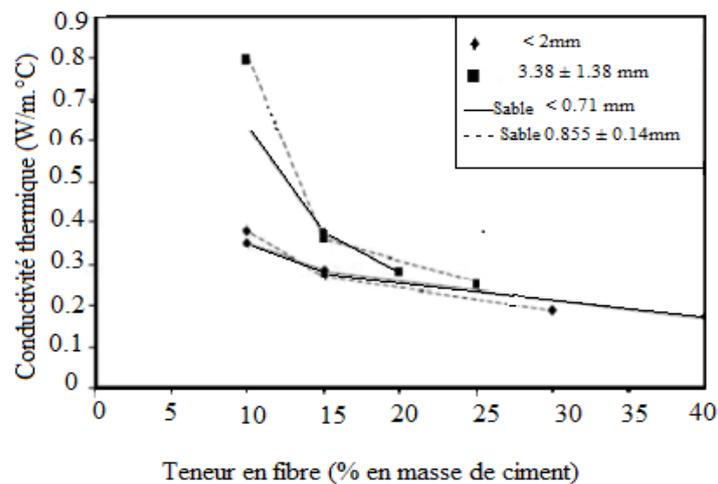
### **I.8 Quelques travaux sur les comportements thermophysiques et mécaniques des matériaux de construction biosourcés**

Pour améliorer le confort thermique d'un bâtiment et économiser de l'énergie, il est indispensable de mettre en œuvre des matériaux performants en termes, d'isolation thermique. Le mélange d'un matériau isolant avec un matériau de construction est l'un des procédés les plus simples, et les plus usuels pour améliorer les propriétés d'isolation thermique de celui-ci. Cette pratique, notamment l'ajout de fibres, est connue depuis fort longtemps. Ainsi, les briques fabriquées à partir d'un mélange terre/fibres végétales (pailles, sciures de bois,...) ont été utilisées depuis l'antiquité. Cette technique a toujours suscité l'intérêt des chercheurs et de nombreux travaux ont porté sur l'étude des matériaux de construction à base de fibres végétales.

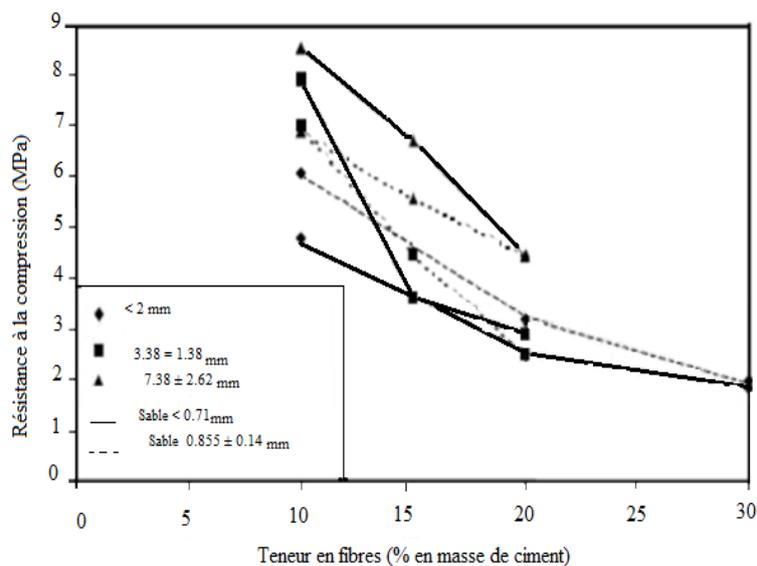
Bouguerra et al ont étudié l'influence de l'ajout de la sciure de bois sur les propriétés thermiques d'un matériau de construction à base de bois et de ciment. Pour l'évaluation des propriétés thermo-physiques de ce matériau, les auteurs ont utilisé la technique de mesure de la source plane transitoire et développé un nouveau modèle de prévision de la diffusivité thermique des matériaux composites. Les résultats obtenus ont montré un bon accord entre les mesures expérimentales et l'approche théorique. Il a été noté que la conductivité et la diffusivité thermique augmentent avec la décroissance des proportions de la sciure de bois dans la matrice, Les valeurs de la conductivité thermique varient de 0,132 W/°C.m à 0,439 W/°C.m, tandis que celles de la diffusivité thermique varient de  $1,75 \times 10^{-7}$  m/s<sup>2</sup> à  $3,19 \times 10^{-7}$  m/s<sup>2</sup> en fonction de la proportion des ajouts, qui varie de 0 % à 50 % respectivement. Les matériaux composites à base de bois offrent une combinaison d'inertie thermique utile, une capacité de stockage de chaleur efficace, et une excellente isolation thermique [30].

Khedari et al. ont réalisé une étude portant sur l'exploration d'un nouveau matériau de construction léger. Ce matériau est constitué d'un mélange de ciment, de sable, ainsi que de fibres issues de déchets de noix de coco et de durian. Les propriétés thermiques et mécaniques de ce matériau ont fait l'objet d'une étude approfondie. Les résultats de cette étude ont révélé que l'incorporation de fibres issues de déchets de noix de coco et de durian dans la matrice du matériau, avec des proportions respectives de 10 %, 15 %, 20 %, 25 % et 30 %, a engendré une réduction significative de la conductivité thermique. Plus précisément, les résultats de

l'étude ont montré une amélioration significative des propriétés du matériau. La conductivité thermique est passée de 0,8 W/K.m à 0,2 W/K.m pour le premier type de fibre, et de 0,39 W/K.m à 0,2 W/K.m pour le second type de fibre. De plus, la résistance à la compression du matériau a également été améliorée, passant de 8,6 MPa à 4,2 MPa pour le premier type de fibre, et de 4,6 MPa à 2,3 MPa pour le second type de fibre (comme indiqué dans les figures I.19 et I.20). Ces résultats montrent que le composite répond aux exigences de base des matériaux de construction, ce qui le rend adapté à une utilisation dans la construction de murs et de toits[31].



**Figure I.19 :** Variation de la conductivité thermique de composites en fonction de la teneur en fibres[31].

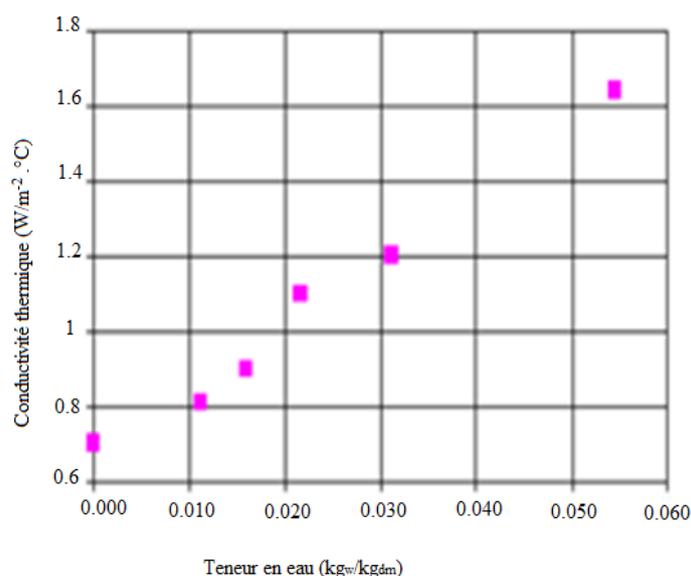


**Figure I.20:** Variation de la résistance à la compression de composites

en fonction de la teneur en fibres[31]

Kriker et al se sont intéressés aux propriétés mécaniques et hygroscopiques d'un béton de fibre de palmier dattier sans examiner l'effet du transfert thermique. L'étude a montré une faible performance de durabilité du matériau résultant de la dégradation des fibres après l'immersion de ces dernières dans des solutions alcalines [32].

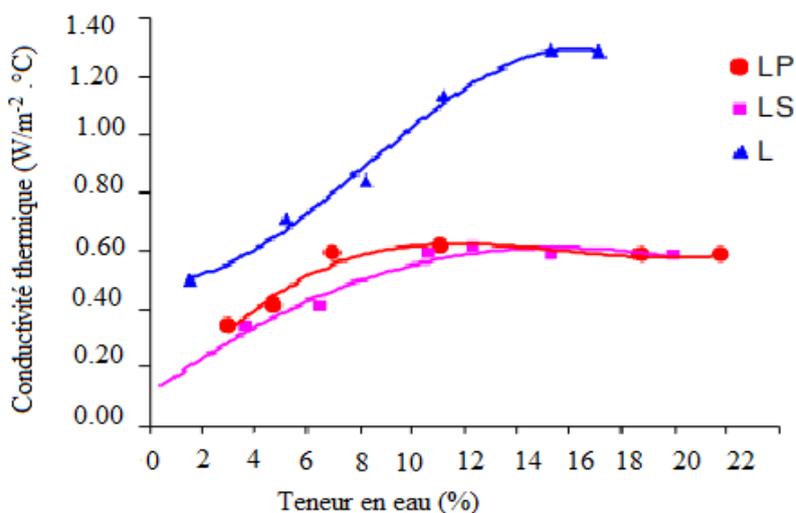
Harrouna et al ont déterminé les caractéristiques thermo-physiques et hydriques de la brique de latérite de millet en utilisant la méthode du plan chaud asymétrique. Un nouveau modèle basé sur une approche physique de la répartition de l'air et de l'eau à l'intérieur de la matrice solide a été construit. Le modèle proposé a donné une représentation plus précise que les modèles classiques, qui mesurent la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau (figure I.21) et de la proportion en fibre. L'effet de l'ajout de millet sur la résistance mécanique du matériau n'a pas été pris en considération [33].



**Figure I.21** : Variation de la conductivité thermique d'un échantillon de brique de millet en fonction de la teneur en eau [33]

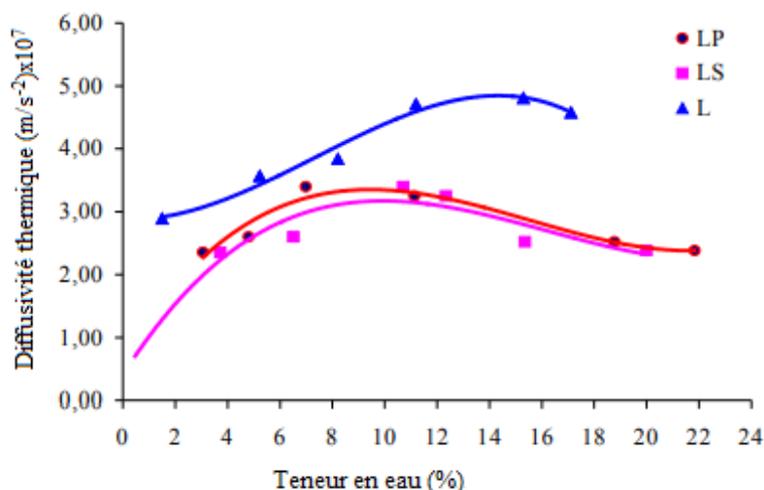
Cherki et al ont réalisé une étude expérimentale sur les propriétés thermiques du matériau gypse allégé par du liège expansé, en utilisant la méthode de la plaque chaude asymétrique. Les résultats ont montré que le matériau composite est trois fois plus isolant et deux fois plus léger, que le matériau non allégé. Les mesures expérimentales de la conductivité thermique sont en bon accord avec l'équation moyenne pondérée [34].

Par ailleurs, plusieurs études de caractérisation des matériaux poreux ont été publiées. En utilisant la méthode des boîtes, Meukam et al ont caractérisé les propriétés thermo-physiques de matériaux de construction à base de produit locaux économiques (terre stabilisée, béton allégé par la sciure de bois...). Les auteurs ont constaté que les propriétés thermo-physiques dépendent de la teneur en eau des échantillons (figure I.22 et figure I.23) [35].



**Figure I. 22.** Conductivité thermique de trois mélanges en fibre en fonction de la teneur en eau [35]

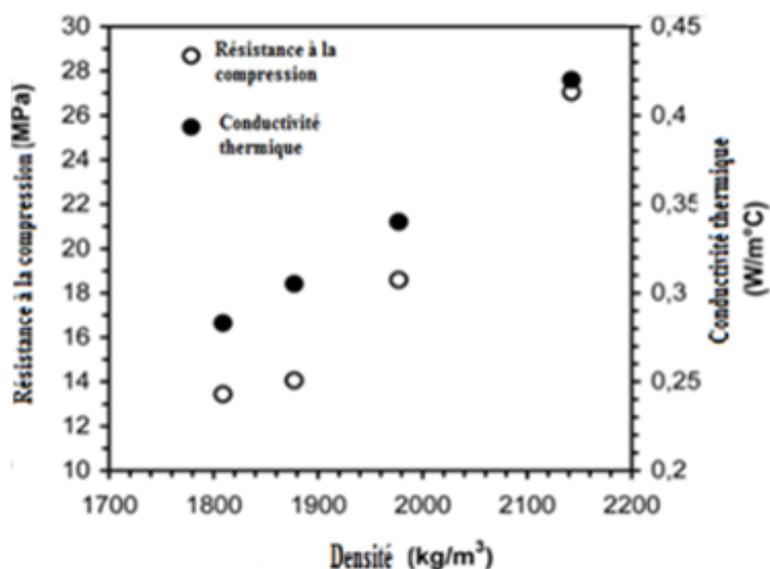
Avec :            LP : Latérite de pouzzolène  
                      LS : Latérite de sciure de bois  
                      L : Latérite



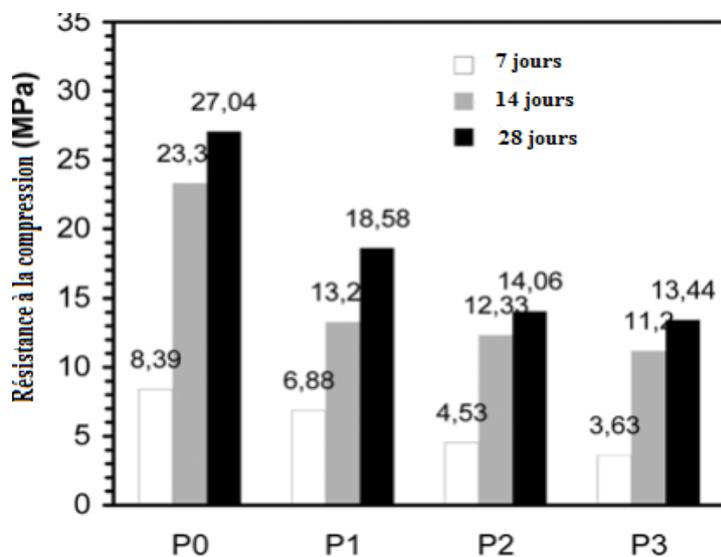
**Figure I. 23.** Diffusivité thermique pour trois dosages en fibre en fonction de la teneur en eau [35]

Avec :            LP : Latérite de pouzzolene  
                       LS : Latérite de sciure de bois  
                       L : Latérite

Taoukil et al. ont examiné les possibilités d'amélioration de l'isolation thermique en incorporant de la laine de bois dans un mortier de sable, dans le but de valoriser l'utilisation de ces matériaux allégés comme béton léger isolant. Leurs recherches ont démontré que l'incorporation progressive de laine de bois (à des taux de 0%, 35%, 46%, et 58%) dans le mortier a conduit à une réduction significative de la conductivité thermique et de la densité, augmentant ainsi la capacité d'isolation thermique du mortier. Cependant, cette incorporation a également entraîné une diminution de la résistance à la compression, comme illustré dans la figure I.24. Malgré cela, les valeurs de résistance à la compression, maintenant aux alentours de 28 MPa, demeurent compatibles avec l'utilisation de ces matériaux en tant que béton léger, comme indiqué dans la figure I.25[36].



**Figure I.24** Variations de la conductivité thermique et de la résistance à la compression d'un mortier de sable allégé avec la laine de bois en fonction de la densité [36]



**Figure I.25** Variation de la résistance à la compression du mortier de sable allégé en fonction de la concentration de la laine de bois pour les composites P0=0%, P1=35%, P2=46%, P3=58%. [36]

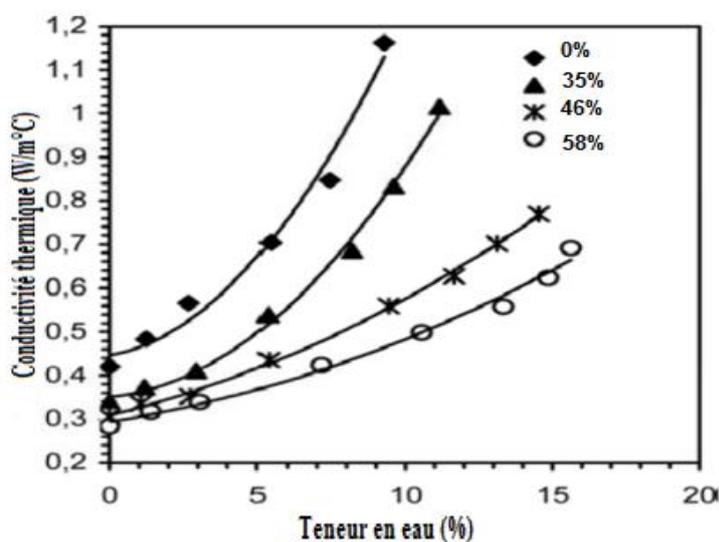
Dans le même contexte, une étude portant sur le comportement thermomécanique du béton mélangé avec des pailles d'orge a été menée par Belhadj et al. Leurs résultats ont montré que

l'incorporation de 7,2 % de pailles d'orge réduisait la conductivité thermique du béton de 5,71 %. Cependant, cette intégration de particules végétales avait pour effet de réduire la résistance à la compression d'environ 38 % [37].

La conductivité thermique de la terre crue a fait l'objet d'une évaluation dans une étude menée par Aboudou et al. Les chercheurs ont prélevé et caractérisé de la terre provenant de la région de Bamako au Mali. Cependant, pour réduire la conductivité thermique du matériau, qui variait initialement entre 0,54 W/m.K et 0,73 W/m.K, ils ont incorporé divers pourcentages de balle de riz. Les résultats obtenus ont clairement démontré que l'ajout de balle de riz avait un impact significatif sur la réduction de la conductivité thermique du mélange. En effet, les auteurs ont signalé qu'une incorporation de 14 % de balle de riz en masse avait pour effet de réduire la conductivité thermique du composite jusqu'à la valeur de 0,25 W/m.K. [38].

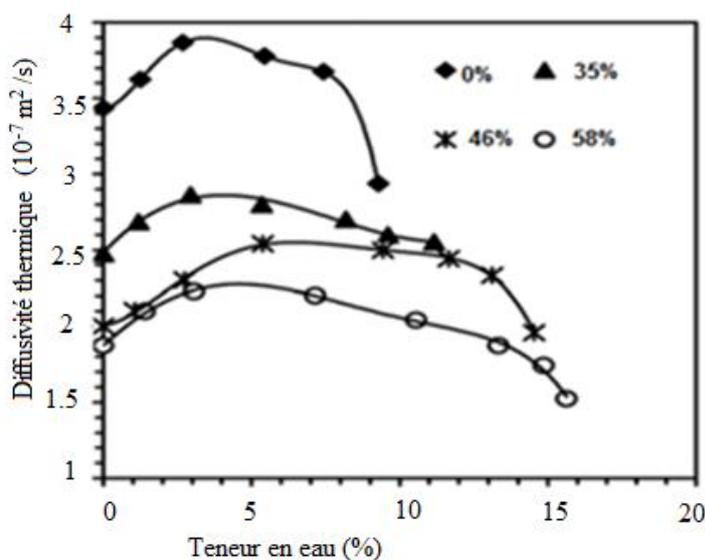
Taoukil et al ont remarqué que la conductivité et la diffusivité thermiques du mortier de sable renforcé par de la laine de bois sont fortement influencées par la proportion en eau ajoutée. Les mesures de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique ont été obtenues respectivement par la méthode des boîtes et par la méthode flash.

Les auteurs ont observé que la conductivité thermique du mortier de sable allégé augmente avec la teneur en eau pour les différents composites (P0 = 0 %, P1 = 35 %, P2 = 46 %, P3 = 58 %) (figure I.26). [39]



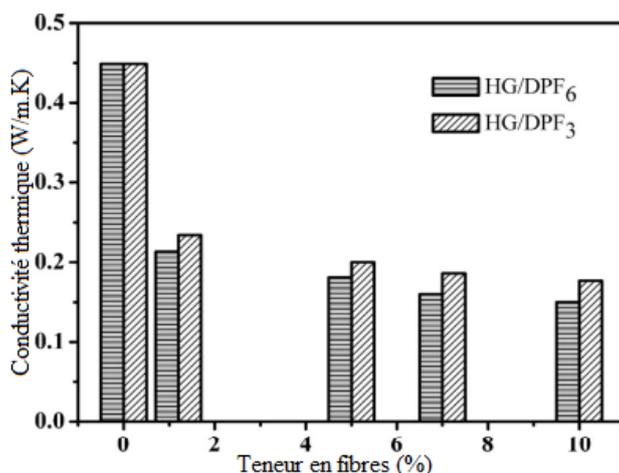
**Figure I.26** Variation de la conductivité thermique de différents composites de mortier de sable en fonction de la teneur en eau [39]

Pour la diffusivité thermique de mortier de sable allégé, il est aisé de remarquer sur la figure I.29, que sa variation en fonction de la teneur en eau est en forme de cloche.

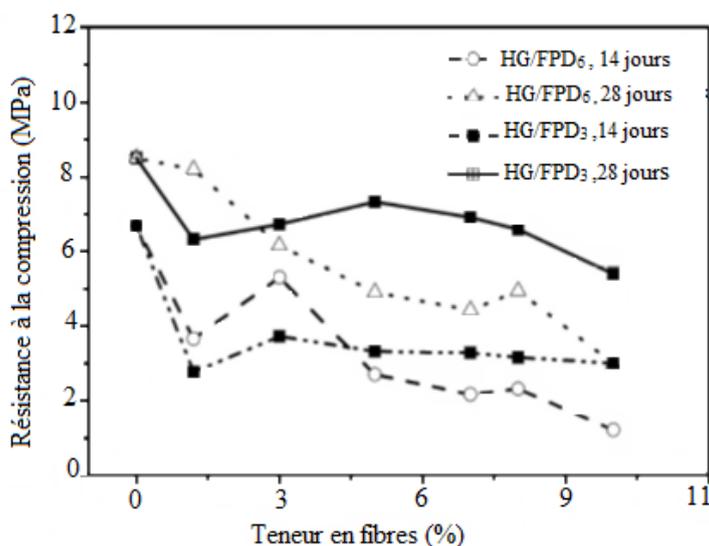


**Figure I.27** Variation de la diffusivité thermique de différents composites en fonction de la teneur en eau [39]

Chikhi et al. ont entrepris une étude portant sur un nouveau matériau composite élaboré à partir de gypse et de fibres de palmier dattier (FPD), dans le but de l'utiliser comme matériau d'isolation thermique dans le domaine de la construction. Les auteurs ont mené des expérimentations visant à analyser l'impact des fibres de palmier dattier sur la conductivité thermique, l'absorption d'eau, ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux à base de gypse. Les résultats obtenus ont démontré que la conductivité thermique des composites diminuait à mesure que la concentration de FPD augmentait. De plus, les essais ont révélé que les résistances à la compression et à la flexion des biocomposites pouvaient être améliorées en incorporant une quantité appropriée de fibres, soit 3 % de FPD. Cette approche permettrait d'obtenir des performances thermiques et mécaniques satisfaisantes, rendant ces matériaux adaptés à une utilisation en tant que matériau d'isolation thermique dans les applications de construction. [40]

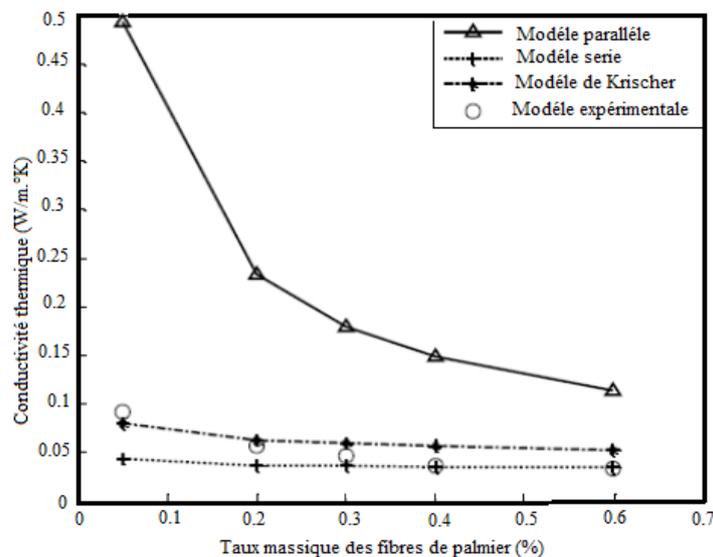


**Figure I.28** Conductivité thermique de composites gypse/fibres de palmier dattier en fonction de la teneur en fibres [40]



**Figure I.29** Résistance à la compression des composites gypse/fibres de palmier dattier en fonction de la teneur en fibres [40]

Amara I. et al. ont étudié les propriétés thermophysiques notamment la conductivité thermique effective de matériaux composites constitués des fibres de palmier dattier dispersées dans une matrice de ciment, à différents taux massiques allant de 5% à 60%. Une confrontation entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques de différents modèles (modèles série, parallèle et de Krischer) a été menée.



**Figure 1.30** Evolution de la conductivité thermique effective en fonction du pourcentage massique des fibres de palmier [41]

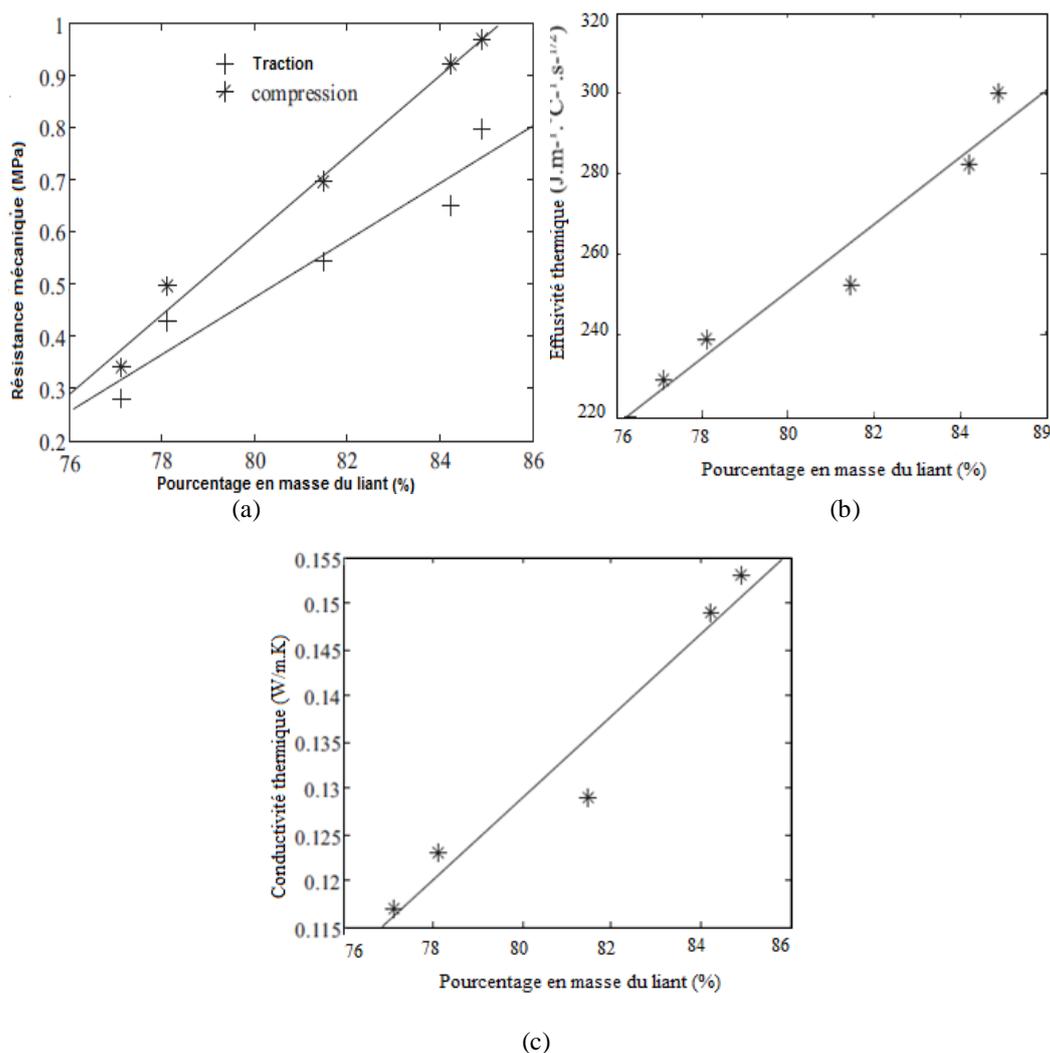
Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique du matériau composite diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres de palmier.

La comparaison des modèles analytiques avec les mesures expérimentales montre que les modèles série et de Krischer prédissent correctement les mesures expérimentales de la conductivité thermique, à l'opposé du modèle parallèle ne prédit pas bien les valeurs expérimentales du composite étudié figure I.30. On conclue alors que les résultats du modèle de Krischer concordent mieux avec les résultats expérimentaux. [41]

Charai M. et al ont testé une nouvelle procédure expérimentale pour caractériser la conductivité thermique en utilisant la méthode des boîtes mais avec des échantillons de taille réduite ( $13.65 \times 13.65 \times 4$ )  $\text{cm}^3$  au lieu des dimensions ordinaires de ( $27 \times 27 \times 4$ )  $\text{cm}^3$  et sans aucun capteur (sonde) supplémentaire. Trois différents scénarios ont été examinés, afin d'évaluer la performance de la méthodologie proposée. Les valeurs de la conductivité thermique mesurées ont été comparées à celles obtenues par la méthode de référence (hot disc). Le bon accord observé prouve l'efficacité de la technique utilisée. L'incertitude sur la technique utilisée s'est avérée inférieure à 6.1% [42].

Dieye Y. et al ont contribué à la valorisation des fibres de Typha Australis comme matériau de construction en utilisant de l'argile comme liant. L'influence de la teneur en liant sur les propriétés d'isolation mécanique et thermique a été examinée. Les mesures de l'effusivité thermique et de la conductivité thermique des échantillons ont été effectuées à l'aide de la

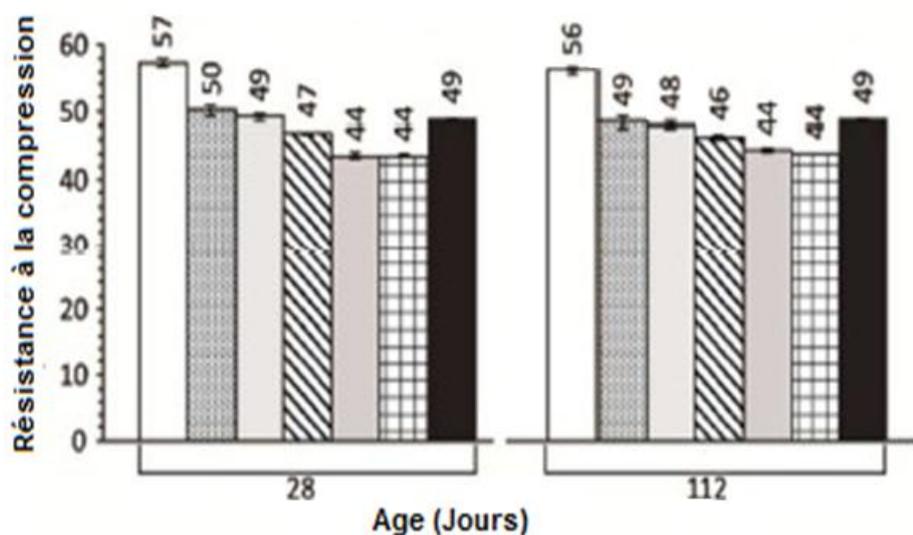
méthode des plaques chauffantes transitoires. Les résistances à la compression et à la traction varient respectivement de 0,279 à 0,796 MPa et de 0,340 à 0,969 MPa lorsque le pourcentage de poids du liant varie de 77 à 85 %. Ces valeurs présentent une forte corrélation linéaire avec le pourcentage de poids de liant. La conductivité thermique des matériaux secs varie de 0,117 à 0,153  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , tandis que l'effusivité thermique passe de 228,9 à 300,0  $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ . Les résultats montrent que la conductivité thermique et l'effusivité thermique augmentent avec la teneur en humidité des matériaux (voir figure I.31) [43].



**Figure I.31** (a) Résistance mécanique en fonction du pourcentage du liant (b) Effusivité thermique en fonction du pourcentage du liant (c) Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du liant[43]

Le comportement à la compression des mortiers et bétons renforcés par des fibres végétales a fait l'objet de nombreuses études de recherche. Khelifa et al. ont examiné le comportement à

la compression des bétons renforcés par des fibres d'Alfa à différents dosages : 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %, et 2,5 % en volume. En parallèle aux bétons renforcés par l'Alfa, les chercheurs ont également formulé deux bétons renforcés par des fibres synthétiques à des fins de comparaison. Les échantillons ont ensuite été soumis à des essais de compression après 28 et 112 jours de maturation. Les résultats obtenus, comme illustré dans la Figure I.32, ont révélé que la résistance à la compression du béton fibré avec des fibres d'Alfa diminuait à mesure que le pourcentage de fibres augmentait. Cette réduction de la résistance pouvait s'expliquer par la présence de vides résultant de l'incorporation des fibres d'Alfa. Ces espaces vides présents dans les biocomposites réduisaient la compacité du matériau et entraînaient ainsi une perte de résistance à la compression [44].



**Figure I.32** Résistance à la compression des bétons renforcés avec des fibres d'Alfa à 28 et 112 jours [44]

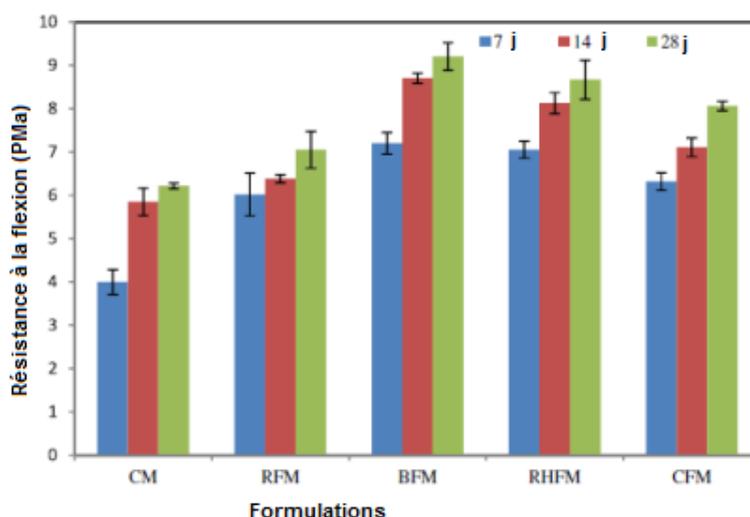
Chafai et al. ont étudié le comportement rhéologique et mécanique des mortiers renforcés avec des fibres de lin. Avant leur incorporation comme matériau de renfort dans les mortiers, les fibres ont fait l'objet de 3 traitements:

- 1- Le premier a consisté à immerger les fibres dans une substance hydrofuge pendant deux heures, puis à les sécher à une température ambiante pendant quatre heures. Les fibres obtenues sont appelées RHF.
- 2- Le second a consisté à nettoyer les fibres de lin en les immergeant dans de l'eau bouillie pendant 5 min, puis à les rincer avec de l'eau du robinet afin d'enlever les relâches extractifs. Elles seront ensuite séchées à une température ambiante pendant deux jours. Les fibres obtenues sont appelées BF.

3- Le dernier a consisté à enduire les fibres de lin avec des coulis de ciments CEM I 52.5 R. Les fibres ainsi obtenues sont appelées CF.

Les résultats obtenus ont montré que le traitement des fibres réduit considérablement leur taux d'absorption à l'eau. L'utilisation des résines hydrophobes ainsi que le coulis de ciment comme traitement ont permis de réduire respectivement le taux d'absorption de 47% et de 35% comparé aux fibres de lin brut. Par contre, le traitement à l'eau bouillie n'a donné aucun changement significatif de l'absorption d'eau comparativement aux fibres brutes.

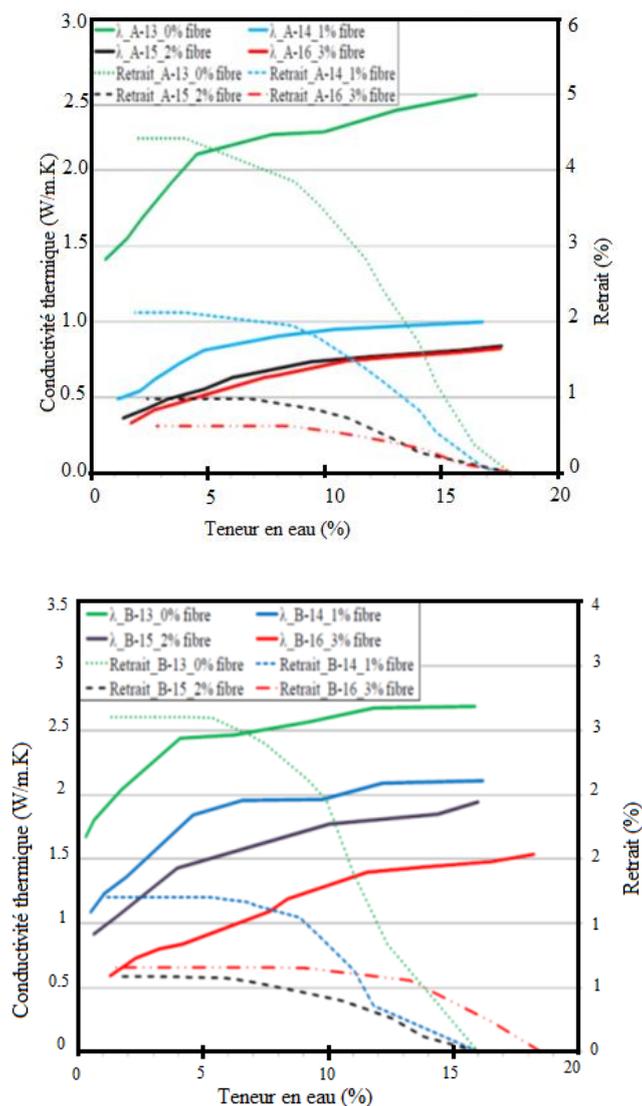
Les différents mortiers fibrés au lin ont montré une meilleure résistance à la flexion comparativement aux mortiers témoins, quel que soit le type de traitement appliqué. Cependant, il a été observé que les fibres nettoyées avec de l'eau bouillante avaient une meilleure résistance à la traction (figure I.33). Ceci est attribué à une meilleure adhérence entre les fibres de lin et la matrice cimentaire [45].



**Figure I.33** Résistance à la flexion des mortiers fibrés avec des fibres de lins traitées [45]

Phung et al. ont réalisé une étude expérimentale dans le but d'évaluer l'influence des propriétés des matériaux sur le comportement mécanique et hygrothermique des composites terre-fibres végétales. Pour ce faire, différentes variétés de sols et de fibres végétales (paille de lin, paille de blé) ont été utilisées, et deux mélanges (A : paille de lin, B : paille de blé) ont été mis en œuvre. Les résultats obtenus indiquent que l'utilisation de paille de lin conduit à des performances mécaniques supérieures par rapport à celles obtenues avec de la paille de

blé. Toutefois, les auteurs ont noté que l'incorporation de fibres dans les sols entraîne une diminution des performances mécaniques en raison de la réduction de la densité du matériau. Par ailleurs, aucune influence claire de la longueur des fibres sur les performances mécaniques n'a été observée. L'étude du comportement hygrothermique a montré que le comportement d'absorption/désorption de l'humidité du matériau terre-fibres végétales pouvait être approximé à partir des résultats obtenus pour les matériaux de base. De plus, il a été démontré que l'évolution de la conductivité thermique du matériau terre-fibres végétales au cours du séchage était liée au comportement de retrait du matériau, comme illustré dans les Figures I.34. [46]



**Figure I.34** Conductivité thermique et retrait du mélange A (paille de lin) et B (paille de blé) en fonction de la teneur en eau [46]

## Conclusion

En Algérie, la majorité des constructions résidentielles reposent sur l'utilisation de ciment et de ses dérivés, notamment le béton. Cette préférence s'explique par la facilité de fabrication du béton, ses excellentes propriétés structurelles et sa durabilité reconnue. Cependant, le béton présente une masse volumique élevée, ce qui nécessite la mise en place de fondations substantielles pour supporter la charge des bâtiments. De plus, ses capacités d'isolation acoustique et thermique sont limitées, ce qui entraîne un inconfort thermique, en particulier en l'absence de climatisation [47].

Dans ce contexte, notre thèse vise à explorer des opportunités d'améliorer le confort thermique des habitations en utilisant des matériaux locaux, économiques et respectueux de l'environnement. Ces matériaux doivent également être adaptés aux conditions climatiques locales tout en offrant une isolation thermique efficace. Les matériaux légers sont de plus en plus pris en considération, notamment en remplaçant les granulats traditionnels par des granulats plus légers, qu'ils soient d'origine industrielle (argile expansée, schiste, perlite, vermiculite, laitier expansé) ou végétale (liège, sciure de bois, fibres de palmier dattier, de cocotier). Ces matériaux présentent des avantages écologiques, un poids réduit et le potentiel d'améliorer les performances mécaniques et thermiques des matériaux, et ils ont déjà fait l'objet de nombreuses études.

Il convient de souligner que ce domaine est en constante évolution, avec de nouvelles recherches apportant des avancées significatives et suscitant un intérêt croissant. Par conséquent, nous avons choisi de nous pencher sur le béton allégé à base de grignons d'olives, qui sont abondants dans de nombreuses régions algériennes telles que Skikda, Béjaïa, etc. Notre recherche se concentrera principalement sur la détermination des propriétés thermohydrauliques et mécaniques de ces bétons allégés avec des grignons d'olives. Nous étudierons également leur comportement en fonction de la teneur en eau et comparerons nos résultats avec des modèles théoriques et empiriques.

**Références**

- [1] Agence internationale de l'énergie <http://www.iea.org>
- [2] Consommation mondiale d'énergie primaire par zone géographique (d'après données du Key Word Energy Statistics) édition 2021.
- [3] Bilan énergétique national, 2022.
- [4] N. Benmansour, développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, (2015).
- [5] F. Benmahiddine, et al. Effect of flax shives content and size on the hygrothermal and mechanical properties of flax concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 262, 120077.
- [6] NF-EN12664. Performance Thermique des Matériaux et Produits Pour le Bâtiment.
- [7] Accréditation CEAEQ 602
- [8] M. Tanyildizi, et al. Utilization of pumice as aggregate in the concrete : Astate of art. *Construction and building Materials.* 2023. 131102.
- [9] F. Collet, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux ; thèse de doctorat, INSA Rennes (2004).
- [10] M. Maaroufi, Modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux construction- Indice de l'hystérésis, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2019.
- [11] S. Mounir, et al. Thermal properties of the composite material clay/granular cork, *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 183-190, (2014).
- [12] M. Renaud, E. Mauret Power-law fluid flow over a sphere : average shear rate and drag coefficient. *Journal of fluid mechanics* 2004, pp.1066-1070
- [13] Y. Jannot, Transferts thermiques. Cours Ecole des Mines <http://www.thermique55.com/>, (2000).
- [14] D. Bruggeman, *ann. Physic* 24, 1935, 636-664.
- [15] Y. Jannot, Transferts thermiques. Cours Ecole des Mines <http://www.thermique55.com/>, (2000).
- [16] H. Bal, Y. Jannot, Water content dependence of the porosity, density and thermal capacity of laterite based bricks with millet waste additive. *Constr Build Mater;* vol.31:pp.144-150, (2012).

- [17] M. Fehri, Comportements mécanique et hydrique des composites renforcés par des fibres naturelles et/ou conventionnelles, Thèse de Doctorat. Université de Normandie. Université de Sfax (Tunisie). (2018).
- [18] A. Degiovanni, M. Laurent, Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash. *Revue de Phys. Appli.*, vol.21, pp. 229-237, (1986).
- [19] Y. Jannot, B. Rémy, A. Degiovanni, Measurement of thermal conductivity and thermal resistance with a Tiny Hot Plate. *High Temperatures High Pressures*; vol.39, pp. 11-31, (2009).
- [20] S. Azzizi, Conductivité thermique des matériaux poreux humides : mesure par la méthode Flash et interprétation. Thèse. Institut National Polytechnique de Lorraine; (1988).
- [21] S. Azzizi, Conductivité thermique des matériaux poreux humides : mesure par la méthode Flash et interprétation. Thèse. Institut National Polytechnique de Lorraine; (1988).
- [22] S.E. Gustafsson, Transient plane source technics for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements for of solids materials, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, n°3, pp. 797-804, (1990).
- [23] W.J. Parker, R.J. Jenkins, Flash method of determining thermal diffusivity, *J. Appl. Phys.*, vol. 32, n°9. (1961).
- [24] Y. Jannot, Z. Acem, A quadripolar complete model of the hot disk, *Meas. Sc. Technol.* Vol. 17, pp. 1229-1234, (2007).
- [25] Y. Jannot, P. Meukam, Simplified estimation method for determining the thermal effusivity and the thermal conductivity using a low cost hot strip, *Meas. Sci. Technol.* 15 pp.1932- 1938, (2004).
- [26] Y. Jannot, B. Rémy, A. Degiovanni, Measurement of thermal conductivity and thermal resistance with a Tiny Hot Plate. *High Temperatures High Pressures*; vol.39, pp. 11-31, (2009).
- [27] Y. Jannot, Théorie et pratique de la métrologie thermique. (LEMETA), France, (2011).
- [28] Y. Jannot, V. Felix, A. Degiovanni, H. Bal, A centred hot plate method for measurement of thermal properties of thin insulating materials. *Measurement Science and technology*; vol.21, (3), (2010).
- [29] A. Majid, et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Const. Build. Mater.* 30 (2012) 814-825.

- [30] B. Agoudjil, et al. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterisation of date palm wood. *Energ. Build.* 43 (2011) 491-497.
- [31] H.S. Carslaw, *Conduction of heat in solids*, Oxford at the Clarendon press, 2<sup>ème</sup> edition, 1959.
- [32] Rahim, M.; Douzane, O.; Le, A.T.; Langlet, T. Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Constr. Build. Mater.* 2016, 111, 119–127.
- [33] A. Bouguerra, A. Ait-Mokhtar, Measurement of thermal conductivity, thermal and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *Int Comm Heat Mass. Transf.* vol. 28 n° 8, pp.1065-1078, (2001).
- [34] J. Khedari, P.Watsanasathaporn, J. Hirunlabh, Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity. *Cem Concr Compos*; vol. 27 n° 1, pp.11-16, (2005).
- [35] A. Kriker, A. Bali, Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cem Concr Compos*; vol.30, pp. 639-648, (2008).
- [36] H. Bal, Y. Jannot, Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium: laterite based bricks with millet waste additive. *Constr Build Mater*; vol.41 pp.586-593, (2013).
- [37] A. Cherki, B. Remy, Experimental thermal properties characterization of insulating cork- gypsum composite. *Constr Build Mater* 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.076>.
- [38] P. Meukam, Y. Jannot, A. Noumowe, T.C. Koffane, Thermo physical characteristics of economical building materials. *Construction and Building Materials* Vol. 18 pp. 437-443, (2004).
- [39] D. Taoukil, A. Bouardi. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood concrete composite. *Constr Build Mater*; vol.48 pp.104-115.(2013).
- [40] FAO - Nouvelles: 2009, Année internationale des fibres naturelles, (n.d.). <https://www.fao.org/news/story/fr/item/9805/icode/> (accessed October 27, 2021).
- [41] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker, "Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 59, pp. 161-168, 2014.
- [42] D. Taoukil, A. E. bouardi, T. Ajzoul, H. Ezbakhe, Effect of the Incorporation of

- Wood Wool on Thermo Physical Proprieties of Sand Mortars, KSCE, *Journal of Civil Engineering*, vol. 16, pp. 1003-1010,( 2012).
- [43] M. Chikhi, B. Agoudjil, M. Haddadi, A. Boudenne, Numerical modelling of the effective thermal conductivity of heterogeneous materials, *Journal of Thermoplastic Composite materials*,( 2011).
- [44] Al-Mohamadawi, A.; Benhabib, K.; Dheilily, R.-M.; Goullieux, A. Hygric Behavior of a Byproduct of the Linen Industry. Waste Cement Composites Elaborated with Flax Shives, *Biomass Valorization* 2019, 11, 5053–5066.
- [45] S. Chafai, F. Khadraoui, M. Boutouil, M.Gomina,Effect of flax fibers treatment on rheological and the mechanical behavior of a cement composite,*Construction and Building Materials*.79,2015, pp. 229–235
- [46] Page, J.; Sonebi, M.; Amziane, S. Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material *Constr. Build. Mater.* 2017, 139, 502–512.
- [47] Y. Zouaoui, Comportements rhéologique et hygrothermique des composites renforcés avec des fibres végétales. Thèse de doctorat, génie civil, Université de Sherbrooke. (2022).

## CHAPITRE II

### Matériaux étudiés et techniques de mesure

## **II. Introduction**

Le secteur de la construction joue un rôle majeur dans l'économie mondiale, représentant environ 28% de l'industrie et 7% de l'économie globale. Afin de promouvoir une industrie de la construction plus durable, il est nécessaire de réduire la consommation de matières premières de 30% et la production de déchets de 40%. Pour atteindre cet objectif, une grande variété de matériaux est utilisée, allant des matériaux traditionnels tels que la pierre, le bois, la terre et le sable, aux nouveaux matériaux innovants tels que le béton en fibre de lin, les fibres de carbone, les nanomatériaux et les fibres végétales. L'utilisation de ces nouveaux matériaux, qui offrent des alternatives écologiques et durables pour renforcer les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction, est de plus en plus répandue dans le secteur de la construction. Afin de mieux comprendre ces matériaux et leurs composants, des techniques de mesure des propriétés thermophysiques des bétons à base de fibres végétales seront également présentées dans ce chapitre

### **II.1 Bétons allégés par les fibres végétales**

Le béton, un matériau de construction largement répandu dans l'industrie du bâtiment et est apprécié pour sa polyvalence, sa résistance, et sa capacité à être façonné dans diverses formes. Toutefois, il présente des inconvénients tels que son poids élevé, qui nécessite des fondations solides, et sa propension à se fissurer ou à se dégrader avec le temps en raison de contraintes, d'exposition aux intempéries, ou d'autres facteurs [1].

Pour remédier à ces problèmes, des variantes spéciales de béton ont été développées, telles que le béton de fibres végétales, dans lequel des fibres végétales sont incorporées pour renforcer la structure et améliorer ses propriétés. Cependant, le comportement de ce matériau composite, composé de deux matériaux non homogènes, est différent de celui du béton traditionnel, ce qui nécessite le développement de nouvelles méthodes d'essais.

Les caractéristiques du béton de fibres sont influencées par divers facteurs, notamment la composition du béton de base, la quantité et les dimensions des fibres, etc. Par conséquent, il est essentiel de détailler les méthodes d'essai entreprises pour obtenir des résultats exploitables et pour les comparer éventuellement à d'autres essais déjà réalisés.

Il est important de noter que, bien qu'il existe actuellement plusieurs normes pour caractériser le béton traditionnel et quelques-unes pour les bétons de fibres d'acier, il n'y a pratiquement aucune norme relative à la caractérisation des bétons de fibres végétales, malgré de nombreuses recherches dans ce domaine [2]. Par conséquent, il est nécessaire de réfléchir à l'élaboration d'une

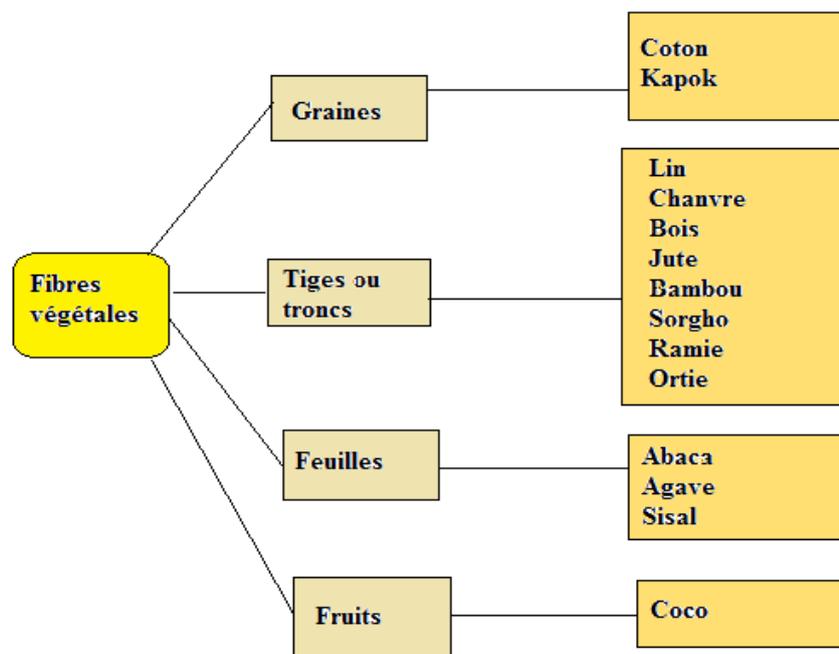
norme spécifique pour les bétons de fibres végétales afin de standardiser les essais et de faciliter la comparaison des résultats entre chercheurs dans ce domaine.

### **II.1.1 Les fibres végétales**

L'utilisation de fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à des temps anciens, où l'on renforçait des briques avec de la paille ou des roseaux. Dans les années 1970, le plâtre a été le premier matériau composite associé à des fibres végétales, conduisant à la création de plusieurs ouvrages renforcés au plâtre et à ces fibres [3,4]. Aujourd'hui, le domaine de l'allègement du ciment et du béton avec des fibres naturelles connaît des développements récents à l'échelle mondiale [5, 6].

Les fibres d'origine naturelle utilisées dans les composites sont obtenues par des procédés physiques et mécaniques qui ne modifient pas leur composition d'origine. Ces fibres naturelles sont classées en fonction de leur source [7, 8]:

- Les fibres minérales (silicatées),
- Les fibres animales (poils, de la laine et de sécrétions telles que la soie...).
- Les fibres végétales (cellulosiques) obtenues à partir de graines (comme le coton, le kapok, les grignons d'olive), de fibres dures extraites de feuilles (comme le sisal et l'abaca), de fibres extraites de tiges de plantes (telles que le lin, le chanvre, le jute, la ramie, le bambou), de troncs (comme le chanvre de Manille et le palmier), et d'enveloppes de fruits (comme la noix de coco), comme illustré dans la figure II-1[9].



**Figure II-1** Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines

Parmi les fibres végétales les plus abondantes en Algérie, notamment en tant que sous-produits de l'industrie, se trouvent les grignons d'olives issus de la production d'huile d'olive [10].

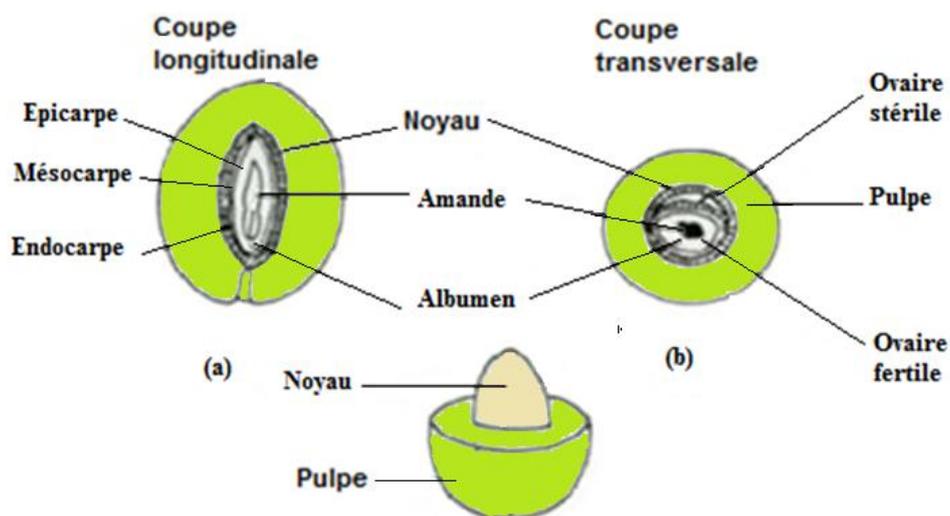
#### II.1.1.1 La production oléicole

La production d'huile d'olive revêt une importance cruciale pour le développement socio-économique de la plupart des nations méditerranéennes, qui représentent 97,5% de la production mondiale d'huile d'olive. L'Algérie, comme ces pays, dispose d'une diversité considérable de variétés d'oliviers qui caractérisent sa région, générant une production annuelle d'environ 50 000 tonnes, avec environ 1532 huileries en activité. En 2019, les exportations algériennes d'huile d'olive vierge et extra vierge ont atteint 178 000 dollars, enregistrant une augmentation spectaculaire de 1000% depuis l'an 2000. Le pays a également pris des mesures visant à promouvoir et à développer davantage son secteur oléicole, déjà en croissance significative, avec une augmentation de la superficie consacrée à l'olivier, passant de 165 000 hectares en 2000 à 500 000 hectares en 2018 [11].

#### II.1.1.2 Caractéristiques du fruit de l'olivier

Les propriétés du fruit de l'olivier peuvent présenter des variations en fonction de la variété cultivée, des conditions climatiques, des méthodes de culture et du degré de maturité, ce qui

contribue à la diversité des olives utilisées tant pour la production d'huile d'olive que pour les olives de table. Le fruit se présente sous la forme d'une drupe ovoïde ou ellipsoïde, composée d'un épicarpe, d'un mésocarpe et d'un endocarpe, comme illustré dans la figure II.2.



**Figure II.2** Composition physique de l'olive [12]

- L'épicarpe désigne la peau de l'olive. Elle est revêtue d'une substance cireuse appelée cuticule, qui possède une imperméabilité à l'eau.
- Le mésocarpe est composé de cellules qui stockent la graisse, qui est finalement extraite sous forme d'huile d'olive.
- L'endocarpe représente le noyau de l'olive et se compose de deux types de cellules distincts :
  - L'enveloppe qui se referme durant la période estivale, généralement à partir de la fin juillet.
  - L'amande située à l'intérieur du noyau.

### II.1.1.3 Déchets oléicoles

En plus de la production d'huile, l'industrie oléicole engendre des résidus qui peuvent entraîner des problèmes environnementaux. Ces résidus se déclinent en deux catégories : d'une part, il y a les margines, qui sont des rejets liquides, et d'autre part, les grignons d'olives, qui sont des déchets solides issus de la pulpe de l'olive, et qui ne subissent aucun traitement préalable. L'élimination durable de ces deux types de résidus s'avère complexe, et la législation en Algérie interdit leur mise en décharge. Ces deux déchets sont préjudiciables à l'environnement en raison de leur forte teneur en matière organique, et ils nécessitent donc un

traitement, souvent sous forme de valorisation. Il est à noter qu'en moyenne, le broyage de 100 kg d'olives produit environ 35 kg de grignons et 100 litres de margines [13].

Malgré l'existence de diverses méthodes de valorisation, ces déchets oléicoles sont souvent brûlés ou rejetés dans l'environnement, ce qui peut entraîner la contamination des sols, des nappes phréatiques et des cours d'eau [14].

#### **II.1.1.3.1 Déchets liquides (marges)**

Ces déchets posent un problème significatif de contamination dans les pays producteurs d'huile d'olive. Cette contamination est liée à la fois à l'industrie et à l'environnement, car approximativement, chaque habitant produit environ 54 g de Demande Biochimique en Oxygène (DBO) par jour. Pour donner une idée de l'ampleur du problème, un mètre cube de marge équivaut à la pollution générée par 1200 habitants. Chaque année, entre 25 et 40 millions de mètres cubes de marges sont produits, dont 90% sont localisés dans la région méditerranéenne et sont déversés dans l'environnement sans prétraitement.

#### **II.1.1.3.2 Déchets solides (grignons d'olive)**

Le grignon d'olive, un sous-produit solide de couleur brune, se forme suite au processus d'extraction de l'huile d'olive, qui implique le pressage mécanique des fruits d'oliviers. Il est constitué de la peau de l'olive, de résidus de la pulpe de l'olive, ainsi que de fragments du noyau réduits en morceaux. La teneur en matières grasses et la quantité d'eau présente dans les grignons varient en fonction de la variété des olives utilisées et surtout de la méthode d'extraction employée [15]. Les grignons d'olive se caractérisent par une forte teneur en lignine et une faible teneur en composants cellulaires.

#### **A - Différents types de grignons d'olive**

Les grignons d'olive sont produits en quantités considérables dans de nombreuses régions méditerranéennes, dont l'Algérie. En fonction de la méthode d'extraction, on peut distinguer trois principaux types de grignons [16]:

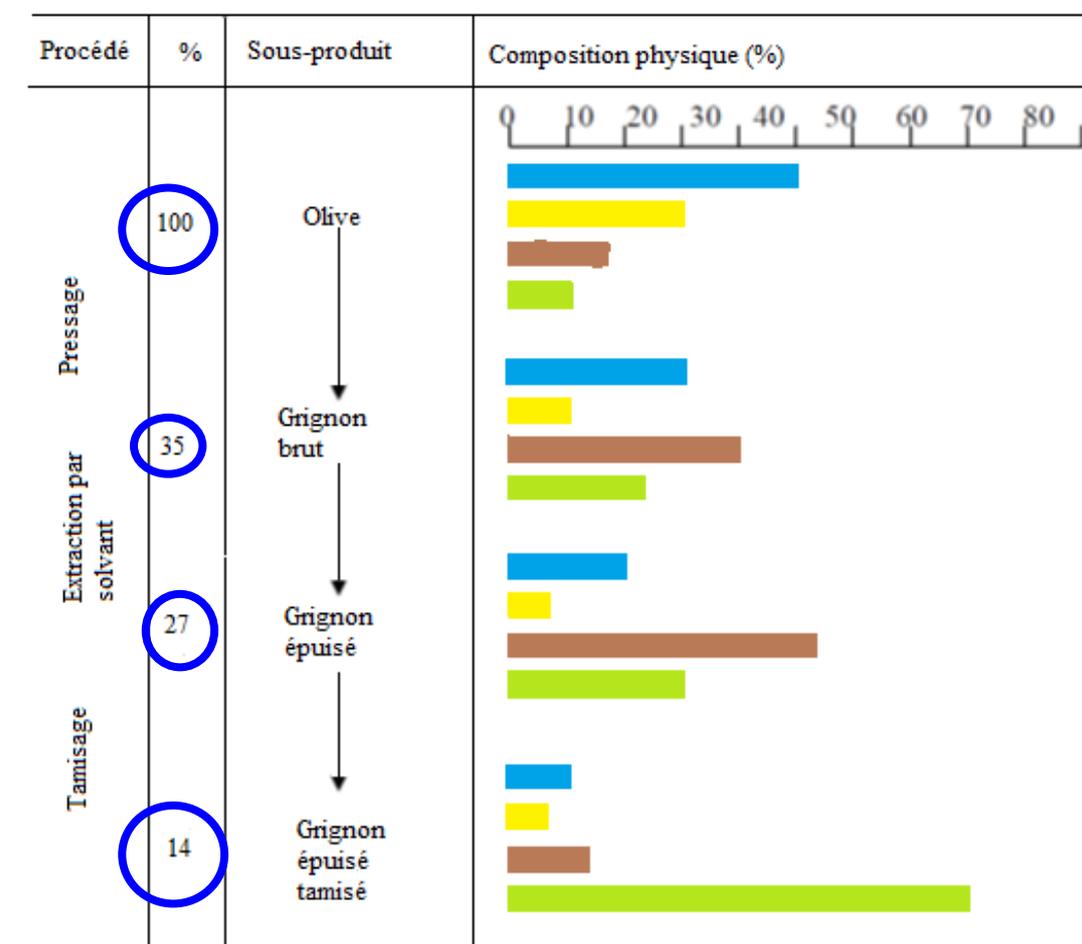
Le grignon d'olive brut : Il provient des huileries utilisant le système traditionnel de presses hydrauliques. Il présente des taux relativement élevés d'humidité (24%) et d'huile (9%), ce qui le rend susceptible de se dégrader rapidement à l'air libre.

Le grignon d'olive épuisé : Il s'agit du résidu obtenu après l'extraction de l'huile du grignon brut à l'aide d'un solvant chimique, généralement de l'hexane.

Le grignon d'olive partiellement dénoyauté ou tamisé : Ce type de grignon résulte de la séparation partielle des débris de noyau de la pulpe par tamisage ou ventilation.

### B - Caractéristiques physiques du grignon d'olive

La composition physique des grignons dépend étroitement de la variété des olives, de leur degré de maturité, et du système utilisé lors de l'extraction de l'huile. Les grignons d'olives bruts, issus des huileries fonctionnant en système de "presse" ou "super-presse," sont principalement composés de débris de noyaux, de pulpe (mésocarpe + épicarpe), d'huile et d'amandon, représentant environ 56% de la matière sèche. En moyenne, les grignons bruts représentent environ 33% du poids initial de l'olive, avec une teneur en humidité de 25 à 30% (voir figure II-3). La densité apparente des grignons d'olive varie généralement entre 0.3 et 0.6 g/cm<sup>3</sup>. Après l'épuisement des grignons d'olives bruts à l'aide d'un solvant, les grignons épuisés sont composés principalement de 55% de coques, de 2 à 4% d'huile et de 15% d'eau.



**Figure II.3** Les différents sous-produits issus du pressage des olives et leurs caractéristiques physiques [17]



### C- Caractéristiques chimiques du grignon d'olive

En général, les grignons d'olive sont caractérisés par leur teneur relativement élevée en cellulose brute et en matières grasses, tandis qu'ils présentent une faible teneur en matières azotées (voir tableau II.1). Cependant, le processus d'épuisement par les solvants entraîne une réduction de la teneur en matières grasses des grignons, tandis que le dénoyautage partiel a pour effet de réduire les niveaux de cellulose brute.

**Tableau II.1** Composition chimique indicative des différents types de grignons en pourcentage de la matière sèche [18]

Type de grignon	Matières sèches (%)	Matièresminérales (%)	Matière azotées totales (%)	Cellulose brute (%)	Matières grasses (%)
Grignon brut	75-80	3-5	5-10	35-50	8-15
Grignon gras partiellement dénoyauté	80-95	6-7	9-12	20-30	15-30
Grignon épuisé	85-90	7-10	8-10	35-40	4-6
Grignon épuisé partiellement dénoyauté	85-90	6-8	9-14	15-35	4-6

#### -Cellulose brute

Le taux de cellulose brute est élevé pour les grignons non dénoyautés. Le dénoyautage partiel réduit principalement la cellulose et très peu la lignine.

#### - Matières azotées totales

Le pourcentage en matières azotées varie selon le type de grignon d'olive mais reste modeste. L'azote protidique constitue plus de 95% de l'azote total et sa solubilité est particulièrement faible (3%).

#### - Lipides

Pour le grignon brut, la teneur en matière grasse qui représente 8 à 15% de la matière sèche peut constituer un apport d'énergie important. Dans le cas des grignons épuisés, cet apport est limité.

#### **- Matières minérales (cendres)**

La teneur en matière minérale est faible. L'excédent est dû à la contamination au contact du sol (3 à 5%). Les différentes teneurs en composants minéraux des cendres sont indiquées dans le tableau II.2 [19].

**Tableau II.2.** Les composants minéraux des cendres ainsi que leurs teneurs respectives (%)

<b>Eléments</b>	KO	NaO	MgO	CaO	Fe	PO	SO	Cu	Zn	Mn
<b>Teneurs(%)</b>	12.40	0.40	1.20	8.50	1.90	2.70	1.30	0.44	0.33	1.08

#### **E-Valorisation des grignons d'olive**

Les grignons d'olive sont considérés comme une ressource renouvelable, parmi les possibilités de valorisation des grignons, on peut citer :

- L'extraction d'huile à partir des grignons par solvant.
- L'utilisation en tant que combustible, avec une valeur calorifique moyenne de 2950 kcal/kg, principalement apportée par la coque.
- L'utilisation en tant que charbon actif pour l'absorption des phénols et des métaux lourds.
- L'utilisation en tant que matériau d'isolation dans la construction, sous forme de panneaux ou de granulés, ce qui peut contribuer à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments [20].

#### **II.1.2.Constituants du béton**

Le ciment, les granulats, l'eau et les adjuvants sont les principaux composants du béton.

##### **II.1.2.1.Ciment**

Il s'agit d'un liant hydraulique qui acquiert sa solidité sous l'influence de l'eau. Il est couramment employé dans la préparation de béton, de dalles, de parpaings, d'enduits et de mortiers. La composition de base des ciments modernes est principalement constituée de silicates et d'aluminates de calcium, résultant de la réaction entre la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et le fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Les ciments Portland sont obtenus par le broyage de clinker et de sulfate de calcium. Ils sont regroupés en cinq grandes catégories conformément à la norme européenne EN 197-1 : CEMI pour le ciment Portland pur, CEM II pour le ciment Portland composé, CEM III pour le ciment de haut fourneau, CEM IV pour le ciment au laitier, et CEM V pour le ciment pouzzolanique.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé le ciment Portland composé, CPJ CEM II/A 32.5, provenant de la cimenterie de Hama Bouziane en Algérie. Ce ciment est constitué principalement d'oxydes minéraux, en particulier la chaux (CaO) et la silice (SiO<sub>2</sub>) [21].

#### II.1.2.1.1 Composition et caractéristiques du ciment

Le ciment est essentiellement constitué de clinker, de sulfate de calcium, et éventuellement d'autres additifs.

#### II.1.2.1.2. Composition chimique du ciment

L'analyse chimique du ciment CPJ-CEM II/A32.5 a été fournie par la cimenterie de Hama Bouziane et les résultats obtenus selon la norme NF EN 196-2, sont présentés dans le tableau II.3.

**Tableau II.3.** Composition chimique du ciment Portland de Hama Bouziane (en % massique)

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PF	Total
CPJ-CEM II/A 32.5	21.9	5.73	3.13	1.85	60.18	0.19	0.83	4.07	97.84

#### II.1.2.1.3 Le clinker

Le clinker, constituant essentiel des ciments, est obtenu à partir d'un mélange finement broyé de calcaire et d'argile, mélangés dans des proportions précises, puis chauffés à une température d'environ 1450°C dans un four. Au cours du processus de calcination, les matières premières réagissent pour finalement former un produit complexe appelé clinker.

#### II.1.2.1.4 Propriétés physiques et mécaniques des ciments

Les principales propriétés physiques du ciment (résistance, vitesse de prise, durcissement, finesse et composition), utilisé dans notre travail, sont rassemblées dans le tableau II.4.

**Tableau II.4** Les principales propriétés physiques du ciment utilisé

Propriétés	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Début de prise (min)	Rc Minimale à 28 jours (MPa)	Rc Moyenne à 28 jours (MPa)
CPJ-CEM II/A 32.5	3.1	3859	175	32.5	43

### II.1.2.1.5 Composition minéralogique du ciment

La composition minéralogique (selon les équations de Boguer), du ciment utilisé est indiquée dans le tableau II.5.

**Tableau II.5** Composition minéralogique du ciment

Eléments	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Teneurs (%)	64.12	13.95	02.63	15.50

### II.1.2.2 Les Granulats et l'eau de gâchage

#### II.1.2.2.1 Les Granulats

Les granulats représentent un ensemble de particules minérales, désignées sous diverses appellations telles que fillers, sablons, sables, gravés et gravillons, en fonction de leurs dimensions qui se situent généralement dans la plage de 0 à 125 mm. Les dimensions et les caractéristiques spécifiques de chaque catégorie de granulats sont répertoriées dans le tableau II.6.

**Tableau II.6** Dimensions et caractéristiques des familles de granulats

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D < 2mm avec au moins 70% de passant à 0.063mm
Sablons	0/D	D ≤ 1 mm avec au moins de 70% de passant à 0.63mm
Sables	0/D	1mm < D ≤ 6.3mm
Graviers	0/D	D > 6.3mm
Gravions	d/D	d ≥ 1mm et D ≤ 125mm
Ballasts	d/D	D ≥ 25mm et D ≤ 50mm

Les granulats sont désignés par leur classe granulaire d/D, d et D représentent respectivement la plus, petite et la plus grande, dimensions du produit.

Le choix des granulats s'est porté sur les matériaux locaux disponibles. Leurs propriétés sont indiquées sur le tableau II-7.

**Tableau II.7** Propriétés des granulats utilisés

Propriétés	Types de granulats	
	Sable	Gravier
Nature	Naturel	Concassé
Provenance	Bounouara Constantine	Bounouara Constantine
Classe	0/5	5/8 ; 8/15
D <sub>max</sub>	5	15
M <sub>f</sub>	2.70	-
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1605	1600

D'après les résultats du module de finesse ( $M_f$ ), le sable utilisé est classé parmi les sables gros à granulométrie étalée et s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires, du fait que leur  $M_f$  est supérieur à 2.5 [22].

#### II.1.2.2.2 Eau de gâchage

L'eau de gâchage représente la quantité totale d'eau ajoutée au mélange sec de béton. La quantité d'eau de gâchage requise dépend de la nature des granulats utilisés ainsi que de la consistance souhaitée du mélange. Il est essentiel que cette eau soit propre et potable. Il est également possible de substituer partiellement ou complètement cette eau de gâchage par l'ajout d'adjuvants tels que des plastifiants, des super plastifiants, ce qui permet d'optimiser les propriétés du béton.

#### II.1.2.2.3 Adjuvants

Les adjuvants sont des substances, qu'elles soient liquides ou sous forme de poudre, qui sont incorporées en faible quantité dans le béton, généralement moins de 5%, dans le but d'améliorer certaines de ses propriétés, telles que la maniabilité et l'imperméabilité, ainsi que des caractéristiques comme la compacité et la résistance au gel. Les adjuvants sont systématiquement mélangés avec le béton frais.

## **II.2 Méthodes de mesure des propriétés thermo physique du béton allégé**

La création de nouveaux matériaux d'isolation thermique repose principalement sur la détermination de la conductivité thermique en régime permanent de ces matériaux. Cependant, la connaissance de la conductivité thermique à elle seule ne suffit pas. En réalité, pour étudier le comportement thermique dynamique d'un matériau, il est nécessaire de déterminer sa diffusivité thermique. Ce processus implique l'utilisation de diverses techniques et méthodes de mesure des propriétés thermiques, essentielles notamment dans le domaine de l'isolation thermique.

Il existe plusieurs méthodes et techniques pour mesurer la conductivité thermique et la diffusivité thermique, qui peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes en régime permanent et celles en régime variable.

### **II.2.1 Les méthodes de mesure en régime permanent**

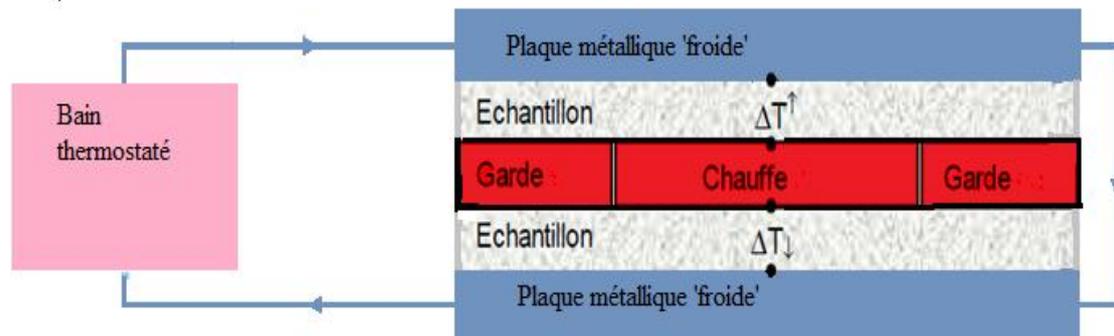
Ces techniques de mesure sont employées dans le but de calculer la conductivité thermique des matériaux. Elles se fondent sur le principe selon lequel, lorsque la chaleur est continuellement appliquée à un matériau, un équilibre thermique finit par se stabiliser, ce qui signifie que la température à travers le matériau cesse de varier avec le temps. Les méthodes habituellement utilisées pour évaluer la conductivité thermique en régime permanent comprennent :

#### **II.2.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée**

Cette méthode implique de placer l'échantillon de matériau entre une source de chaleur et un dissipateur thermique. La source de chaleur maintient une température constante, tandis que le dissipateur thermique maintient une température constante plus basse. Pour déterminer la conductivité thermique du matériau, on mesure la différence de température à travers l'échantillon et on applique la loi de Fourier.

Plus spécifiquement, cette méthode repose sur le maintien d'une différence de température  $\Delta T$  entre deux surfaces planes et parallèles entre lesquelles l'échantillon est positionné. Pour cela, une des surfaces de l'échantillon est en contact avec une plaque chauffante, tandis que l'autre est en contact avec une plaque refroidie par un fluide provenant d'un bain thermostaté. Cette configuration crée une zone de mesure (au centre de l'échantillon) et une zone de garde. Grâce à cette zone de garde, les lignes de flux de chaleur dans la zone de mesure sont perpendiculaires aux faces en contact avec les échangeurs, où circule un fluide maintenu à température constante. Des fluxmètres et des thermocouples sont utilisés pour mesurer le flux de chaleur et la différence de température  $\Delta T$  de chaque côté de l'échantillon (voir figure II.4).

L'objectif est de mesurer la conductivité thermique de chaque échantillon en recréant les conditions de transfert de chaleur unidimensionnel entre deux plans parallèles et isothermes.



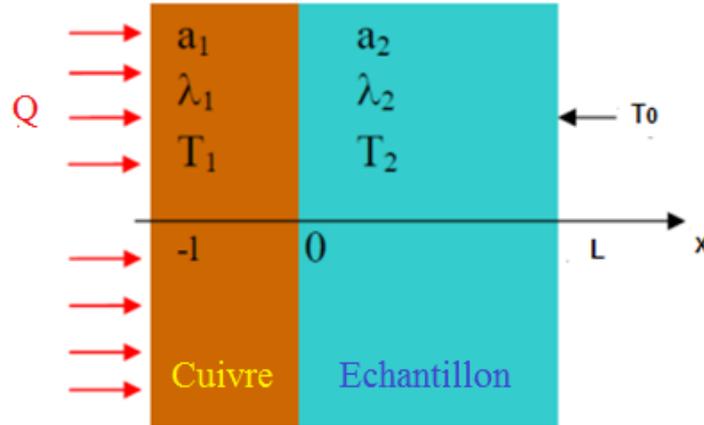
**Figure II.4** Mesure de la conductivité par la méthode de la plaque chaude gardée

S'il n'y a pas de pertes latérales par convection, on obtient un transfert de chaleur unidirectionnel à travers l'échantillon, figure II.4.

Après l'établissement du régime permanent, la conductivité thermique est donnée par la relation :

$$\lambda = \frac{q e}{2 S \Delta T} \quad (2.1)$$

Pour la diffusivité thermique, on suppose que le transfert de chaleur est unidirectionnel et que la plaque de cuivre et l'échantillon sont homogènes (figure. II-5).



**Figure II-5** Modèle simplifié de la méthode de la plaque chaude gardée.

Pour déterminer les paramètres  $a_1$  et  $a_2$ , on suit l'évolution de la température de la face chaude de l'échantillon dont l'expression théorique est:

$$T(0, t) = T_{\infty} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-a_1 k_n^2 t} \quad ; \quad \text{avec : } B_n = N/D \quad (2.2)$$

$$N = \rho_1 c_1 \left[ \frac{Q}{\lambda_1 k^2} \left( 1 - \frac{1}{\cos(kL)} \right) - \frac{QL}{\lambda_2 k} \operatorname{tg}(kL) \right] + \rho_2 c_2 \left[ \frac{Q}{\lambda_2} \left( \frac{L}{k'} \operatorname{cotg}(k'L) - \frac{1}{k^2} \right) \right]$$

$$D = \frac{\rho_1 c_1}{2} \left[ \left( \frac{1}{\cos^2(kL)} \right) - \frac{\operatorname{tg}(kL)}{k} \right] + \frac{\rho_2 c_2}{2} \left[ \frac{1}{\sin^2(k'L)} - \frac{\operatorname{cotg}(k'L)}{k'} \right]$$

Avec :

$$k = k_n \text{ et } k' = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} k_n T_{\infty} = \frac{QL}{s \lambda_2}$$

Les  $kn$  étant les solutions de l'équation transcendante suivante :

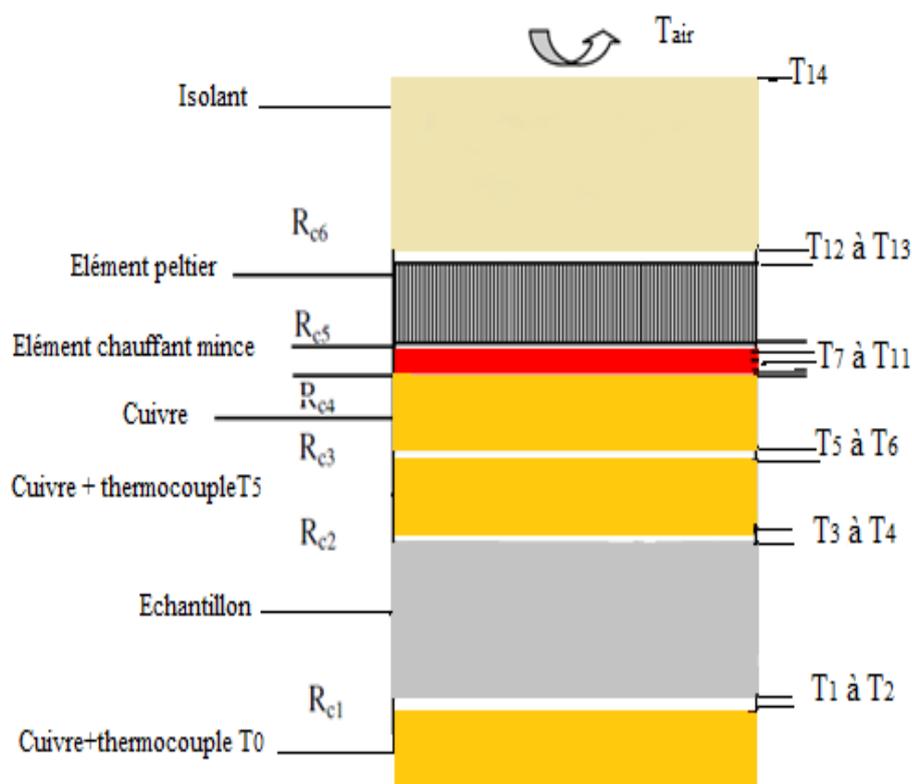
$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \operatorname{tg}(kL) \cdot \operatorname{tg} \left( \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} kL \right) = 1 \quad (2.3)$$

En introduisant l'écart entre la température expérimentale  $T_{\text{exp}}(0,t)$  et la Température théorique  $T_{\text{th}}(0,t) = f(a_1, \lambda_1, L, a_2, \lambda_2)$  aux différents instants par des méthodes numériques des moindres carrées, on aboutit à la détermination des caractéristiques  $a_1$  et  $a_2$ .

L'inconvénient de cette méthode apparaît dans les temps d'expérimentation qui sont très longs (48 heures par échantillon) et un montage qui techniquement est très délicat.

### II.2.1.2 Méthode de la mini-plaque chaude

La méthode de la mini-plaque chaude, représente une approche de mesure de la conductivité thermique en régime permanent. Elle est fréquemment employée pour analyser des échantillons de petites dimensions. Le fonctionnement de ce dispositif de mini-plaque chaude est illustré par la figure II.6.



**Figure II.6** Schéma du dispositif de la mini-plaque chaude

L'élément chauffant est une résistance plane insérée entre deux feuilles de Kapton, ses dimensions sont de  $(39 \times 39 \times 0,16) \text{ mm}^3$ , sa résistance électrique est  $R_e = 40,5 \Omega$ . Tous les autres éléments du dispositif sont de section carrée de côté  $a$ , égal à 40 mm.

Le principe de l'expérience est d'ajuster la tension  $V$  appliquée à l'élément chauffant de façon à obtenir  $T_5 = T_{\text{air}}$  ce qui permet de rendre négligeable les pertes latérales convectives dans les deux éléments en cuivre au-dessus de l'échantillon. Le flux  $\Phi_{\uparrow}$  dissipé sur la partie supérieure de l'élément chauffant est mesuré à l'aide de l'élément Peltier étalonné en fluxmètre. On en déduit la valeur du flux dissipé sur la partie inférieure :

$$\Phi_{9\downarrow} = \Phi_9 - \Phi_{9\uparrow} \quad (2.4)$$

$$\text{avec} \quad \Phi_9 = \frac{V^2}{R_a}$$

La température  $T_0$  est fixée par un élément à effet Peltier.

Ce dispositif mesure la résistance thermique située entre les points de température  $T_0$  et  $T_5$  soit :

$$R_{th} = 2 R_{thcu} + 2R_c + \frac{e}{\lambda S} \quad (2.5)$$

L'estimation de la conductivité thermique de l'échantillon ne sera possible qu'à condition que :

$$\frac{e}{\lambda S} > 2 R_{thcu} + 2R_c, \quad \text{et} \quad \text{pourra être écrite comme suit :}$$

$$\lambda = \frac{e\Phi_{9\downarrow}}{S(T_5 - T_0)} \quad (2.6)$$

Cette méthode simple dans sa mise en œuvre permet la mesure de la conductivité thermique des matériaux isolants (conductivité thermique allant de  $0.025$  à  $5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) ainsi que la résistance thermique de systèmes hétérogènes (de  $2.10^{-1}$  à  $10^{-3} \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ ). Elle est particulièrement intéressante pour les échantillons de faible épaisseur.

### II.2.1.3 Méthode des boîtes

La méthode des boîtes est une technique de mesure couramment utilisée pour déterminer la conductivité thermique en régime permanent et la diffusivité thermique en régime transitoire, notamment pour caractériser les matériaux de construction [23]. Le principe de mesure repose sur la création d'un flux de chaleur permanent et unidirectionnel à travers un échantillon placé dans une boîte, située entre une capacité thermique froide isotherme et une source de chaleur à flux constant, comme illustré dans la figure II.7. L'énergie émise est contrôlée à l'aide d'un rhéostat de manière à maintenir une différence de température ( $T_a - T_b$ ) entre la boîte et l'environnement ambiant (figure II.8), où  $T_b$  est la température de la boîte et  $T_a$  est la température ambiante. Cette différence de température doit demeurer inférieure à  $1^\circ\text{C}$ .

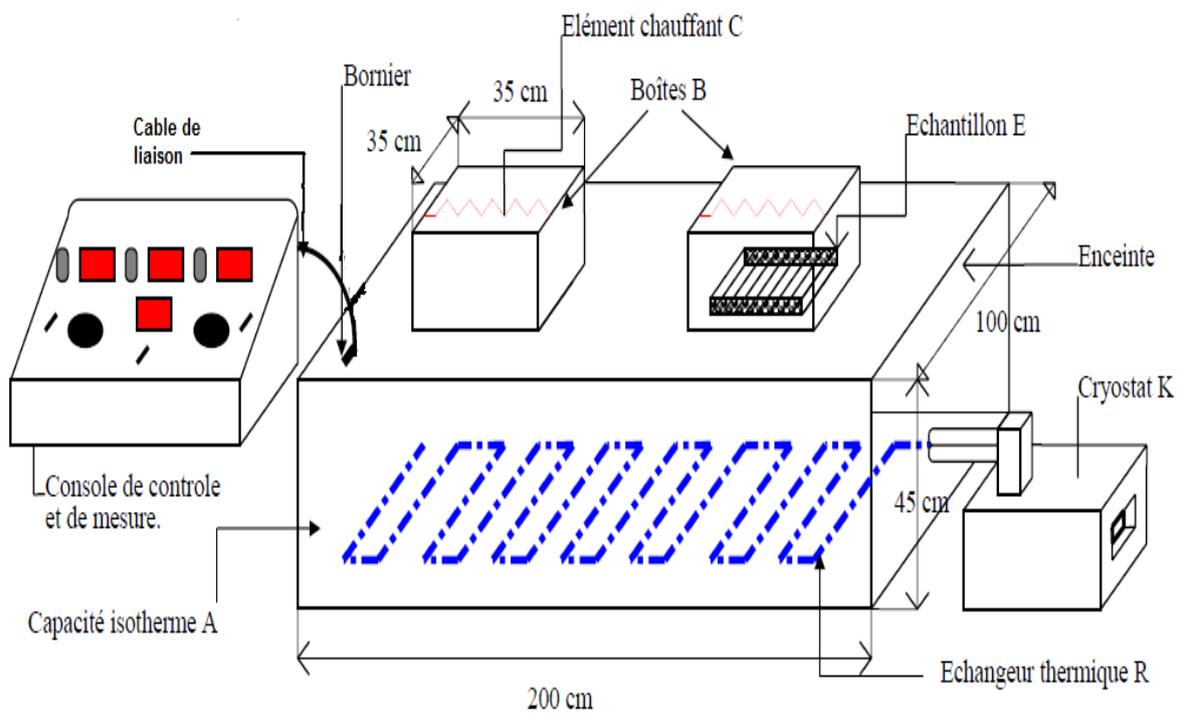
Le régime permanent est atteint en surveillant en permanence les variations de température  $T_b$  dans la boîte et  $T_a$  dans la salle. Il est essentiel que la différence de température ( $T_a - T_b$ ) demeure constante et inférieure à  $1^\circ\text{C}$  pendant au moins trente minutes environ pour obtenir des résultats fiables. Le bilan thermique de la boîte est calculé comme suit :

$$\frac{V^2}{R} = C(T_b - T_a) + \frac{\lambda S}{e} (T_c - T_f) \quad (2.7)$$

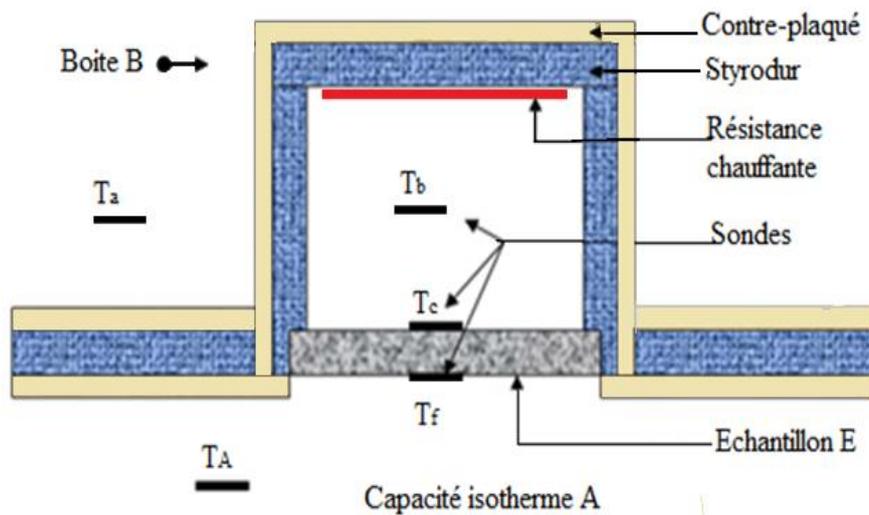
Avec  $\frac{V^2}{R}$  Puissance dissipée par effet joule de la résistance chauffante,  
 $C(T_b - T_a)$  Chaleur perdue à travers la boîte,  
 $\frac{\lambda S}{e} (T_c - T_f)$  Chaleur transférée par conduction à travers l'échantillon.

On déduit l'expression de la conductivité thermique  $\lambda_{exp}$ .

$$\lambda_{exp} = \frac{eV^2}{SR} \left[ \frac{1}{T_c - T_f} \right] - \frac{Ce}{S} \left[ \frac{T_b - T_a}{T_c - T_f} \right] \quad (2.8)$$



**Figure II.7** Vue générale de la cellule de mesure de la méthode des boîtes



**Figure II.8** Boîte de mesure de la conductivité et position des sondes

La méthode des boîtes présente plusieurs avantages et est relativement simple à mettre en œuvre, ce qui en fait une technique largement documentée [24]. Elle offre une précision comparable à celle des méthodes conventionnelles tout en permettant des mesures sur des échantillons de taille significative.

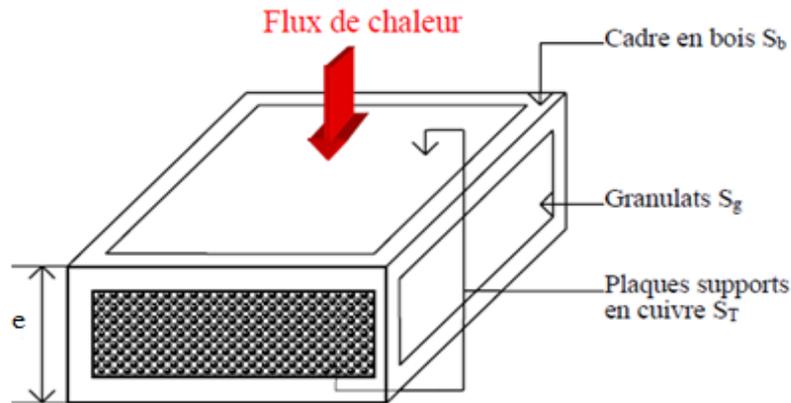
Cependant, il est essentiel de prendre en compte les pertes de chaleur latérales et de garantir un bon contact thermique entre les surfaces de l'échantillon et les parois de la boîte afin d'obtenir des mesures fiables. Il convient de noter que cette méthode est plus appropriée pour les matériaux homogènes qui ne sont pas de bons conducteurs thermiques ( $\lambda < 3 \text{ W/m.k}$ ).

#### II.2.1.3.2 Détermination de la conductivité thermique apparente

**A- Matériaux consolidés :** Partie traitée au (chapitre III)

#### **B- Matériaux granulaires**

Lors de la préparation de l'échantillon, les granulats du matériau sont disposés dans un cadre spécialement conçu, qui a la même forme parallélépipédique que le matériau consolidé. Ensuite, un processus de compactage est réalisé à l'aide de vibrations et de compression répétées, visant à réduire au maximum la porosité et à assurer un contact optimal entre les plaques de cuivre et les granulats (comme illustré dans la figure II.9).



**Figure II.9** Schéma d'un bloc échantillon pour les matériaux granulaires

En tenant compte que le flux de chaleur crée traverse simultanément les surfaces du cadre en bois et des granulats, une correction de la mesure de la conductivité thermique s'avère nécessaire :

$$\lambda_a = \left(\frac{S_T}{S_g}\right) \lambda_{mes} - \left(\frac{S_b}{S_g}\right) \lambda_b \quad (2.9)$$

$$\lambda_{mes} = \frac{e}{S_T \Delta T} \left( \frac{V^2}{R} + c \Delta T \right) \quad (2.10)$$

$$S_T = S_g + S_b \text{ (surface totale)}$$

### C- Mesure à haute température

Pour mesurer la conductivité thermique à des températures élevées, pouvant atteindre 500K, une configuration différente est utilisée, remplaçant la boîte chaude par deux boîtes de géométrie identique (comme illustré dans la figure II-10). Chacune de ces boîtes est équipée d'une résistance chauffante à sa base. Les faces extérieures de chaque boîte sont isolées avec de la laine de roche, ce qui assure une isolation thermique efficace, même à des températures relativement élevées [25].

Les résistances chauffantes sont alimentées en courant par un autotransformateur variable qui permet de régler la puissance de chauffe souhaitée dans chaque boîte. On applique une tension légèrement supérieure aux bornes de la résistance chauffante supérieure R1 par rapport à celle appliquée aux bornes de la résistance R2 ( $R1 \approx R2$ ), de manière à éliminer le transfert de chaleur convectif sur les faces de l'échantillon perpendiculaires au flux de chaleur. Le régime

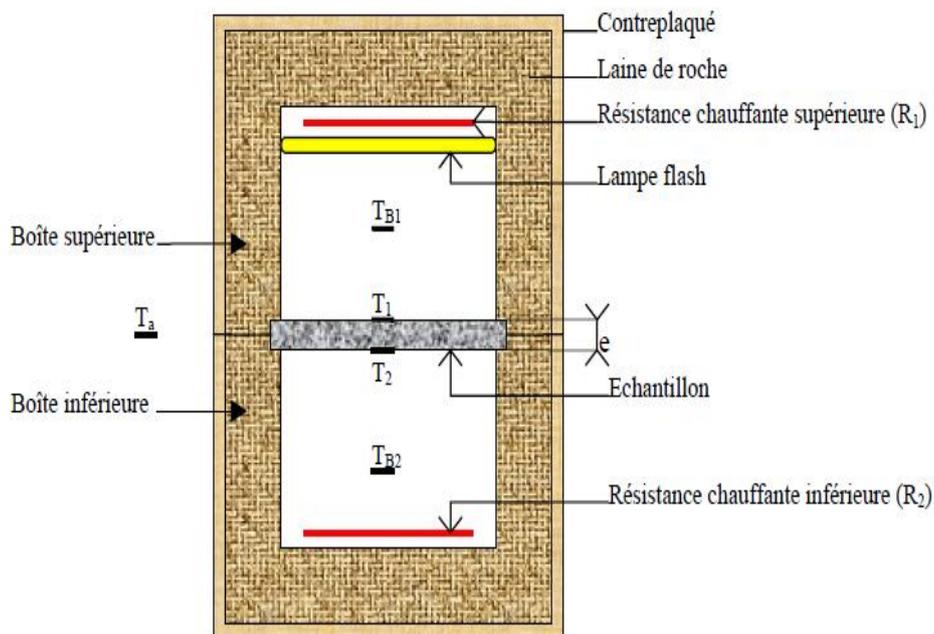
permanent est atteint lorsque la différence de température entre les deux ambiances chaudes ( $T_{B1} - T_{B2}$ ) est maintenue inférieure à  $10^\circ\text{C}$ .

À partir de l'expression de la conductivité thermique, telle qu'indiquée dans l'équation 2-7, la conductivité thermique en fonction de la température est déterminée en utilisant le bilan global.

$$\frac{V_1^2}{R_1} + \frac{V_2^2}{R_2} = C(T)((T_{B1} - T_a) + (T_{B2} - T_2)) \quad (2.11)$$

où  $C(T)$  est le coefficient de déperditions thermiques à travers les boîtes  $B_1$  et  $B_2$ .

$$C(T) = \frac{\frac{V_1^2}{R_1} + \frac{V_2^2}{R_2}}{T_{B1} + T_{B2} - 2T_a} \quad (2.12)$$



**Figure II.10** Coupe longitudinale du dispositif expérimental de la méthode des boîtes symétriques.

En utilisant la boîte  $B_1$ , la conductivité thermique apparente à température élevée est donnée par :

$$\lambda(T) = e \frac{\frac{V_1^2}{R_1} - c(T)(T_{B1} - T_a)}{S(T_1 - T_2)} \quad (2.13)$$

Ce dispositif peut être aussi utilisé pour la mesure de la diffusivité thermique à température élevée en plaçant, à la base de la boîte B<sub>1</sub>, une lampe de tungstène de forte puissance.

## II.2.2 Méthodes de mesure en régime transitoire

Parmi les plus usuelles nous pouvons citer :

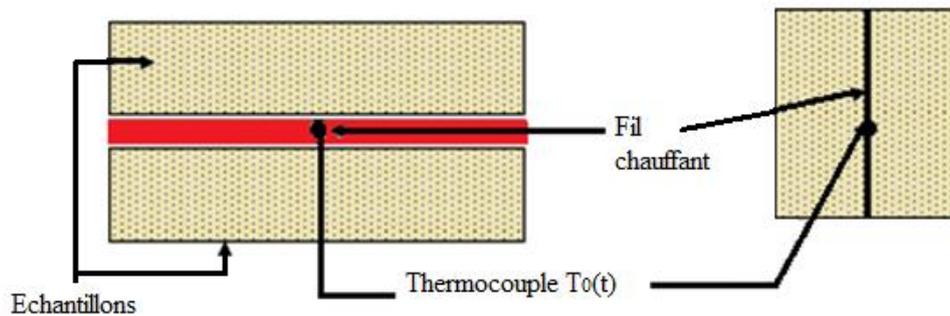
### II.2.2.1 Méthode du fil chaud



**Figure II.11** Fil chaud

La méthode du fil chaud figure II.11 est une technique bien établie pour mesurer la conductivité thermique en régime transitoire [26]. Théoriquement, elle ne s'applique pas aux matériaux ayant une faible densité.

Le principe de cette méthode consiste à insérer un fil chauffant entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. Un flux de chaleur constant est appliqué au fil chauffant, et on enregistre l'évolution de la température  $T_s(t)$  de ce fil. Pendant la période où la perturbation n'a pas encore atteint les autres faces des échantillons, on peut considérer que le transfert thermique au centre de l'échantillon, autour du fil chauffant, est de nature radiale.



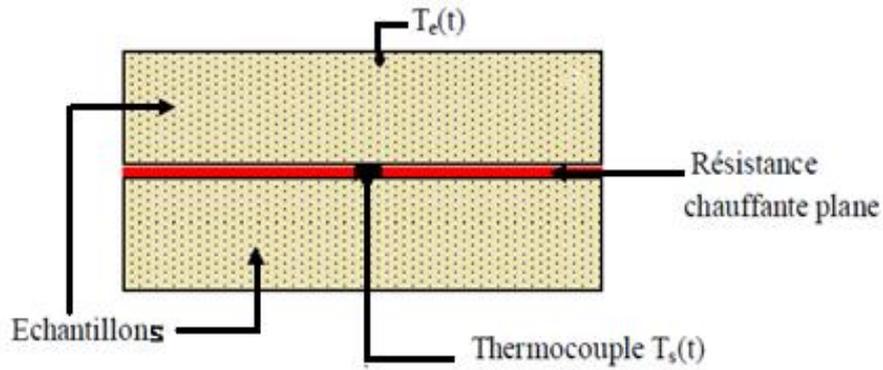
**Figure II.12** Schéma du montage de la méthode du fil chaud.

Ce dispositif permet de générer un profil de courbe linéaire pour  $T_s(t) - T_s(0)$  en fonction de  $[\ln(t)]$ , ce qui permet ensuite d'estimer avec une grande précision la conductivité thermique. L'avantage notable de cette méthode réside dans le fait que l'inertie de la sonde et la résistance de contact n'ont pas d'incidence sur le calcul de la température à des intervalles de temps prolongés figure II.12.

### II.2.2.2 Méthodes du plan chaud

Le dispositif de la méthode du plan chaud, à l'origine utilisée pour mesurer l'effusivité thermique des matériaux en régime transitoire, est représenté dans la figure II.13. Il consiste à insérer une résistance électrique mince entre deux échantillons ayant une surface plane du matériau à caractériser. Un premier thermocouple est placé du côté de la sonde thermique en contact avec la face avant de l'échantillon, tandis que le second est positionné sur la face non chauffée de l'échantillon en contact avec l'isolant. Le principe de la méthode implique l'application d'un flux de chaleur constant à la résistance chauffante, et l'enregistrement de l'évolution de la température  $T_s(t)$  au centre de cette résistance où un thermocouple est positionné. On considère que le transfert au centre de l'échantillon est unidirectionnel. En utilisant une méthode d'estimation des paramètres, on peut calculer les valeurs de [27]:

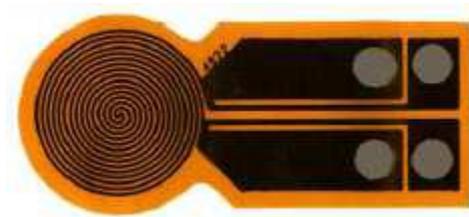
- L'effusivité thermique  $E = \sqrt{\lambda \rho c}$ ,
- La capacitance thermique  $(mc)_s$  de la sonde et de la résistance chauffante,
- La résistance de contact  $R_c$  à l'interface sonde/échantillon,



**Figure II.13** Schéma montage de la méthode du plan chaud.

### II.2.2.3 Méthode du Hot Disc

La méthode de la sonde cylindrique est employée pour mesurer la conductivité et la diffusivité thermique en régime transitoire. Elle implique l'utilisation d'une sonde de forme cylindrique comportant une résistance en platine sous la forme d'un ruban enroulé en spirale sur un support en matière plastique, comme illustré dans la figure II.14. Cette sonde est insérée entre deux échantillons du matériau à caractériser.



**Figure II.14** Vue d'une sonde Hot disc

La résistance en platine sert à générer un flux de chaleur ainsi qu'à mesurer la température moyenne  $T(t)$  du disque. Il est essentiel que les dimensions du matériau à caractériser soient adéquates pour que l'on puisse considérer l'hypothèse du milieu semi-infini.

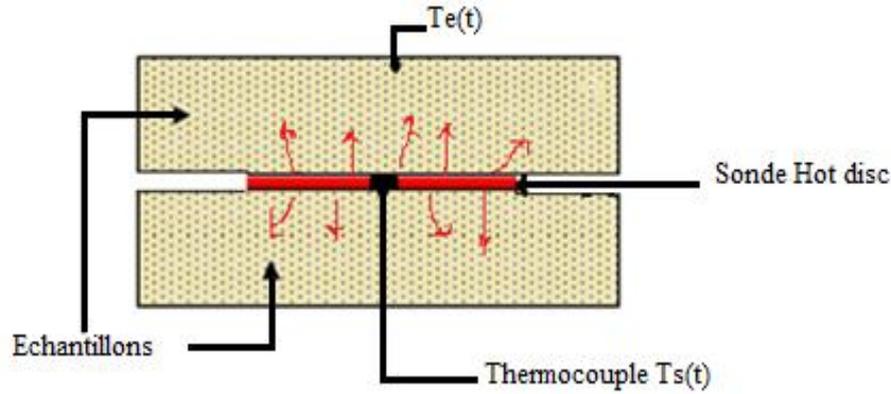


Figure II.15 Schéma du principe du montage du Hot Disc

Il a été montré que l'élévation de la température moyenne peut être décrite avec une bonne précision par les expressions suivantes [28] :

$$\overline{T(x)} = \varphi_0 [\pi^{3/2} r \lambda] D(\tau) \quad (2.14)$$

$$\text{Avec } \tau = \sqrt{\frac{at}{r^2}}$$

$$\text{Et } D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau \sigma^{-2} d\sigma \left[ \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m k \exp\left(-\frac{l^2+k^2}{4m^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2\sigma^2}\right) \right] \quad (2.15)$$

Si l'espace entre les spires devient très petit, cette solution tend vers :

$$D(\tau) = \int_0^\tau \sigma^{-2} d\sigma \int_0^1 v dv \int_0^1 u du \exp\left(-\frac{u^2+v^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.16)$$

L'estimation des paramètres doit être réalisée entre  $t_{\min}$  et  $t_{\max}$  tels que :

$$t_{\min} \geq \frac{d_s^2}{a_s} \text{ et } t_{\max} \leq 1.1 \frac{r^2}{a}$$

ou  $d_s$  et  $a_s$  sont respectivement l'épaisseur et la diffusivité thermique de la sonde.

#### II.2.2.4 Méthode flash

Cette méthode, largement étudiée dans la littérature scientifique est utilisée pour évaluer la diffusivité thermique de matériaux solides en régime transitoire. Son principe repose sur l'application d'un flux lumineux ou d'une impulsion thermique de très courte durée sur l'une

des faces d'un échantillon à faces parallèles. Un thermocouple en contact avec la face opposée de l'échantillon enregistre l'augmentation de la température à partir du moment où la face exposée reçoit l'impulsion thermique [29].

### **Conclusion**

Parmi les méthodes disponibles pour caractériser les propriétés thermophysiques et hydriques, nous avons opté pour la méthode des boîtes. Cette décision découle du fait que c'est la seule méthode actuellement accessible au sein du laboratoire de physique énergétique de Constantine.

Voici quelques avantages et inconvénients de la méthode des boîtes par rapport à d'autres méthodes de caractérisation des propriétés thermophysiques et hydriques :

Avantage :

La méthode des boîtes présente une relative rapidité par rapport à d'autres techniques, car elle requiert seulement un ou deux échantillons en fonction de la configuration de la cellule.

Elle permet de mesurer plusieurs propriétés essentielles pour évaluer l'équilibre thermique, notamment la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur massique.

La méthode des boîtes trouve des applications dans divers domaines, tels que l'éducation, la recherche et l'industrie.

Inconvénients :

La méthode des boîtes peut ne pas convenir à tous les types de matériaux ou à toutes les situations. Elle est limitée aux mesures en régime permanent et ne peut pas être utilisée pour caractériser les propriétés en régime transitoire (notamment pour la conductivité thermique).

La mise en œuvre de la méthode des boîtes peut nécessiter un équipement spécialisé, tel qu'un cryostat et un refroidisseur à eau glycolée.

Il est important de noter que les avantages et les inconvénients de la méthode des boîtes peuvent varier en fonction du contexte spécifique et des propriétés thermophysiques ou hydriques mesurées.

**Références**

- [1] J. Chamoin. Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. INSA de Rennes, 2013.
- [2] T. T. Nguyen, Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, Université Bretagne. (2010) pp.168
- [3] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques,thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales:approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de lyon, 2005, pp. 226.
- [4] H. Bal, Y. Jannot, Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium: laterite based bricks with millet waste additive. Constr Build Mater; vol.41 pp.586-593, (2013).
- [5] F.Benmahiddine, R.Cherif, F.Bennai, R.Belarbi, Effect of flax shives content and size on the hygrothermal and mechanical properties of flax concrete Constr. Build. Mater. 2020, 262, p 1-12.
- [6] M. Fehri, Comportements mécanique et hydrique des composites renforcés par des fibres naturelles et/ou conventionnelles, Thèse de Doctorat. Université de Normandie. Université de Sfax (Tunisie). (2018).
- [7] I. Ceyte, État, acteurs privés et innovation dans le domaine des matériaux de construction écologiques : Le développement du béton de chanvre depuis 1986, Thèse de Master, Institut d'Études Politiques de Lyon, 2007, pp. 191.
- [8] A. Majid, A. Liu, S. Hou, N. Chouw, Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. Constr Build Mater; vol.30 pp.814-825, (2012).
- [9] K. Amel, M. Bouchiba, Effet des techniques d'extraction des fibres végétales sur leurs caractéristiques physiques chimiques et mécaniques, 2018.
- [10] [89] FAO - Nouvelles: 2009, Année internationale des fibres naturelles, <https://www.fao.org/news/story/fr/item/9805/icode/> (accessed October 27, 2021).
- [11] N. Chennouf, Phénomènes de transfert de chaleur Et de masse dans les composites de bois de palmier dattier : comportement sous sollicitations dynamiques. Thèse de doctorat, Sciences, Ingénierie et Environnement, Université Paris-Est Créteil, 2019.
- [12] A. Chouchene, Etude expérimentale et théorique de procédés de valorisation de sous-produits oléicoles par voies thermique et physico-chimique. Thèse de doctorat, génie énergétique, Université de Haute Alsace – Mulhouse, 2010.

- [13] H. El hajouji, Evaluation des caractéristiques physico-chimiques, spectroscopiques et écotoxicologiques des effluents d'huileries d'olive au cours de traitements biologique et chimique. Thèse de doctorat, 2007.
- [14] S. Djadoun, Influence de l'hexane acidifié sur l'extraction de l'huile de grignon d'olive assistée par micro-ondes. Mémoire de Magister, Chimie de l'environnement, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2014.
- [15] I. Putinja <https://www.oliveoiltimes.com/mi.25,2017>.
- [16] A. El Bakkouri, Caractérisation hygroscopique, thermophysique et mécanique des matériaux allégés : cas du béton allégé avec du liège ou avec des grignons d'olive, thèse de doctorat, Université de Tétouan. 2004.
- [17] F. Barreca, C. R. Fichera, Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation, *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 507-513,( 2013).
- [18] A. El bakkouri, A. El bouardi, Etude thermomecanique du béton allege avec du liège et du béton allégé avec des grignons d'olive. 12èmes Journées Internationales de Thermique, 2005.
- [19] Guide de gestion de la qualité de l'industrie d'extraction de l'huile de grignons d'olive. Conseil oléicole international, T.33-1/Doc.n°4, 2006.
- [20] Elaboration d'une huile vierge. <http://www.denmatidalila>. Blogspot.com/2008.
- [21] N. Mesbahi, S. Meziane, Optimisation du séchage convectif du grignon d'olive par la méthode Taguchi. 5ième Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage, (SMSTS'2015). Ouargla, 2015.
- [22] Normalisation française P 15-301. Liants hydrauliques-Ciments courant Compositions, Spécifications et critères de conformité. France: L'Association Française de Normalisation (AFNOR); pp. 28, (1994).
- [23] A. Kriker, A. Bali, Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cem Concr Compos*; vol.30, pp. 639-648, (2008).
- [24] H. Bal, Y. Jannot, Water content dependence of the porosity, density and thermal capacity of laterite based bricks with millet waste additive. *Constr Build Mater*; vol.31:pp.144-150, (2012).
- [25] P. Meukam, Y. Jannot, A. Noumowe, Thermophysical characteristics of economical building materials. *Constr Build Mater*; vol.18 pp. 437-443, (2004).
- [26] D. Taoukil, A. Bouardi. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood concrete composite. *Constr Build Mater*; vol.48 pp.104-115,(2013).

- [27] H.S. Carslaw, *Conduction of heat in solids*, Oxford at the Clarendon press, 2<sup>ème</sup> edition, 1959.
- [28] A. Degiovanni, M. Laurent, Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash. *Revue de Phys. Appli.*, vol.21, pp. 229-237, (1986).
- [29] Y. Jannot, B. Rémy, A. Degiovanni, Measurement of thermal conductivity and thermal resistance with a Tiny Hot Plate. *High Temperatures High Pressures*; vol.39, pp. 11-31, (2009).

**CHAPITRE III**  
**Investigation expérimentale**

### III. Introduction

Pour étudier les propriétés des bétons de grignons d'olive, une investigation expérimentale est nécessaire. Elle peut inclure des essais tels que la mesure des caractéristiques thermiques, hydriques et mécaniques. Les modes opératoires pour chaque essai sont présentés dans la partie expérimentale. Les résultats de ces essais peuvent être utilisés pour développer des normes pour ces bétons et pour améliorer la conception et la fabrication de ces nouveaux matériaux.

Ce chapitre est consacré à la présentation de la méthode de mise en œuvre de ces composites en fonction des proportions des fibres végétales, des dispositifs de mesures, et des méthodes de caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des composites étudiés.

Ainsi le protocole expérimental de la présente étude est réalisé comme suit :

- Préparation des fibres de grignons d'olive;
- Optimisation des pourcentages des fibres, formulations et réalisation des échantillons
- Étude du comportement thermomécanique et hydrique des bio composites ;

La partie choix de la formulation du béton, élaboration des échantillons et l'étude mécanique (écrasement des échantillons) ont été réalisés aux laboratoires : laboratoire des travaux publics de l'est de Constantine (LTPest) et laboratoire du contrôle technique de Constantine (CTC). L'étude expérimentale thermique et hydrique a été réalisée au sein du laboratoire de physique énergétique (LPE) de l'université de Constantine 1.

#### III.1 Préparation des fibres de grignons d'olive

En Algérie on trouve deux types d'olives :

\*Olive à huile: Sa production doit garantir une bonne rentabilité en termes de qualité et de quantité d'huile, on trouve comme variété en Algérie principalement ; le Chemlal, le Limli, le Bouchouk, takesrit, l'Azeradj.

\*Olive de table : Elle implique une certaine grosseur du fruit et un contenu riche en pulpe et en noyau mais faible en huile. En Algérie, on trouve la variété Sigoise [1].

Notre étude portera sur les grignons d'olive issus du procédé d'extraction d'huile par « les presses » et « les super-presses » fonctionnant avec un système à deux phases. Ils sont récupérés d'une huilerie moderne située dans une région à vocation oléicole (Oum etob, Skikda, Nord d'Algérie). Après ramassage des grignons, sont bien lavés dans de l'eau pour

enlever les impuretés et la couche de lignine et de gras qui entourent la fibre et qui gênent son adhérence à la matrice, puis sont séchés naturellement au soleil jusqu'à une humidité minimale (masse constante après plusieurs pesées).



**Figure III.1** Grignons d'olive bruts (GOB)



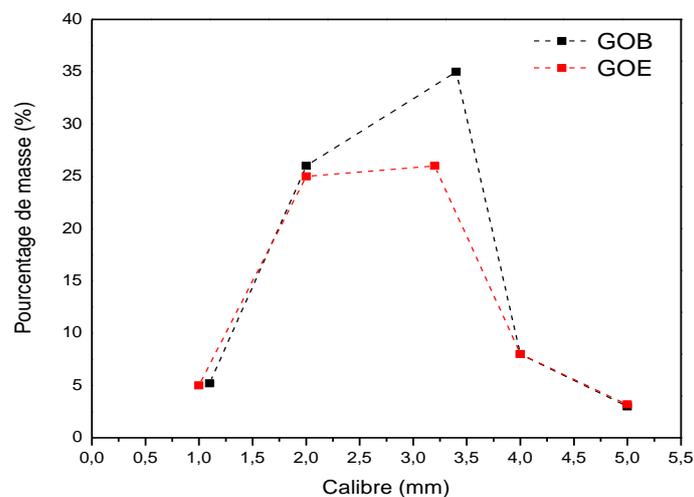
**Figure III.2** Grignons d'olive épuisés(Image par microscope à lumière x100)(GOE)

### III.2 Courbes granulométriques des grignons d'olive

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des tailles d'une collection d'éléments finis de matière naturelle ou fractionnée. L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution granulométrique des éléments constituant un échantillon [2].

La figure III.3 montre les courbes granulométriques des grignons d'olive bruts (GOB) et épuisés (GOE). On remarque bien que les granulés présentent des diamètres compris entre 0.9 mm et 5 mm et que 35 % de ces grains ont un diamètre de l'ordre de 3 à 3.4 mm pour le cas

des grignons bruts, pour les grignons épuisés entre 25 % et 26 % du poids ont un diamètre compris entre 1.9 mm et 3.1 mm.



**Figure III.3** Courbes granulométriques des grignons d'olive.

### III.3 Composition de Béton classique

#### III.3.1 Constituants du béton

##### - Ciment

Le ciment utilisé pour élaborer les composites est un ciment portland composé CPJCEMII/A32.5 de provenance de la cimenterie de Hama Bouziane en Algérie, composée d'oxydes minéraux dont les deux principaux sont la chaux (CaO) et la silice (SiO<sub>2</sub>).

##### - Graviers

**Tableau III.1** Propriétés des granulats utilisés

Propriétés	Types de granulats	
	Sable	Gravier
Nature	Naturel	Concassé
Provenance	Bounouara Constantine	Bounouara Constantine
Classe	0/5	5/8 ; 8/15
D <sub>max</sub>	5	15
M <sub>f</sub>	2.70	-
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1605	1600

### - Eau potable

L'eau de gâchage utilisée pour préparer le béton est une eau potable de robinet.

### III.3.2 Formulation et élaboration des échantillons

La méthode de composition du béton classique utilisée est celle de Baron-Lesage et Gorisse [3]. C'est une méthode empirique pour la formulation de béton qui consiste à fixer des paramètres de départ tels que le rapport eau/ciment (E/C) et la quantité de ciment, puis à ajuster les proportions des autres composants en fonction des propriétés souhaitées pour le béton [4]. Pour un rapport E/C (eau sur ciment) minimal donné, ces méthodes visent l'optimisation du rapport S/G (sable sur gravier) pour obtenir une meilleure ouvrabilité. La composition du béton est déterminée selon les deux hypothèses suivantes de Gorisse [5]:

- Le poids du béton frais est de  $2350 \text{ kg/m}^3$ .

- La bonne ouvrabilité est obtenue pour un béton ayant un rapport S/G compris entre 0.58 et 0.89.

Le rapport S/G est choisi de façon à obtenir une ouvrabilité normale ayant un affaissement au cône d'ABRAMS de  $70 \pm 10$  mm [6] avec un rapport E/C le plus petit possible.

Ainsi, et selon la nature des matériaux la formulation utilisée pour le béton classique est donnée (pour un  $\text{m}^3$ ) dans le tableau III.2:

**Tableau III.2** Formulation du béton classique adopté

Type de béton	Ciment ( $\text{kg/m}^3$ )	Sable ( $\text{kg/m}^3$ )	Gravier ( $\text{kg/m}^3$ )	Eau ( $\text{kg/m}^3$ )	Adjuvant ( $\text{kg/m}^3$ )	Affaissement (mm)
Témoin (BC)	400	750	1000	200	---	$70 \pm 10$

### III.4 Composition du Bétons allégés par les grignons d'olive

La composition du béton des grignons d'olive dépend de la matrice et du mode de mise en place utilisé. Pour la confection de nos échantillons, nous avons opté pour la réalisation des bétons ayant des ouvrabilités moyennes normales, de sorte que l'affaissement au cône d'Abrams (essai réalisé sur le béton frais peu fluide pour déterminer sa consistance) soit de

70±10 [7]. Les quantités de ciment et des agrégats au 1 m<sup>3</sup> demeurent les mêmes que celles du béton classique. Le dosage en fibres varie en pourcentage (%) volumique de 1% à 4%, par conséquent la quantité de gravier varie de telle sorte que la quantité pondérale de gravier plus fibres reste constante pour toutes les compositions. Cette dernière hypothèse est inspirée des méthodologies adoptées par Rossi [8].

Quant à la quantité d'eau ajoutée, il y a deux différentes méthodes : la première est celle de Serna-Ros, et la deuxième est celle de Baron-Lesage.

#### **III.4.1 Première méthode**

Le principe de cette méthode consiste à travailler avec une ouvrabilité normale donc il faut augmenter la quantité d'eau en fonction de l'augmentation du dosage en grignons d'olive, de sorte que la quantité d'eau réelle qui est la quantité d'eau totale moins la quantité moyenne absorbée par les fibres, ne dépasse pas en moyenne la quantité d'eau du béton classique correspondant. En fait, nous avons pensé à utiliser la quantité d'eau absorbée par les fibres comme une source d'humidité interne dans le béton qui assurera la continuité du processus d'hydratation.

#### **III.4.2 Deuxième méthode**

La méthode de Baron-Lesage a été adoptée par Rossi [9] pour la production de béton de fibres. Elle consiste à optimiser l'ouvrabilité en fonction du rapport S/G, tout en travaillant avec un rapport E/C fixe. Concernant notre cas, nous avons fixé le rapport E/C égale à celui utilisé pour le béton classique. Cependant, pour pouvoir maintenir une maniabilité normale, nous avons utilisé l'adjuvant MEDAPLAS-SP.

Les matériaux composites envisagés dans cette étude sont :

- le béton allégé avec des grignons d'olive bruts : « béton-grignons bruts » ;
- le béton allégé avec des grignons d'olive épuisés : « béton-grignons épuisés ».

Les abréviations suivantes, seront utilisées dans le chapitre présent et le chapitre qui suit:

(BC) : Béton classique (témoin)

(GOB): Béton- grignons bruts

(GOE) : Béton- grignons épuisés

Ainsi cinq compositions ou mélanges pour chaque type de béton de grignons d'olive sont alors utilisées à savoir tableau III.3 et tableau III.4 :

**Tableau III.3** Compositions des bétons de grignons d'olive épuisés

Type de béton	Mélanges utilisés	% de fibre en volume	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier (kg/m <sup>3</sup> )	Fibre (kg/m <sup>3</sup> )	Eau totale (kg/m <sup>3</sup> )
GOE	Mélange0	0%	400	750	1000	0	200
	Mélange1	1%	400	750	982	18	270
	Mélange2	2%	400	750	973	27	290
	Mélange3	3%	400	750	960	40	305
	Mélange4	4%	400	750	954	54	335

**Tableau III.4** Compositions des bétons de grignons d'olive bruts

Type de béton	Mélanges utilisés	% de fibre en volume	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier (kg/m <sup>3</sup> )	Fibre (kg/m <sup>3</sup> )	Eau totale (kg/m <sup>3</sup> )
GOB	Mélange0	0%	400	750	1000	0	200
	Mélange1	1%	400	750	982	18	265
	Mélange2	2%	400	750	973	27	280
	Mélange3	3%	400	750	960	40	300
	Mélange4	4%	400	750	954	54	325

Pour tous les mélanges de béton renforcés par les grignons d'olive, les masses de ciment et de sable sont les mêmes que celle du béton classique simple. La fraction volumique des fibres variée de (1% et 4%), mais la masse totale des fibres ainsi que des agrégats ont été maintenue constants avec une ouvrabilité de temps égale à 20 + 5 s et l'affaissement égal à 70 + 10 mm, la quantité d'eau a été ajustée pour adapter le mélange avec le pourcentage de fibres (on a remarqué lors du gâchage des mélanges que pour la même quantité d'eau on a une mauvaise prise de ciment chaque fois que le pourcentage en fibre augmente) . Les pourcentages de fibres dans le béton sont de 1%, 2%, 3% et 4% en volume (les pourcentages retenus après

plusieurs essais sur différents échantillons car les valeurs de leurs résistances mécaniques obeient aux critères des bétons légers) . En effet, lorsque le pourcentage de fibres augmente, la demande en eau a également augmenté en raison de l'absorption d'eau par les fibres.

Les échantillons ont d'abord été durcis dans le laboratoire pendant 24 h dans des conditions climatiques normales: température comprise entre 18° et 20°C, et une humidité relative HR= 65 ± 5%. Après démoulage, ils sont restés au laboratoire jusqu'à la date de l'essai.

### III.5 Modes Opératoires

Le malaxage des bétons allégés par les grignons d'olive a été effectués dans une bétonnière à axe horizontal, de type « Zyklos » de capacité 150l au laboratoire des travaux public Est LTPest. La démarche de malaxage a été effectuée comme suit:

Malaxer les agrégats avec 30% d'eau de gâchage durant 30 s. Par la suite introduire progressivement les fibres humides en ajoutant encore 30% de l'eau de gâchage et cela durant 5 min. Il est à noter que les grignons d'olive sont préalablement imbibés dans 10 % de l'eau de gâchage durant 5 min, avant leur incorporation dans la composition des bétons. Cette démarche permet d'une part, d'empêcher les fibres d'absorber brusquement une très grande partie de l'eau de gâchage ce qui gênerait l'opération de malaxage et d'autre part, elle permet de faciliter la séparation des fibres dans le but d'éviter leur groupement et sert à neutraliser le fort pouvoir absorbant des grignons d'olives et éviter qu'ils ne perturbent par la suite la prise du ciment. Enfin ajouter le ciment et le reste de l'eau en continuant le malaxage durant 2.5 min.

Après le malaxage, le mélange homogénéisé est, ensuite, introduit dans des moules selon les normes NFP 18-409 [10], Deux moules ont été utilisés selon le type d'essais à réaliser. En ce qui concerne les aspects mécaniques, des cylindres de dimension (16x32) cm<sup>3</sup> figure III.4 sont confectionnés, pour les aspects thermiques, des dalles de dimension (27x27x6) cm<sup>3</sup> sont fabriquées figure III.5 .Les éprouvettes sont conservées, avant et après démoulage dans la salle d'essai à température et humidité ambiantes. L'eau étant le facteur principal des agents susceptibles de dégrader le matériau, on a mené une étude sur l'influence de l'humidité sur les propriétés thermo-physiques et mécanique du matériau. Nous avons préparé plusieurs échantillons avec différents pourcentages volumiques des grignons d'olives intégrés dans le béton, tableaux (III.3 et III.4.).



**Figure III.4** Les échantillons pour essais mécanique

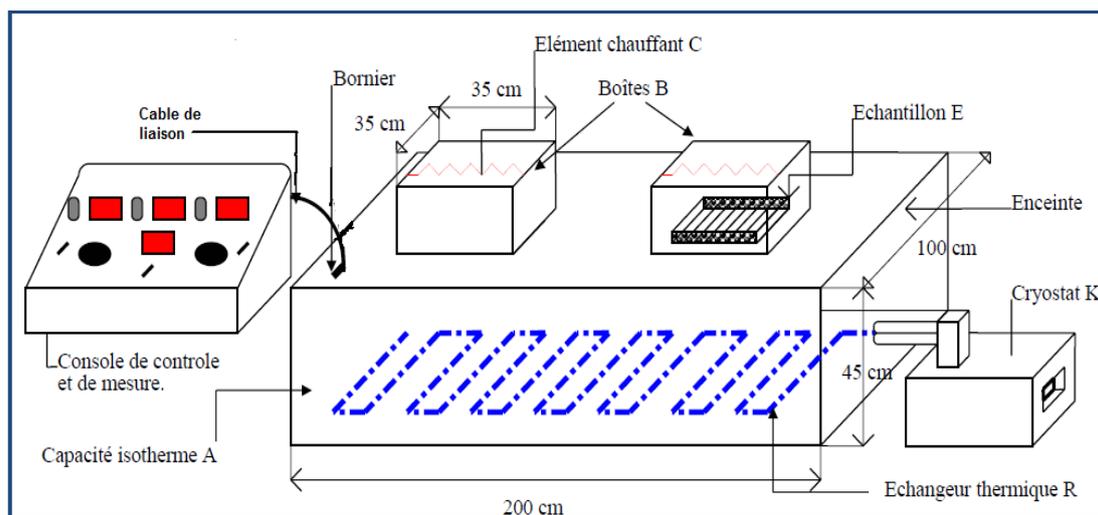


**Figure III.5** Les échantillons pour essais thermique et hydrique

### **III.6 Essais de caractérisations thermophysiques des bétons allégés par les grignons d'olive**

#### **III.6.1 Conductivité thermique**

En ingénierie du bâtiment, la mesure de la conductivité thermique est très importante, car elle fournit des informations sur la capacité d'isolation des matériaux. Dans cette étude la conductivité thermique a été mesurée à l'aide d'un dispositif de mesure E1700 (Figure III.6) [11]. Ce dispositif expérimental est une cellule de mesure conçue spécialement pour déterminer la conductivité thermique, qui a été mis au point au laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'université Claude Bernard Lyon1. Cette technique permet de déduire la conductivité thermique des matériaux testés en régime permanent en réalisant un bilan énergétique du système.



**Figure III.6** Cellule de mesure de la méthode des boîtes

### III.6.1.1 Description de l'appareillage

Le dispositif expérimental présenté (figure III.6) est constitué d'une capacité isotherme (A) de dimensions  $(2 \times 1 \times 0,45) \text{ m}^3$  jouant le rôle de l'ambiance froide, maintenue à une température assez faible (allant jusqu'à  $-10^\circ\text{C}$ ), grâce à un échangeur thermique (R) situé à sa base et alimenté par de l'eau glycolée refroidie par un cryostat (K), de marque HAAKE type D3-G, c'est la source froide du système. Cette capacité est isolée de l'ambiance externe par du styrodur et possède deux ouvertures carrées de 27 cm de côté sur sa face supérieure sur laquelle sont disposées les deux boîtes identiques (B), qui permettent de faire deux mesures simultanées. Ce sont des boîtes de contre-plaqué isolée de l'intérieur par du styrodur.

Chaque boîte est revêtue, sur la partie interne de sa face supérieure, d'un film chauffant C (dont l'émission de chaleur peut être réglée à l'aide d'un rhéostat) et joue le rôle de source chaude ; il s'agit en fait d'une résistance chauffante électrique (film de FLEXEL S20). On impose ainsi une température uniforme dans la boîte en modifiant la tension électrique V

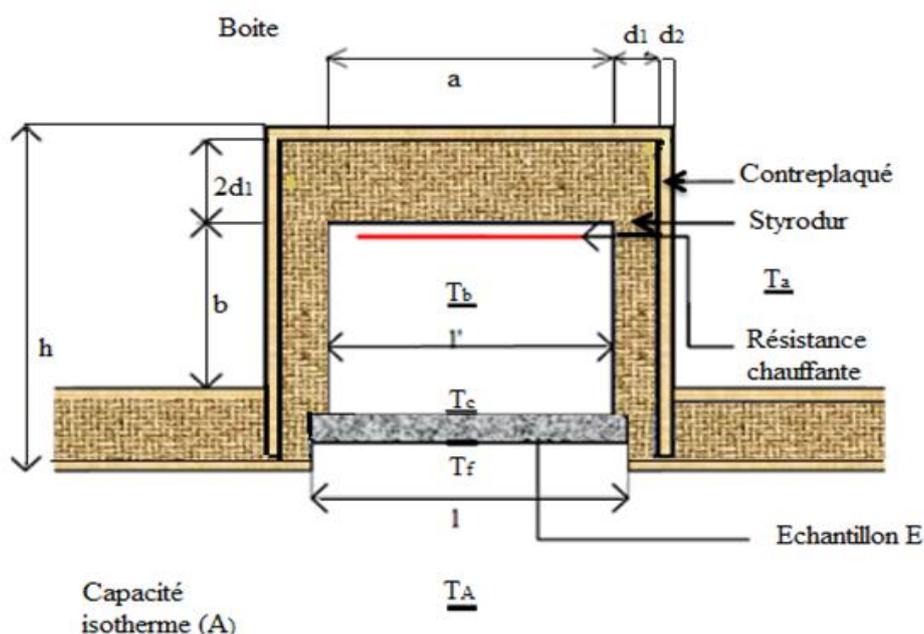
(volt) appliquée aux bornes de la résistance chauffante. L'intérieur des boîtes joue le rôle de l'ambiance chaude.

Les capteurs de température (D) sont des thermo-sondes en platine (norme DIN43700,  $1000\Omega$  à  $0^\circ\text{C}$ ) sondes SP 683 GAL pour la mesure de température de surface et sonde  $M_1$  pour la mesure de température d'ambiance, réparties en divers endroits de l'appareil, ils permettent de mesurer la température sur les faces supérieure de l'échantillon ( $T_c$ ) et inférieure ( $T_f$ ).

Une console de mesure, disposant d'un grand nombre de Voies et pouvant donner des informations instantanées (centrale de mesures DORIC 100 voies, type DIGITREND 220), reçoit tous les fils de liaison aux sondes, elle indique également la valeur de la tension électrique V. Un multimètre électrique permet de mesurer les résistances R ( $\Omega$ ) de chaque boîte.

Les échantillons à tester doivent être de forme parallélépipédique à base carré de 27cm de côté et d'épaisseur comprise entre 1 et 7cm. Ils se placent entre la boîte B et la capacité isotherme A de telle sorte que les flux latéraux soient négligeables. Par analogie avec les murs d'un habitat en hiver, chaque échantillon présente une face chaude du côté de la boîte et une face froide du côté de la capacité isotherme.

Les dispositions de la résistance chauffante, de l'échantillon à tester et des différentes sondes sont indiquées sur la figure III.7.



**Figure III.7** Coupe d'une boîte B pour la mesure de conductivité thermique

### III.6.1.2 Procédure expérimentale

La procédure de mesure de la conductivité thermique des matériaux à tester est basée sur la réalisation de façon permanente d'un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers la boîte, en créant un gradient de température entre la capacité isotherme (source froide), et l'émetteur de chaleur à flux constant (source chaude). On impose ainsi une température uniforme dans la boîte, en modifiant la tension électrique  $V$  appliquée aux bornes du fil chauffant. L'émission de la chaleur est de telle sorte que la température à l'intérieur de la boîte ( $T_b$ ) soit légèrement supérieure à la température extérieure ( $T_a$ ) qui est celle de l'ambiance. La différence entre ces températures ( $T_a - T_b$ ) doit rester inférieure à  $1^\circ\text{C}$ .

Le régime permanent est obtenu par contrôle de l'évolution des températures  $T_b$  de la boîte et  $T_a$  de l'ambiance de la salle. La différence entre ces températures ( $T_a - T_b$ ) doit rester inférieure à  $1^\circ\text{C}$  et constante pendant au moins trente minutes environ.

### III.6.1.3 Détermination de la conductivité thermique apparente

Lorsque le régime permanent est atteint, on mesure  $T_c$  et  $T_f$  au centre de l'échantillon puis la tension de chauffage et on fait le bilan thermique de la boîte. Le flux de chaleur à travers l'échantillon s'écrit sous la forme :

$$q_0 = q_1 + \lambda_{\text{app}} S \Delta T / e \quad (3.1)$$

Avec :

$q_0 = \frac{V^2}{R}$  : Puissance dissipée par effet joule dans la résistance.

$q_1$  : Puissance de chaleur dissipée à travers les parois latérales de la boîte.

$$\Delta T = (T_c - T_f)$$

$C$  : Coefficient global de déperdition à travers la boîte.

$S$  : surface de l'échantillon ;  $e$  : épaisseur de l'échantillon ;

#### III.6.1.3.1 Evaluation de la constante de déperdition thermique

Le coefficient  $C$  est obtenu en utilisant les formules théoriques de CARSLAW [12] :

$$C = 4 \frac{\lambda}{d} ab + \frac{\lambda'}{a'} a^2 + b \lambda \frac{8}{\pi} (\log 1/2 + 2 \arctg 1) + a \lambda' \frac{8}{\pi} (\log 5/8 + 1/2 \arctg 2 + 2 \arctg 1/2) + 0.6 d^2 / a^2 \quad (3.2)$$

Avec (figure III.7) :

$a = 25 \text{ cm}$  : côté de la base carrée de la boîte.

$b = 12 \text{ cm}$  : hauteur intérieure de la boîte.

$d_1 = 4 \text{ cm}$  : épaisseur du styrodur d'une paroi verticale de la boîte.

$d_2 = 0.8 \text{ cm}$  : épaisseur du contreplaqué entourant la boîte.

$d = d_1 + d_2 = 4.8 \text{ cm}$      $d' = 2d_1 + d_2 = 8.8 \text{ cm}$

$\lambda_1 = 0.0325 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  : conductivité thermique du styrodur.

$\lambda_2 = 0.12 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  : conductivité thermique du contreplaqué.

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{1}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} \quad \text{et} \quad \frac{\lambda'}{d'} = \frac{1}{\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} \quad (3.3)$$

Pour la détermination expérimentale de C, il suffit de faire deux mesures de la conductivité thermique sur le même échantillon à des températures voisines, et par résolution d'une simple équation à une inconnue, on arrive à déterminer le coefficient C. L'application numérique donne  $C = 0.16 \text{ W/K}$ .

Finalement la valeur de la conductivité thermique apparente est obtenue par l'égalité suivante :

$$\frac{v^2}{R} = C(T_b - T_a) + \frac{\lambda S}{e} (T_c - T_f) \quad (3.4)$$

Avec :

$\frac{v^2}{R}$  : Puissance dissipée par effet joule de la résistance chauffante ;

$C(T_b - T_a)$  : Chaleur perdue à travers la boîte ;

$\frac{\lambda S}{e} (T_c - T_f)$  : Chaleur transférée par conduction à travers l'échantillon.

De la relation (3.4), on déduit l'expression de la conductivité apparente :

$$\lambda_{\text{app}} = \frac{e V^2}{S R} \left( \frac{1}{T_c - T_f} \right) - \frac{e C}{S} \left( \frac{T_b - T_a}{T_c - T_f} \right) \quad (3.5)$$

Avant de procéder à la mesure de la conductivité thermique des matériaux, nous avons étalonné les différentes sondes de la cellule EI700, et évalué la constante de déperdition thermique de la boîte B.

### III.6.1.3.2 Etalonnage des sondes

L'étalonnage des différentes thermosondes de la cellule de mesure EI700, consiste à fixer les différentes sondes de surface sur un petit morceau de polystyrène expansé et les rassembler à côté de la sonde d'ambiance de la salle et les couvrir avec la boîte B. Après 3 heures en moyenne, temps de stabilisation des températures, nous relevons les températures indiquées par chacune des thermosondes. L'écart de chaque température par rapport à la température moyenne est pris en considération dans le calcul de la conductivité thermique.

### III.6.1.3.3 Erreurs de mesures

Les erreurs relatives à nos mesures pour atteindre la conductivité thermique sont de deux types :

- **Les erreurs systématiques**

Le vieillissement des sondes ainsi que les fils de connexion reliés à ces dernières provoque des erreurs systématiques sur la mesure de la conductivité thermique. Ces erreurs ont pu être minimisées grâce à un étalonnage effectué périodiquement en début de chaque mois. Les sondes de surface sont toutes collées sur un échantillon de polystyrène, et l'on note pour chacune d'elle l'écart entre son indication et celle de l'une d'entre elles prise pour référence. Généralement, la référence est prise égale à la plus faible indication de température. Pour les sondes d'ambiance, les deux sondes des boîtes sont mises avec la sonde d'ambiance de la salle, dans l'une des boîtes. On note l'écart noté lors de l'étalonnage, de la valeur indiquée pendant la mesure effectuée.

Le ruban adhésif et la silicone employés pour fixer les sondes de température engendre également des erreurs, dont l'évaluation demeure très difficile, en réalité, il a été montré que cette influence est très faible [12].

Du fait de la position intégrée de l'échantillon dans la boîte, la surface utile qu'on peut aussi appeler zone de mesure, est légèrement inférieure à  $27 \times 27 \text{ cm}^2$ . Dans notre calcul, on fait intervenir la surface dite corrigée :

$$S = \left( \frac{l+l'}{2} \right)^2 \quad (3.6)$$

- **Les erreurs accidentelles**

Elles concernent en particulier les erreurs dues aux fluctuations aléatoires telles que la tension électrique (instabilité des appareils), la précision visuelle, et le temps de réponse des appareils de mesure.

Usuellement, ces erreurs sont quantifiées par l'utilisation des différentielles logarithmique. En se basant sur l'expression de la conductivité donnée par la relation (3-6) :

$$\lambda = \frac{e}{S \Delta T} \left[ \frac{V^2}{R} - c(T_b - T_a) \right] \quad (3-7)$$

On aboutit à une erreur relative de la forme :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} + \frac{\Delta q + c(\Delta T') + \Delta c \Delta T'}{q + c \Delta T'} \quad (3.8)$$

Avec

$$\Delta T = T_c - T_f$$

$$\Delta T' = T_b - T_a$$

### III.6.1.3.4 Précision de mesure

L'application du calcul d'erreur à l'expression de la conductivité thermique apparente (formule 3-8), donne :

$$\left( \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)_{\text{mes}} = \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} + \frac{\Delta q + c \Delta(\Delta T') + \Delta T' \Delta c}{q + c \Delta T'} \quad (3.9)$$

Le calcul d'erreur a été effectué sur un échantillon ayant pour dimensions et propriétés des valeurs significatives, par exemple :

$$e = 0.047 \text{ m} \quad \Delta e = 5.10^{-4} \text{ m}$$

$S = 676.10^{-4} \text{ m}^2$	$\Delta S = 25.10^{-5} \text{ m}^2$
$q = 2,6 \text{ W}$	$\Delta q = 0,1 \text{ W}$
$\Delta T = 9,10^\circ\text{C}$	$\Delta(\Delta T) = 0,1^\circ\text{C}$
$\Delta T' = 0,5^\circ\text{C}$	$\Delta(\Delta T') = 0,1^\circ\text{C}$
$C = 0,16 \text{ W}/^\circ\text{C}$	$\Delta c = 0,01 \text{ W}/^\circ\text{C}$

L'application numérique donne :  $(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{mes}} = 6 \%$ .

On peut dire que compte tenu des résultats importants obtenus à travers cette méthode et de sa simplicité de mise en œuvre, on pourrait continuer à l'utiliser mais en améliorant bien les conditions expérimentales.

### III.6.2 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique est une caractéristique thermique essentielle des matériaux de construction, qui mesure leur capacité à conduire la chaleur. Plus précisément, elle quantifie la vitesse à laquelle la chaleur se propage à travers un matériau donné. L'objectif de ce travail, comme nous l'avons mentionné précédemment, est de développer des matériaux composites locaux en allégeant le béton à l'aide de grignons d'olive. Ces matériaux seront à la fois des isolants thermiques et des éléments porteurs.

La détermination de la diffusivité thermique revêt une grande importance pour caractériser thermiquement ces matériaux. La méthode que nous avons adoptée pour mesurer la diffusivité thermique est la méthode dite "flash".

#### III.6.2.1 Méthodes du flash

Le principe fondamental de la méthode flash repose sur l'application d'une impulsion de courte durée sur l'une des faces de l'échantillon, suivi de la mesure de la réponse en termes de variation de température sur l'autre face, généralement obtenue sur un "thermogramme expérimental". La source d'impulsion peut varier selon les dispositifs expérimentaux utilisés, pouvant inclure des tubes à éclats, des systèmes laser, ou même des canons à électrons.

L'exploitation des données recueillies dans le thermogramme expérimental conduit à la détermination de la diffusivité thermique du matériau en question.

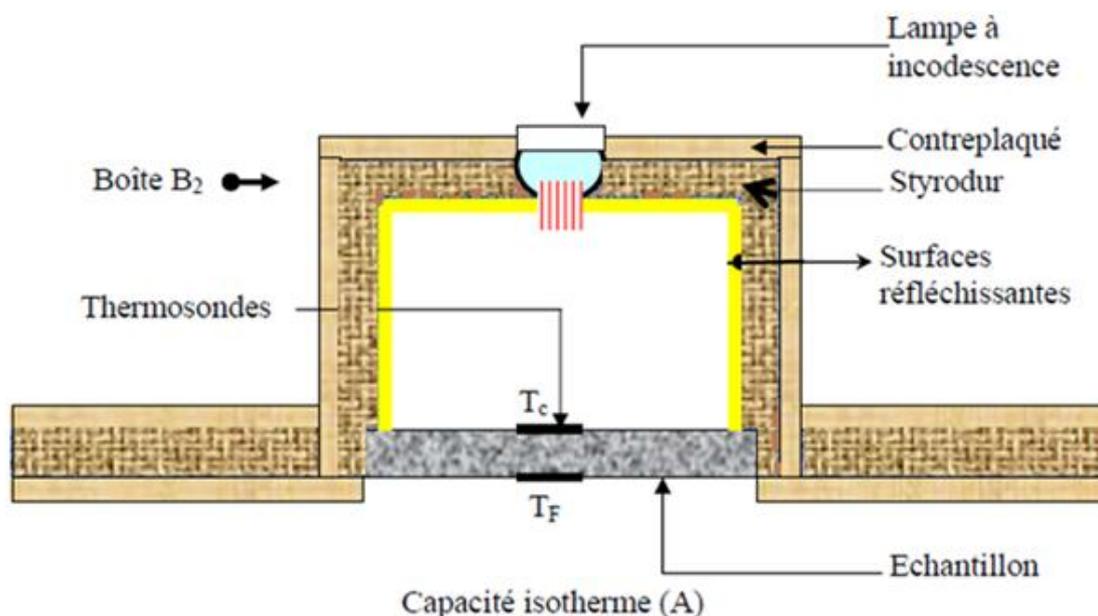
#### III.6.2.2 Appareillage de mesure

La boîte permettant la mesure de la diffusivité thermique est la même que celle utilisée dans le cas de la conductivité thermique, sauf qu'elle est munie d'une lampe à incandescence de 1000 W à sa base au lieu de la résistance chauffante et que ses faces internes sont réfléchissantes (figure III.8).

L'échantillon est placé entre la boîte de mesure et la capacité isotherme (A) et reçoit une impulsion thermique de courte durée sur sa face supérieure. L'évolution de la température sur la face inférieure est enregistrée à l'aide d'un thermogramme expérimental. La durée d'impulsion ou d'excitation thermique est ajustée en fonction du pouvoir d'isolation thermique du matériau.

Il est recommandé que la température soit uniforme en tout point de l'échantillon, avant l'application de l'impulsion, afin d'obtenir un thermogramme régulier.

Les capteurs de température sont deux thermosondes de surface à résistance en platine (Sondes DIN 43760,  $100\Omega$ , à  $0^{\circ}\text{C}$ ). Une est collée sur la face irradiée permettant la détermination du coefficient de pertes par convection et rayonnement  $h_o$  et l'autre est placée sur la face non irradiée donnant le thermogramme expérimental.



**Figure III.8** Coupe d'une boîte pour mesures de diffusivité thermique.

### III.7 Essais de capillarité des matériaux étudiés

#### III.7.1 Principe et objectif

Les essais de capillarité sur les matériaux biosourcés sont importants pour évaluer les propriétés hygroscopiques de ces derniers c'est-à-dire leur capacité à interagir avec l'humidité de l'environnement.

Nos essais de capillarité couramment utilisés pour les matériaux biosourcés sont:

1. Essai de succion capillaire : Cet essai mesure la capacité d'un matériau à absorber de l'eau par capillarité. Une extrémité du matériau est mise en contact avec de l'eau, et l'eau est ensuite aspirée dans les pores du matériau par action capillaire.
2. Essai de perméabilité à l'eau : Cet essai évalue la vitesse à laquelle l'eau peut traverser un matériau biosourcé. Un matériau est placé en contact avec de l'eau, la quantité d'eau qui traverse le matériau sur une période donnée est mesurée. Cela permet de déterminer la perméabilité à l'eau du matériau.
3. Essai de rétention d'eau : Cet essai mesure la capacité d'un matériau à retenir de l'eau après avoir été mouillé. Le matériau est saturé en eau, puis la quantité d'eau retenue par le matériau après un certain temps est mesurée. Cela permet d'évaluer la capacité du matériau à stocker de l'humidité.

Ces essais de capillarité peuvent aider à déterminer comment les matériaux biosourcés interagissent avec l'humidité, ce qui est essentiel pour leur utilisation dans diverses applications, notamment la construction, l'isolation, et d'autres domaines où la gestion de l'humidité est cruciale.

### **III.7.2 Mode opératoire**

Dans le cadre de notre étude, Pour éviter le contact direct des échantillons avec l'eau, nous avons utilisé un bac en plastique rempli à moitié d'eau de robinet, puis nous avons mis des petits supports en pierre dans le fond du bac. Sur ces supports nous avons mis une éponge, dont les extrémités sont plongées dans l'eau, et pardessus on a posé nos échantillons.

Pour mesurer l'influence de l'humidité sur la conductivité et la diffusivité thermique, la variable utilisée est la teneur volumique en eau  $W_v$ . cette mesure est effectuée en pratiquant des pesées successives du matériau depuis l'état de saturation partielle jusqu'à l'état sec. La première mesure humide est obtenue après immersion du matériau dans l'eau pendant quelques jours jusqu'à ce que sa masse reste constante pendant 24h, ce qui correspond à l'état de saturation partielle. Pour les mesures humides intermédiaires, les trois premières sont effectuées à l'air ambiant avec la mesure des valeurs correspondantes de conductivité et diffusivité thermique. Ensuite, le séchage est poursuivi dans une étuve ventilé et régulé à 80°C jusqu'à l'état sec. Ceci est fait pour obtenir une certaine continuité des courbes qui

donnent la variation de la conductivité et de la diffusivité thermique à différents niveaux d'humidité.

Pour chaque matériau étudié, l'essai est effectué, on note la quantité d'eau reprise par l'échantillon. Ce qui nous a permis de tracer en parallèle les courbes donnant la variation de la masse d'eau absorbée en fonction du temps de chaque échantillon.

### **III.8 Essais de caractérisations mécaniques des matériaux étudiés**

Les matériaux allégés par les fibres végétales ont acquis un grand intérêt dans les domaines académique et industriel. Les fibres végétales ont des résistances à la compression intéressantes, ce qui les rend utiles pour une variété d'applications [13].

Les essais mécaniques sont importants pour plusieurs raisons [14]:

- Connaître les propriétés des matériaux : les essais mécaniques permettent de mesurer les propriétés des matériaux de fibres végétales, telles que leur résistance, leur élasticité, leur dureté, leur ténacité, leur fatigue, etc. ces propriétés sont importantes pour évaluer la qualité et la performance des matériaux dans différentes applications.
- Optimiser les formulations : les essais mécaniques peuvent aider à optimiser les formulations des matériaux de fibres végétales en ajustant les proportions des différents composants (fibres, matrice, additifs, etc.) pour obtenir les meilleures propriétés mécaniques possibles. Les essais peuvent également aider à identifier les limites des matériaux et à éviter les défaillances prématurées.
- Améliorer la durabilité : les essais mécaniques peuvent aider à améliorer la durabilité des matériaux de fibres végétales en évaluant leur résistance à l'usure, à la corrosion, à la dégradation biologique, etc. les essais peuvent également aider à évaluer l'impact environnemental des matériaux et à identifier des moyens de les rendre plus durables et plus respectueux de l'environnement.

Dans cette étude nous mettrons en évidence l'influence de la masse volumique apparente sur la résistance à la compression des matériaux étudiés. Ceci dans le but de réaliser des matériaux locaux répondant aux objectifs suivants :

- être isolant, c'est à dire avoir un coefficient de conductivité thermique assez faible que possible.

- être porteur, c'est à dire avoir une résistance à la compression permettant la réalisation de murs porteurs de maisons individuelles de 1 à 2 niveaux ;
- être réalisable sur chantier, sans investissement important.

### III.8.1 Procédure expérimentale

La préparation des différents échantillons et les mesures de la résistance mécanique à la compression ont été effectuées au laboratoire des travaux publics est de Constantine LTPest. Les essais de compression ont été réalisés à l'aide d'une presse constituée d'un vérin hydraulique de capacité 200kN figure III.9. La vitesse de chargement a été fixée à 2.05kN/s sur des échantillons cylindriques de dimension  $(16 \times 32) \text{ cm}^3$ , leur formulation est sur tableau III.1.



**Figure III.9** Presse hydraulique et échantillons cylindriques

### Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons examiné en détail la mise en œuvre des composites à base de fibres végétales, en mettant l'accent sur l'importance des proportions des fibres végétales dans la formulation des matériaux. Nous avons également exploré les dispositifs de mesure utilisés pour évaluer les propriétés thermiques et mécaniques de ces composites. Il est clair que la combinaison précise des ingrédients et des méthodes de caractérisation est essentielle pour obtenir des composites aux performances optimales. La compréhension de

ces paramètres est cruciale pour le développement de matériaux de construction durables, légers et résistants, adaptés à un large éventail d'applications. Notre exploration approfondie des procédés de mise en œuvre et de caractérisation jettera les bases pour les études futures visant à améliorer encore ces composites et à les adapter aux besoins spécifiques de l'industrie de la construction.

## Références

- [1] A. Benaziza, Oleiculture : Caractérisation de six variétés d'olives introduites dans le sud-est Algérien. URL : <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n33p537>
- [2] Norme standard de réalisation de ciment Prompt Vicat, NFP 15-314 et NF P15-317.
- [3] NF P18-560. Analyse granulométrique par tamisage. 1990.
- [4] F. Gorisse, Essais et contrôle des bétons. Edition Eyrolles; (1978).
- [5] R. Lesage, Etude expérimentale de la mise en place du béton frais. Rapport de Recherche no 37. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; (1974).
- [6] J. Baron, R. Lesage, La composition du béton hydraulique, du Laboratoire au chantier. Rapport de recherche LCPC No. 64, (1976).
- [7] Normalisation française P 15-301. Liants hydrauliques-Ciments courant Compositions, Spécifications et critères de conformité. France: L'Association Française de Normalisation (AFNOR); pp. 28, (1994).
- [8] A. Kriker, et al. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. Cem Concr. Compos; vol.27 pp.554-564, (2005).
- [9] Normalisation française P 18-409. Béton avec fibres métalliques-Essai de Flexion. France: AFNOR; pp. 8, (1993).
- [10] P. Rossi, Les bétons de fibres métalliques, presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, ISBN2 -85978 -2923.
- [11] Norme Européenne NF EN ISO 12390-4. Essais pour béton Durci Partie 4 Résistance en Compression Caractéristiques des machines d'essai. France: AFNOR; pp. 19, (2000).

- [12] Y. Zouaoui, Comportements rhéologique et hygrothermique des composites renforcés avec des fibres végétales. Thèse de doctorat, génie civil, Université de Sherbrooke. (2022).
- [13] A. Majid, et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Const. Build. Mater.* 30 (2012) 814-825.
- [14] B. Agoudjil, et al. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterisation of date palm wood. *Energ. Build.* 43 (2011) 491-497.
- [15] F. Pacheco-Torgal, et al. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres : A review. *Const. Build. Mater.* 25(2011)575-581.

**CHAPITRE IV**  
**Exploitation des résultats**  
**expérimentaux**

#### **IV. Introduction**

Ce dernier chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des résultats obtenus lors de la campagne de mesures visant à caractériser les propriétés thermophysiques, hydriques et mécaniques des différents échantillons élaborés. Ces échantillons comprennent un béton classique (échantillon témoin) ainsi que des bétons allégés par l'incorporation de grignons d'olive bruts ou épuisés.

Étant donné que l'humidité est l'agent le plus préjudiciable pour tout matériau, nous avons entrepris des démarches visant à alléger le béton brut en utilisant des matériaux qui réduisent l'effet de la tension superficielle de l'eau et la force d'adsorption des molécules d'eau aux parois des pores au sein du matériau allégé.

Notre étude comprend les éléments suivants :

1. Étude de capillarité : Cette étude consiste à surveiller la variation de la quantité d'eau absorbée par capillarité par l'échantillon au fil du temps, en particulier dans le cas de l'ajout de grignons d'olive bruts ou épuisés.
2. Comportement hygroscopique : Nous avons examiné l'évolution de la teneur volumique en eau ( $W_v$ ) au sein de ces matériaux au fil du temps pour étudier leur comportement hygroscopique.
3. Mesures de conductivité et de diffusivité thermiques : Nous avons réalisé des mesures expérimentales de la conductivité et de la diffusivité thermiques apparentes en fonction de la teneur en eau. De plus, nous avons comparé ces mesures avec les résultats obtenus à l'aide de modèles conceptuels tels que ceux développés par Krischer et Woodside.
4. Effet de l'intégration des grignons : Nous avons examiné l'impact de l'intégration des grignons (bruts ou épuisés) dans le béton sur ses propriétés d'isolation thermique.
5. Étude mécanique : Nous avons réalisé une étude mécanique pour évaluer l'influence de l'ajout de fibres sur le comportement mécanique du composite biosourcé.

Ce chapitre vise à présenter et à analyser les résultats de ces différentes études pour mieux comprendre les propriétés des matériaux étudiés et leurs performances dans diverses conditions.

### VI.1.Masse volumique

La masse volumique d'un matériau poreux revêt une grande importance dans l'étude des paramètres thermophysiques et mécaniques de ce matériau. Plusieurs facteurs influencent la masse volumique, notamment :

1. Pourcentage de dosage : La proportion des différents composants du matériau, tels que le ciment, les agrégats, les fibres végétales, etc., peut avoir un impact sur la masse volumique.
2. Quantité d'eau de gâchage : La quantité d'eau utilisée lors du mélange du matériau affecte sa compacité et, par conséquent, sa masse volumique.

Dans notre étude, nous avons choisi de considérer la masse volumique apparente comme paramètre variable. La masse volumique apparente est simplement le rapport entre la masse du matériau et son volume apparent. Des études antérieures sur l'effet de l'ajout de volumes différents de fibres végétales au béton ont montré que les composites obtenus avaient une densité considérablement réduite, ce qui les qualifie de matériaux légers.

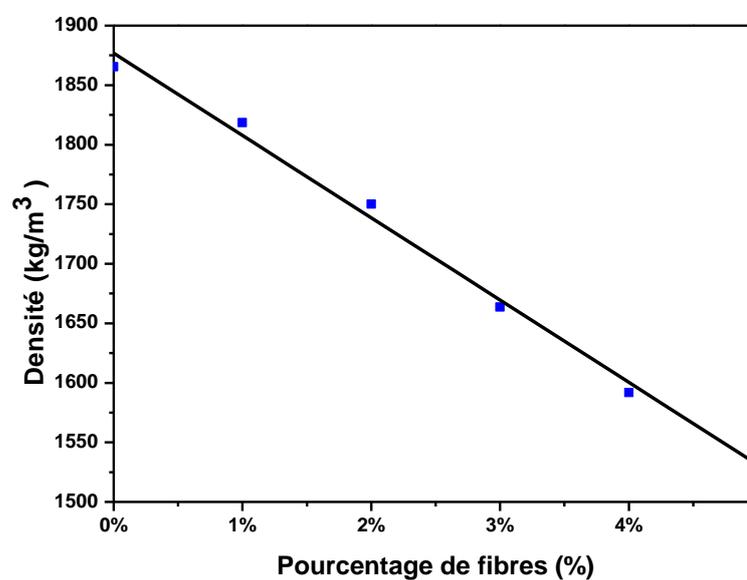
Les résultats de cette incorporation sont regroupés dans les tableaux (IV.1 et IV.2) et sont également représentés sous forme de courbes dans les figures (IV.1 et IV.2). Ces données permettent de mieux comprendre l'impact de l'ajout de fibres végétales sur la masse volumique des matériaux étudiés.

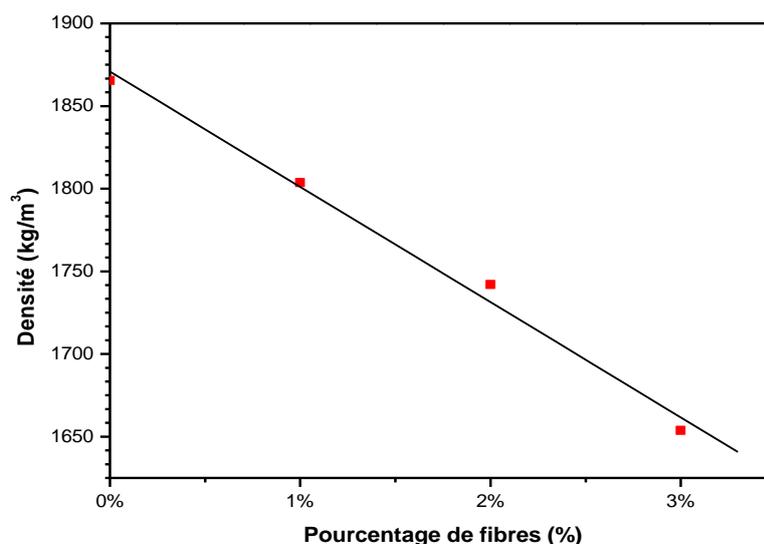
**Tableau IV.1** Masse volumique des échantillons de béton allégé par les GOE

<b>Echantillons Béton GOE</b>	<b>Mélange1 (0%)</b>	<b>Mélange2 (1%)</b>	<b>Mélange3 (2%)</b>	<b>Mélange4 (3%)</b>	<b>Mélange5 (4%)</b>
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1865.5	1818.5	1750	1663.7	1591.8
<b><math>\rho/\rho_1</math> (%)</b>	100%	97.48%	93.80%	89.18%	85.32%

**Tableau IV.2** Masse volumique des échantillons de béton allégé par les GOB

Echantillons Béton GOB	Mélange1 (0%)	Mélange2 (1%)	Mélange3 (2%)	Mélange4 (3%)
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1865.5	1803.7	1742	1653.7
$\rho/\rho_1$ (%)	100%	96.68%	93.37%	88.64%

**Figure IV.1** Variation de la densité du béton allégé par des grignons d'olive épuisés



**Figure IV.2** Variation de la densité du béton allégé par des grignons d'olive bruts

Les figures IV.1 et IV.2 mettent clairement en évidence que la masse volumique du béton allégé diminue à mesure que le pourcentage de fibres augmente. Ce phénomène est observé pour les deux types de bétons étudiés. À titre d'exemple, la masse volumique du béton témoin (BC) est de 1865.5 kg/m<sup>3</sup>, tandis que celle d'un béton allégé avec 4% de grignons d'olive épuisés n'est que de 1591.8 kg/m<sup>3</sup>, ce qui représente une diminution de 14.67%. Pour le béton allégé avec 4% de grignons d'olive bruts, la réduction est de 11.35%.

Cette réduction de la masse volumique est principalement due à la substitution d'une partie de la matrice du matériau par son équivalent en matériaux moins denses, en l'occurrence les fibres de grignons d'olive. Cette substitution a pour conséquence directe de réduire la densité globale du matériau, ce qui en fait un matériau léger.

Ainsi, pour des pourcentages de fibres allant de 0% à 3%, l'abaissement de la densité augmente progressivement jusqu'à atteindre une réduction de 11.35% pour le béton allégé par les grignons d'olive bruts et 14.67% pour le béton allégé par les grignons d'olive épuisés. Ce résultat souligne clairement l'impact positif de l'ajout de fibres de grignons d'olive sur la diminution de la masse volumique du matériau.

## IV.2 Capillarite des matériaux étudiés

### IV.2.1 Principe et objectif

La mesure de l'absorption d'eau est utilisée pour évaluer la facilité avec laquelle l'eau peut pénétrer et circuler à travers un matériau poreux. Cette propriété est influencée par divers facteurs, notamment la pression de l'eau, la pression de l'air et le volume disponible des pores. En général, un matériau doit posséder une certaine porosité pour pouvoir contenir de l'humidité. Cela signifie que les pores ouverts du matériau doivent avoir un diamètre supérieur à  $0.28 \times 10^{-9}$  mètre.

La détermination de la masse sèche d'un matériau s'effectue en le plaçant dans une étuve réglée à  $80^{\circ}\text{C}$ , dans une atmosphère à  $20^{\circ}\text{C}$ , jusqu'à ce que sa masse reste constante pendant 24 heures, comme expliqué dans le chapitre III.

Chaque matériau peut présenter une teneur en eau variant entre 0% à l'état sec et  $W_s$  à l'état de saturation, correspondant à la teneur en eau à laquelle tous les pores ouverts du matériau sont complètement remplis d'eau.

### **IV.2.2. Comportement hygrométrique**

L'hygroscopicité d'un matériau désigne sa capacité à absorber la vapeur d'eau présente dans l'air. Cette capacité dépend de plusieurs facteurs, notamment la température de l'air, son humidité relative, la nature des pores, leur nombre et leurs dimensions, ainsi que la composition du matériau lui-même. La surface du matériau, y compris sa surface intérieure composée de pores et de capillaires, influence également son niveau d'hygroscopicité. Il est important de noter que des matériaux ayant la même porosité mais présentant des pores et capillaires plus petits sont généralement plus hygroscopiques que ceux ayant de plus gros pores.

Pour évaluer l'hygroscopicité des échantillons, ces derniers sont initialement équilibrés en termes de teneur en eau, puis ils sont placés dans un bac d'eau, comme décrit dans le chapitre III. Le gain de masse de ces échantillons est ensuite mesuré sur une période de deux heures, correspondant à la phase d'absorption initiale. En pratique, on considère que la saturation en eau est atteinte lorsque la masse de l'échantillon reste constante pendant au moins 48 heures. À partir des données brutes recueillies, on calcule le gain relatif de masse en divisant le gain de masse par la masse initiale de l'échantillon.

Ainsi les courbes donnant la variation du gain relatif de masse en fonction du temps sont illustrées dans les Figures VI.3 et VI.4 respectivement pour le béton allégé avec des grignons d'olive bruts GOB et le béton allégé avec des grignons d'olive épuisés GOE.

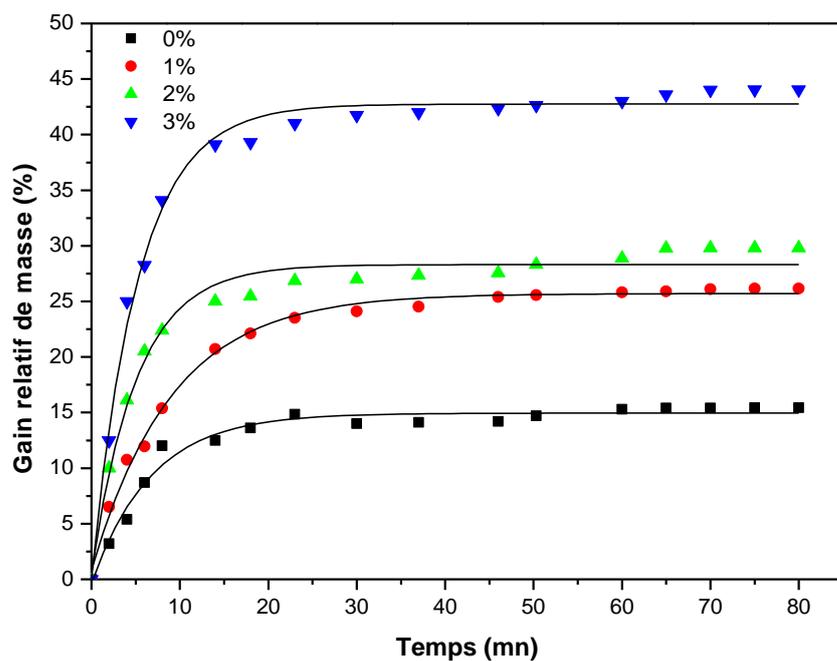


Figure IV.3 Variation du gain relatif de masse en fonction du temps pour le béton GOB.

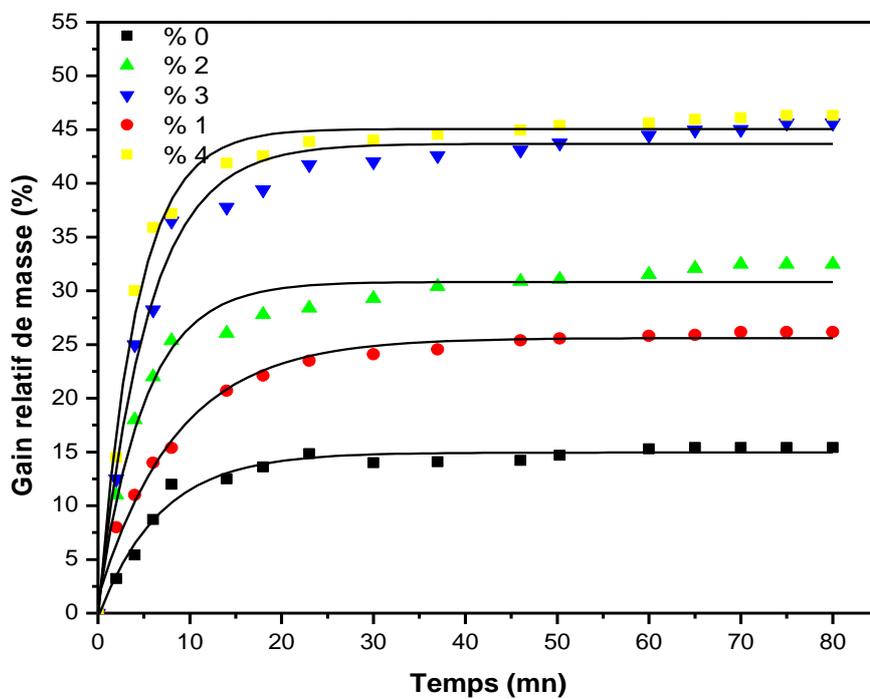


Figure IV.4 Variation du gain relatif de masse en fonction du temps pour le béton GOE.

D'après les courbes présentées, nous avons extrait les valeurs de  $t_f$  (temps de fin de prise d'eau) et de  $G_f$  (gain relatif maximal) pour chaque échantillon. Il est important de noter que ces deux paramètres sont spécifiques à la période d'absorption initiale. Les échantillons étudiés ont la capacité d'absorber davantage d'eau s'ils restent immergés pendant une durée prolongée. Cependant, la période d'absorption initiale est cruciale pour caractériser la durabilité des matériaux, car elle reflète le remplissage des plus gros capillaires, qui sont les principaux chemins par lesquels les fluides gazeux et liquides peuvent pénétrer. Les valeurs de  $t_f$  et de  $G_f$  pour chaque échantillon sont répertoriées dans les Tableaux VI.3 et VI.4.

**Tableau VI.3** valeurs de gain en masse en fonction du temps pour le béton GOB

<b>Béton GOB</b>	<b>Mélange1 (0%)</b>	<b>Mélange2 (1%)</b>	<b>Mélange3 (2%)</b>	<b>Mélange4 (3%)</b>
<b><math>G_f</math> (%)</b>	13	23	27	42
<b><math>T_f</math> (min)</b>	24	35	35	30

**Tableau VI.4** valeurs de gain en masse en fonction du temps pour le béton GOE

<b>Béton GOE</b>	<b>Mélange1 (0%)</b>	<b>Mélange2 (1%)</b>	<b>Mélange3 (2%)</b>	<b>Mélange4 (3%)</b>	<b>Mélange5 (4%)</b>
<b><math>G_f</math> (%)</b>	13	24	38	42	44
<b><math>T_f</math> (min)</b>	24	37	45	25	30

D'après les résultats obtenus, il est clair que l'incorporation de grignons d'olive dans le béton améliore sa capacité à absorber et à retenir l'eau. Lorsque l'on compare les valeurs de  $t_f$  et de  $G_f$  pour des proportions similaires de grignons d'olive, plusieurs observations se dégagent :

- Dans le cas du béton BC (0% de grignons d'olive), le gain relatif maximal en eau est modeste par rapport aux autres échantillons, avec une augmentation de seulement 13% en 24 minutes.
- Pour les mélanges contenant du béton avec des grignons d'olive épuisés (GOE) et des grignons d'olive bruts (GOB), on constate que les mélanges contenant des GOE absorbent l'eau de manière plus efficace que ceux contenant des GOB.

- Pour les mélanges contenant 3% et 4% de GOE et GOB respectivement, une forte absorption se produit en peu de temps. Ce phénomène s'explique par la présence de gros capillaires dans les composites élaborés.

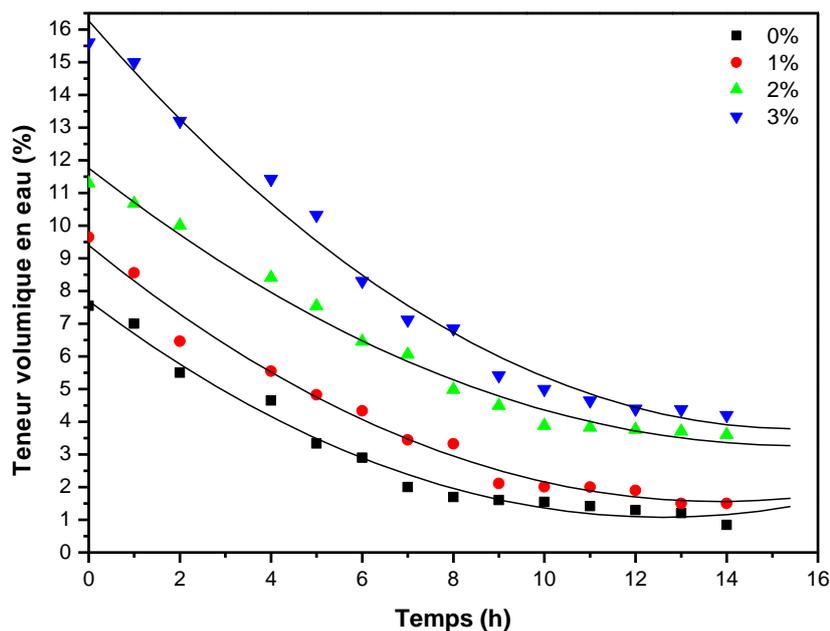
Les résultats sur l'absorption d'eau des matériaux allégés par les grignons d'olive bruts ou épuisés indiquent que ces matériaux agissent en réduisant l'effet de la tension superficielle de l'eau et de la force d'adsorption des molécules d'eau sur les parois des pores. Ce comportement est similaire à celui observé dans des recherches antérieures portant sur le béton allégé avec des copeaux de bois, notamment une étude menée par Taoukil et al. Ces résultats suggèrent que l'ajout de grignons d'olive bruts ou épuisés peut conférer des propriétés hydrophobes au béton [6].

### **IV.2.3 Étude du retrait d'eau**

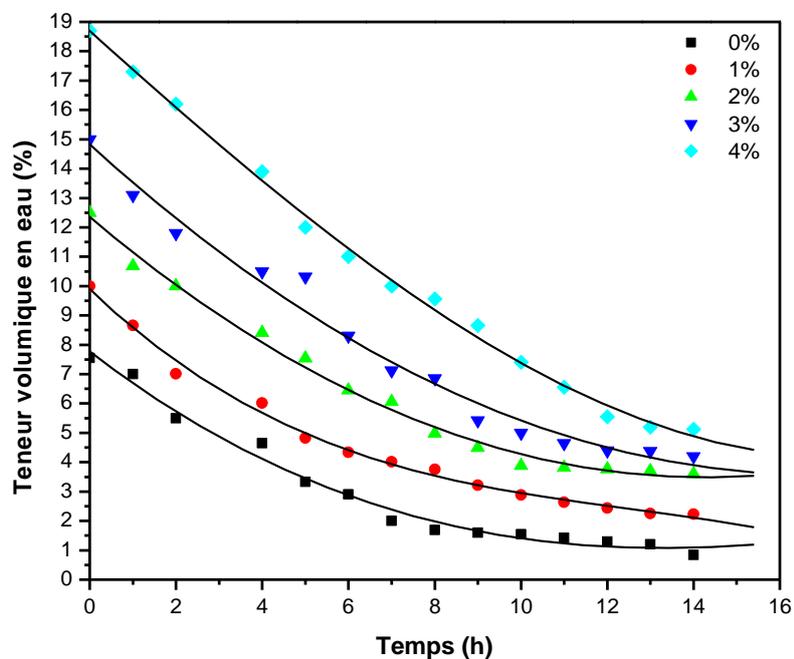
L'étude du retrait de l'eau des matériaux de construction allégés avec des fibres végétales est un domaine de recherche visant à comprendre comment ces fibres influencent la capacité des matériaux à absorber et à libérer de l'eau. Les résultats de cette recherche sont essentiels pour développer des matériaux de construction plus résistants à l'humidité et plus durables.

Pour approfondir l'étude du retrait de nos matériaux, notamment du béton et du béton allégé contenant des grignons d'olives épuisés ou bruts, nous avons suivi la procédure suivante : tout d'abord, nous avons immergé les échantillons dans de l'eau pendant plusieurs jours jusqu'à ce que leur masse se stabilise pendant 24 heures, atteignant ainsi un état de saturation partielle. Ensuite, nous avons placé ces échantillons dans l'air ambiant de la salle d'essai, maintenant une température d'environ ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ ) et une humidité relative d'environ ( $60\% \pm 4$ ). Nous avons ensuite suivi l'évolution du retrait des échantillons pendant une période de 48 heures.

Cette démarche nous permet de mieux comprendre comment ces matériaux réagissent à l'humidité et comment les fibres végétales, en l'occurrence les grignons d'olives épuisés ou bruts, peuvent influencer leur comportement en termes d'absorption et de libération d'eau. Ces informations sont cruciales pour concevoir des matériaux de construction adaptés à différents environnements et conditions climatiques, en assurant leur durabilité et leur performance.



**Figure IV.5** Variation de la teneur volumique en eau en fonction du temps pour le béton allégé par les grignons d'olive bruts.



**Figure IV.6** Variation de la teneur volumique en eau en fonction du temps pour le béton allégé avec les grignons d'olives épuisés.

Les courbes illustrant les variations de la teneur volumique en eau en fonction du temps de séchage à l'air libre pour les différents échantillons de bétons allégés avec les grignons d'olive bruts et les grignons d'olive épuisés sont représentées dans les figures IV.5 et IV.6.

Ces résultats indiquent que l'incorporation de grignons d'olive favorise une meilleure libération de l'eau contenue dans le béton. Il est observé que la teneur volumique en eau diminue sur une période de 14 heures, et cette diminution correspond à la quantité d'eau éliminée par le matériau pour les différents composants, comme suit :

**Tableau VI.5** Retrait d'eau pour béton de grignons d'olive épuisés à différents pourcentage sur 14 heures

<b>Echantillons</b>	0%	1%	2%	3%	4%
<b>Béton GOE</b>					
<b>Retrait (%)</b>	6.5	7	8	10	13

**Tableau VI.6** Retrait d'eau pour béton de grignons d'olive bruts à différents pourcentage sur 14 heures

<b>Echantillons</b>	0%	1%	2%	3%
<b>Béton GOB</b>				
<b>Retrait (%)</b>	6.5	7	7.5	10.5

Il est à noter que la quantité d'eau éliminée augmente avec la proportion de grignons d'olive (qu'ils soient bruts ou épuisés) incorporée au matériau. Cette observation peut s'expliquer en partie par les propriétés oléicoles des grignons d'olive. De plus, l'augmentation significative des ouvertures des pores dans le matériau avec l'incorporation de grignons d'olive favorise l'élimination de l'eau du matériau allégé. La teneur volumique en eau des matériaux allégés se stabilise lorsque l'état sec est atteint.

### **IV.3. La conductivité thermique apparente**

En général, un matériau avec une conductivité thermique plus élevée conduira la chaleur plus efficacement. Cependant, dans le contexte de l'isolation thermique, l'objectif est souvent

d'utiliser des matériaux ayant une faible conductivité thermique pour minimiser les pertes de chaleur ou le gain de chaleur non désiré à travers les surfaces [8] et [9].

De plus il a été démontré que l'humidité peut impacter fortement ses caractéristiques thermophysique. Dans ce sens une campagne de mesures de l'effet de la teneur en eau sur la conductivité thermique des échantillons élaborées a été menée sur la cellule de mesure existante dans notre laboratoire. L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans ce qui suit.

Pour étudier ces propriétés, nous avons d'abord analysé les échantillons dans leur état normal, c'est-à-dire en les laissant à l'air libre, dans les conditions naturelles de température, de pression et d'humidité de la salle de mesure. À cet état, les échantillons contiennent toujours une certaine quantité d'eau résiduelle. Cette teneur en eau résiduelle persiste même lorsque nous plaçons les échantillons dans une étuve, où ils perdent une partie de l'eau pour atteindre un état sec. Ensuite, nous avons soumis ces échantillons à un contact direct avec de l'eau. Nous avons effectué ces essais pour différentes proportions d'eau absorbées par ces matériaux.

### **IV.3.1 Effet de la masse volumique apparente sur la conductivité thermique**

Dans le cas des matériaux de construction bio-sourcés, tels que le bois, la paille ou les fibres végétales, la masse volumique peut influencer la conductivité thermique de plusieurs façons :

- 1- Densité apparente : Quand la masse volumique ou densité, est plus élevée peut entraîner une conductivité thermique plus élevée.
- 2- Structure cellulaire : Les matériaux bio-sourcés ont souvent une structure cellulaire, telle que les cellules du bois, des grignons d'olive ou les poches d'air dans la paille. La présence de ces structures peut réduire la conductivité thermique, car l'air emprisonné dans les cellules agit comme un isolant thermique. Une plus grande masse volumique peut entraîner une réduction de ces structures cellulaires et donc une conductivité thermique plus élevée.

Il est important de remarquer que la relation entre la masse volumique et la conductivité thermique peut varier d'un matériau bio-sourcé à un autre. De plus, d'autres facteurs, tels que l'humidité et la porosité, peuvent également influencer la conductivité thermique d'un matériau de construction bio-sourcé. Par conséquent, il est nécessaire de considérer l'ensemble des caractéristiques du matériau lors de l'évaluation de sa conductivité thermique.

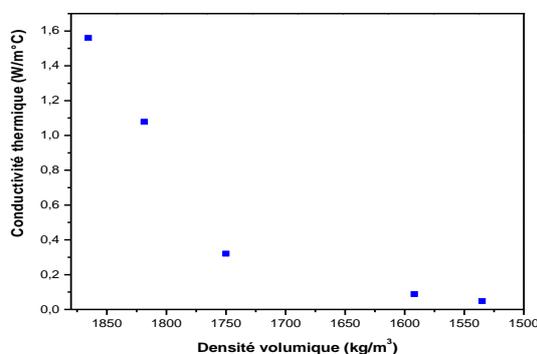
Les différentes mesures de la conductivité thermique apparente ont été effectuées sur des échantillons ayant des masses volumiques apparentes données dans les tableaux IV-7 et VI-8.

**Tableau IV.7** Conductivité thermique apparente des échantillons de béton GOE.

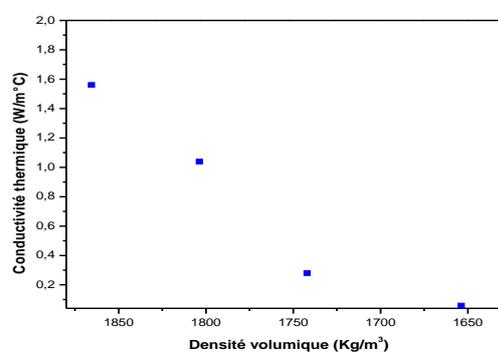
Echantillons Béton GOE	Mélange1 (0%)	Mélange2 (1%)	Mélange3 (2%)	Mélange4 (3%)	Mélange5 (4%)
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1865.5	1818.5	1750	1663.7	1535
$\rho/\rho_1$ (%)	100%	97.48%	93.80%	89.18%	85.32%
$\lambda$ (W/m°C)	1.56	1.078	0.32	0.088	0.048

**Tableau IV.8** Conductivité thermique apparente des échantillons de béton GOB.

Echantillons Béton GOB	Mélange1 (0%)	Mélange2 (1%)	Mélange3 (2%)	Mélange4 (3%)
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1865.5	1803.7	1742	1653.7
$\rho/\rho_1$ (%)	100%	96.68%	93.37%	88.64%
$\lambda$ (W/m°C)	1.56	1.038	0.28	0.058



(a)



(b)

**Figure VI.7** Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité pour

(b) béton GOB

(a) béton GOE

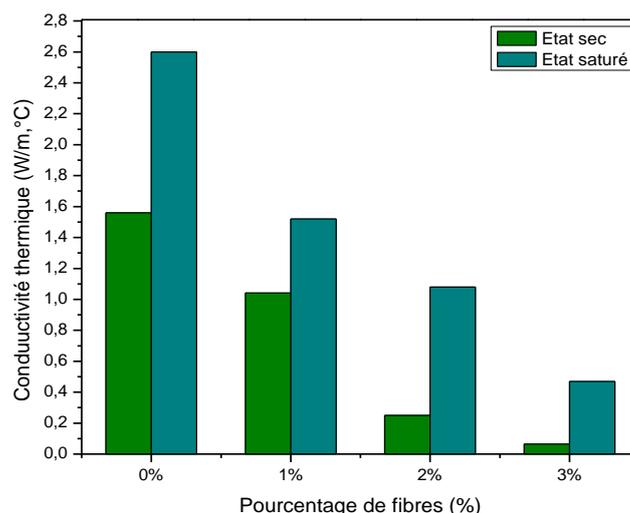
L'observation des figures (IV.7. (a) et (b)) révèle que la conductivité thermique diminue à mesure que la masse volumique apparente diminue, tant pour le béton de grignons d'olive épuisés que pour le béton de grignons d'olive bruts. Cette diminution est due à l'augmentation de la proportion de vide dans le matériau, ce qui entraîne une réduction de sa porosité.

Ces courbes montrent bien que la variation de la conductivité thermique n'est pas linéaire en fonction de la masse volumique apparente. En contrepartie la conductivité thermique et la masse volumique décroissent avec l'augmentation du pourcentage des fibres dans la matrice. Cette diminution est due à l'augmentation de l'air dans la matrice solide du matériau dont la conductivité thermique est inférieure à celle de la matrice (conductivité thermique de l'air est de l'ordre de  $0.026\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ), ces résultats sont en accord avec les travaux de recherche sur les matériaux de construction allégés par les fibres végétales [10] et [11].

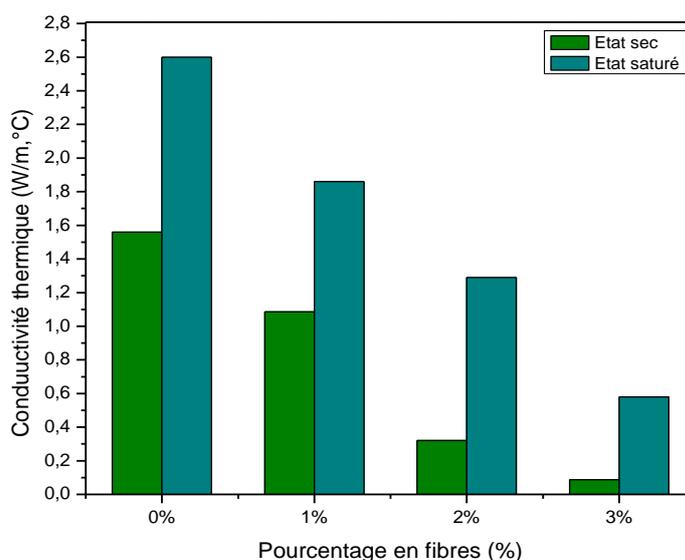
### VI.3.2 Comparaison de la conductivité thermique du béton allégé par les grignons d'olive épaisés ou bruts aux états sec et saturée

Les figures IV.8 et IV.9 représentent la variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la masse volumique apparente respectivement pour le béton allégé par les grignons épaisés ou bruts aux états sec et saturée.

En outre, l'observation de ces figures montre que la conductivité thermique du béton de fibre à l'état saturé est plus élevée que celle du béton à l'état sec. Ceci s'explique par le fait qu'en ajoutant de l'eau au béton sec, un constituant de faible conductivité thermique (conductivité thermique de l'air est de l'ordre de  $0.026\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) est remplacé par un constituant de plus grande conductivité (l'eau de conductivité thermique égale à  $0.6\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ), trente fois supérieure à celle de l'air sec. Il en résulte une augmentation de la conductivité thermique globale du matériau.



**Figure IV.8** Variation de la conductivité thermique aux états sec et saturé cas du béton allégé par grignons d'olive bruts en fonction du pourcentage de fibres



**Figure IV.9** Variation de la conductivité thermique aux états sec et saturé cas du béton allégé par GOE en fonction du pourcentage de fibres

#### IV.3.3 Influence de la teneur volumique en eau sur la conductivité thermique apparente

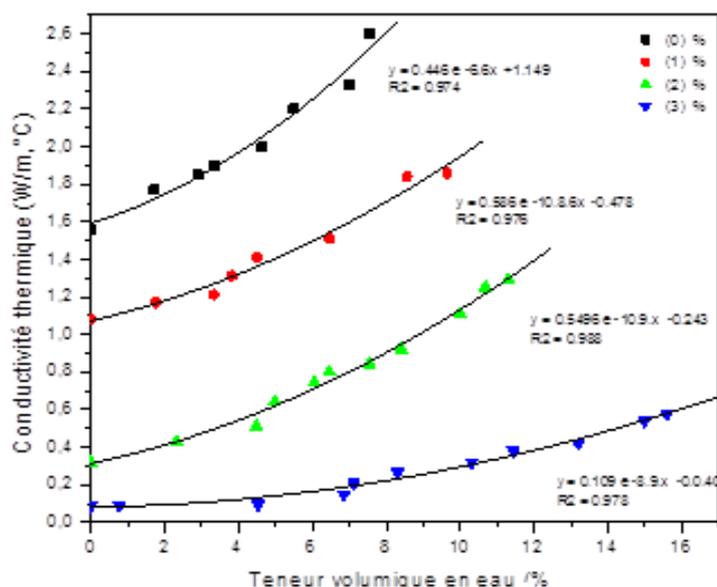
La teneur en eau, ou l'humidité, peut avoir un effet significatif sur la conductivité thermique des matériaux biosourcés. L'eau étant un bon conducteur de chaleur, sa présence dans un matériau peut influencer sa capacité à transférer la chaleur. Il est important de noter que la conductivité thermique d'un matériau biosourcé peut varier en fonction de son niveau d'humidité, ce qui nécessite des mesures à différents états d'humidité pour une compréhension complète de son comportement thermique.

La détermination de la teneur volumique en eau, notée  $W_v$ , est réalisée par le biais de pesées successives sur des échantillons humides, en partant de l'état de saturation jusqu'à l'état sec. La première mesure est effectuée à l'état de saturation, où les échantillons sont immergés dans l'eau pendant un certain laps de temps jusqu'à ce que leur masse atteigne un plateau, indiquant que les matériaux sont complètement saturés en eau. Ensuite, la masse sèche est obtenue en plaçant le matériau dans une étuve ventilée, réglée à une température spécifique (généralement entre 40 °C et 80°C, selon la nature de la liaison de l'eau avec la matrice), jusqu'à ce que sa masse reste constante pendant au moins 24 heures.

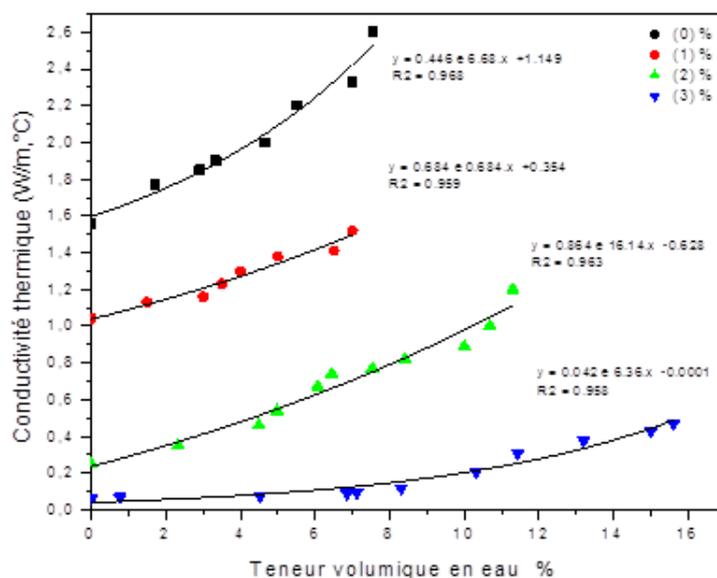
Pour les mesures intermédiaires de masse humide, les premières étapes de séchage sont réalisées à l'air ambiant, avec une mesure correspondante de la conductivité thermique apparente à chaque étape. Ensuite, le séchage se poursuit progressivement dans l'étuve pour

assurer une continuité dans la courbe de variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau du matériau.

La variation de la conductivité thermique apparente du béton allégé, comprenant des grignons d'olive épuisés ou bruts, en fonction de la teneur volumique en eau pour divers pourcentages de fibres, a été mesurée à une température moyenne de 16°C à 25°C. Ces données sont illustrées dans les figures IV.10 et IV.11.



**Figure IV.10** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour les différents pourcentages en fibres

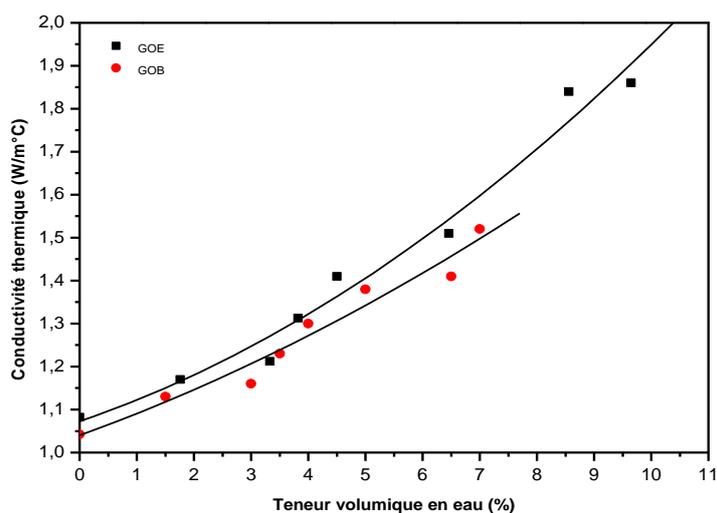


**Figure IV.11** Variation de la Conductivité thermique du béton GOB en fonction de la teneur volumique en eau pour les différents pourcentages en fibres

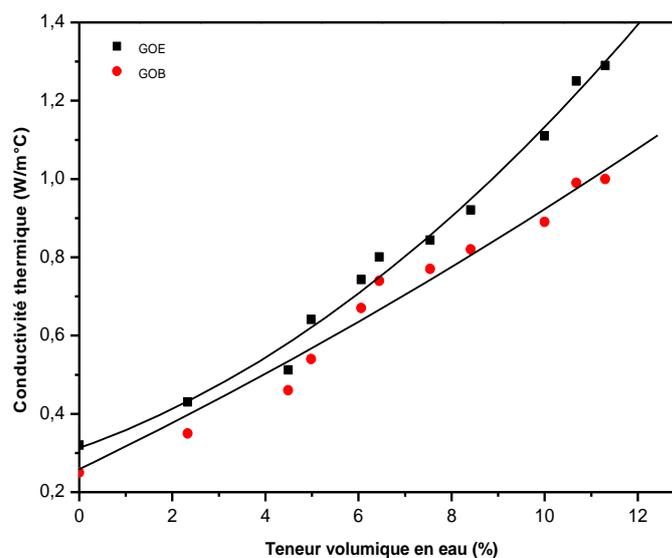
L'observation des courbes, qui présentent une allure similaire, révèle que la conductivité thermique apparente augmente avec la teneur volumique en eau, bien que cette variation ne soit pas linéaire. Ce résultat est conforme à ce qui a été observé dans d'autres études portant sur différents matériaux [12] et [13]. De plus, il est important de noter que la conductivité thermique est d'autant plus faible que la proportion de fibres est plus élevée. Ainsi, l'incorporation de fibres dans le béton lors de son mélange améliore significativement son pouvoir d'isolation thermique [14].

#### IV.3.4 Comparaison du pouvoir d'isolation des bétons allégés aux GOE ou GOB

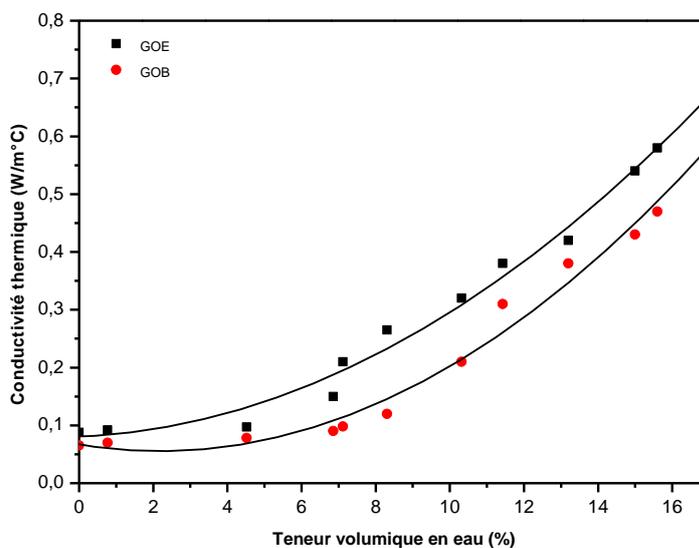
Nous présentons la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les bétons GOE et GOB respectivement pour les différents pourcentages de fibres.



**Figure IV.12** Pouvoir d'isolation thermique des bétons allégés aux GOB ou aux GOE (1%)



**Figure IV.13** Pouvoir d'isolation thermique des bétons allégés aux GOB ou aux GOE (2%)



**Figure IV.14** Pouvoir d'isolation thermique des bétons allégés aux GOB ou aux GOE (3%)

Il est notable que la conductivité thermique augmente avec la teneur volumique en eau, tandis qu'elle diminue avec la quantité de grignons d'olive (bruts ou épuisés) intégrée dans le matériau lors de son mélange. Cette tendance s'explique par le fait que ces matériaux favorisent la présence d'air dans la structure du matériau, ce qui améliore son pouvoir

d'isolation thermique. Ce phénomène a également été observé dans le cas du plâtre renforcé de fibres végétales [15].

De plus, il est à noter que pour des niveaux d'humidité similaires, les valeurs de conductivité thermique du béton allégé avec des grignons d'olive bruts (GOB) sont plus basses que celles du béton allégé avec des grignons d'olive épuisés (GOE). Cette différence de comportement est attribuable aux propriétés oléicoles du GOB, qui sont plus prononcées que celles du GOE. En conséquence, le GOB favorise davantage la répulsion de l'eau au sein du béton, ce qui entraîne une réduction de la conductivité thermique apparente. Cette caractéristique améliore ainsi le pouvoir d'isolation thermique du béton allégé avec des grignons d'olive bruts par rapport à celui allégé avec des grignons d'olive épuisés. De plus, ce matériau favorise la formation de pores à l'intérieur de la structure, ce qui contribue à la présence de lames d'air et à une meilleure isolation thermique [16].

#### IV.3.5 Comparaison de mesures expérimentales avec quelques modèles conceptuels de la conductivité thermique

Dans cette section du chapitre, nous avons entrepris une comparaison de nos résultats expérimentaux avec ceux obtenus en utilisant des modèles de la littérature pour prédire la conductivité thermique des matériaux poreux. Notre objectif est d'interpréter et de confronter nos données expérimentales avec les prédictions fournies par ces modèles.

- **Modèle de Krischer et Kroll**

Le modèle de Krischer et Kroll [17] est une combinaison des deux modèles série et parallèle. D'après les auteurs la conductivité thermique apparente est approchée en utilisant l'expression suivante:

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1-\theta}{\lambda_{//}} + \frac{\theta}{\lambda_{\perp}}} \quad (4.1)$$

avec

$$\lambda_{//} = (1 - P_T) \lambda_s + (P_T - w) \lambda_a + w \cdot \lambda_e \quad \text{Configuration parallèle}$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{1-P_T}{\lambda_s} + \frac{w}{\lambda_e} + \frac{P_T-w}{\lambda_a}} \quad \text{Configuration série}$$

avec :

$\lambda_s$  : Conductivité thermique de la phase solide.

$\lambda_e$  : Conductivité thermique de l'eau.

$\lambda_a$  : Conductivité thermique de l'air.

$P_T$  : Porosité totale.

$\theta$  : Fraction du système disposé perpendiculairement à la direction du flux de chaleur.

$w$  : Teneur en eau.

Les paramètres  $\theta$  et  $\lambda_s$  sont déterminés à partir de la mesure de la conductivité thermique apparente à l'état sec et à l'état de saturation.

De l'équation globale de la conductivité thermique, nous extrayons le paramètre  $\theta$ . Pour une valeur quelconque de  $\lambda_s$ , appelons  $\theta_o(\lambda_s)$  la valeur de  $\theta$  à l'état sec et  $\theta_w(\lambda_s)$  la valeur de  $\theta$  à l'état de saturation, on peut écrire :

$$\theta_o(\lambda_s) = \frac{1/\lambda_o - 1/\lambda_{//}}{1/\lambda_{\perp} - 1/\lambda_{//}} \quad \text{état sec (w = 0)} \quad (4.2)$$

$$\theta_w(\lambda_s) = \frac{1/\lambda_w - 1/\lambda_{//}}{1/\lambda_{\perp} - 1/\lambda_{//}} \quad \text{état saturé (w = } P_T) \quad (4.3)$$

$\lambda_o$  et  $\lambda_w$  désignent respectivement les valeurs de  $\lambda$  mesurées à l'état sec et à l'état de saturation. Le système d'équation en  $\theta$  et  $\lambda$  est difficile à résoudre vu sa complexité. Dans cette étude nous avons choisi la méthode de Newton pour évaluer ces deux inconnus. Cette méthode consiste à dégager par approches successives la valeur de  $\lambda_s$  pour laquelle on a :

$$\theta_o(\lambda_s) = \theta_w(\lambda_s) = \theta \quad (4.4)$$

Toutes les mesures ont été effectuées à des températures voisines de la température ambiante. Les valeurs retenues pour la conductivité de l'air et celle de l'eau sont  $\lambda_{air} = 0.026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  et  $\lambda_e = 0.58 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  [18].

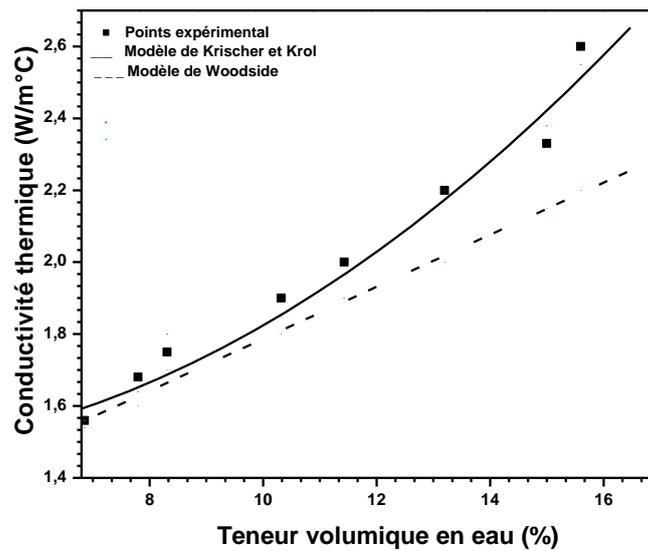
- **Modèle de Woodside**

La conductivité thermique apparente s'écrit sous forme d'une relation moyenne géométrique pondérée des conductivités thermiques des trois phases [17].

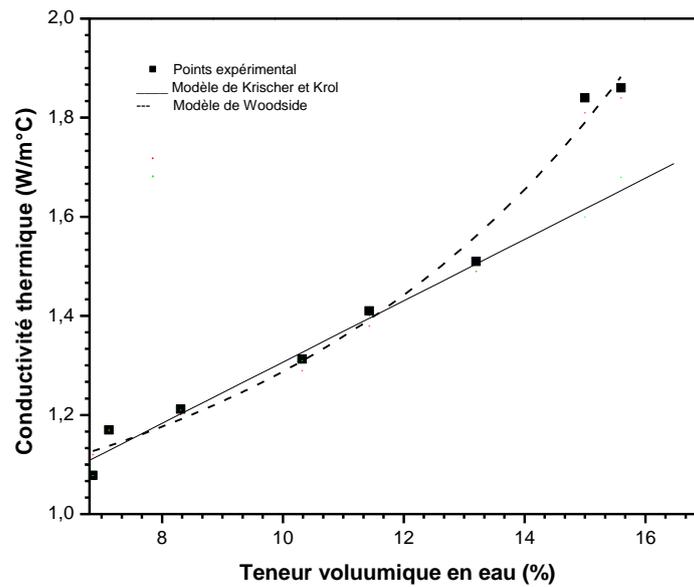
$$\lambda = \lambda_e^w \lambda_s^{(1-P_T)} \lambda_a^{(P_T-w)} \quad (4.5)$$

Les calculs sont effectués sur MATLAB R2014a.

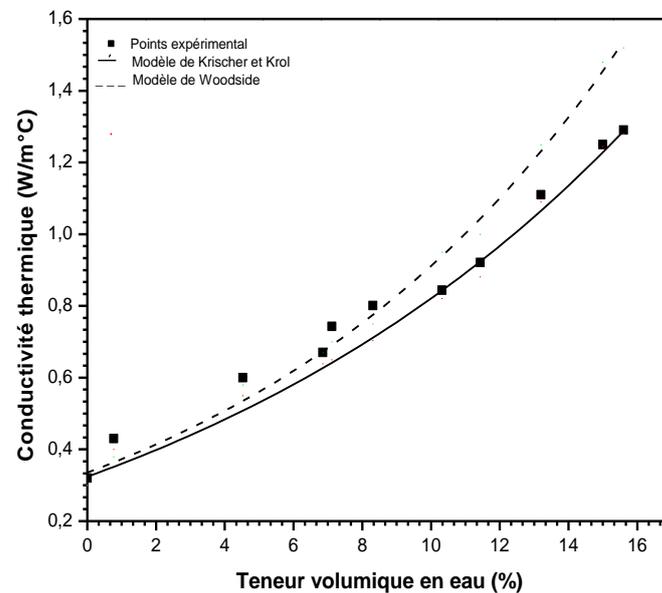
La comparaison entre les résultats expérimentaux du béton allégé par GOE et ceux déduits des modèles de Krischer et de Woodside est présentée par les figures IV.15, IV.16, IV.17 IV.18.



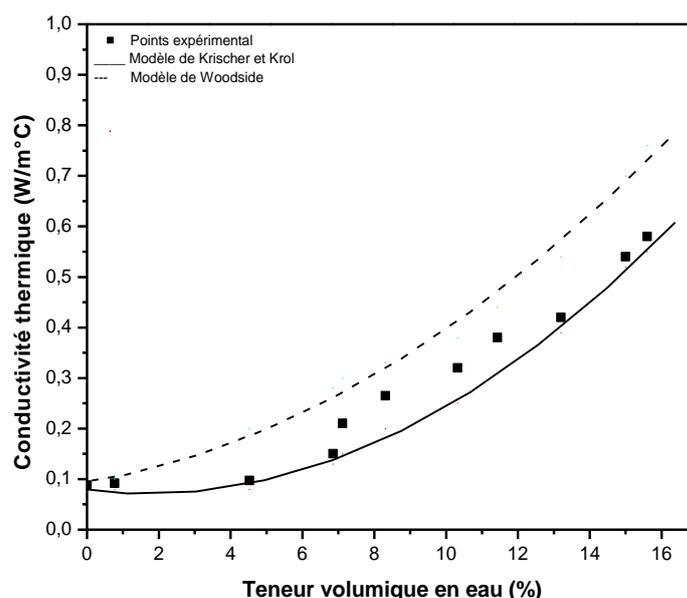
**Figure IV.15** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (0%)  
(Résultats expérimentaux, modèles de Krischer et de Woodside)



**Figure IV.16** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (1%)  
(Résultats expérimentaux, modèles de Krischer et de Woodside)



**Figure IV.17** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (2%)  
(Résultats expérimentaux, modèles de Krischer et de Woodside)



**Figure IV.18** Variation de la conductivité thermique du béton GOE en fonction de la teneur volumique en eau pour un pourcentage de fibres de (3%)

(Résultats expérimentaux, modèles de Krischer et de Woodside)

La comparaison entre l'évolution expérimentale de la conductivité thermique avec la teneur en eau et celle simulée par les modèles théoriques proposés est illustrée sur les figures (IV-15 ;IV-16 ; IV-17 ;IV-18). les résultats des mesures expérimentales sont en étroite concordance avec ceux prédits par le modèle de Krischer. L'écart relatif moyen entre les résultats expérimentaux et ceux donnés par ce modèle est comprise entre 2.4% et 4.9%. Le modèle de Woodside reste acceptable, avec une erreur relative moyenne comprise entre 5.57% et 7.6%. Le bon accord de ces deux modèles avec les points expérimentaux est dû à l'effet que le domaine, délimité par les ensembles de phases en série et en parallèle, inclut nécessairement toutes les propriétés des matériaux réels, quelle que soit la morphologie et la distribution de ses phases. En effet, le modèle en série représente la limite inférieure de la conductivité thermique apparente du milieu, et le modèle en parallèle représente la limite supérieure. Les valeurs simulées par le modèle de Woodside sont relativement éloignées des mesures expérimentales, sauf près de l'état sec. L'accord près de l'état sec est attendu car ce modèle s'avère efficace pour les systèmes à deux phases. Le désaccord en dehors de la région de l'état sec peut être attribué au fait que ce modèle ne prend pas en compte la structure et la distribution des phases dans le milieu.

#### IV.4 La diffusivité thermique

Dans le but d'obtenir un modèle mathématique capable de représenter fidèlement l'évolution de la réponse en température de la face non irradiée de l'échantillon en fonction du temps, et afin de pouvoir comparer nos résultats concernant la diffusivité thermique(a) et les coefficients d'échange superficiel sur la face irradiée ( $h_o$ ) et non irradiée ( $h_e$ ) des échantillons étudiés, nous avons utilisé la méthode d'identification paramétrique citée au chapitre III.

La température sur la face non irradiée de l'échantillon  $T(e,t)$  dépend implicitement de la durée d'impulsion  $t_o$ . Nous avons procédé par plusieurs essais expérimentaux qui ont montré que pour  $t_o = 20$  s, on obtient des thermogrammes réguliers.

##### IV.4.1 La variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau

L'étude de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau a été effectuée sur les mêmes échantillons et dans les mêmes conditions expérimentales que dans le cas de la conductivité thermique. La méthode que nous avons utilisée pour la détermination de la diffusivité thermique a été présentée dans le chapitre III.

Une comparaison entre les résultats obtenus par trois modèles de dépouillement des thermogrammes expérimentaux (modèles de Parker, de Digiovanni et de Yezou) a été entreprise:

- **Modèle de Parker :**

$$a = 0.139 \frac{e^2}{t_{1/2}} \quad (4.6)$$

- **Modèle de Digiovanni:**

$$a_{2/3} = e^2 \frac{(1.150t_{5/6} - 1.250t_{2/3})}{t_{5/6}^2} \quad (4.7)$$

$$a_{1/2} = e^2 \frac{(0.761t_{5/6} - 0.926t_{1/2})}{t_{5/6}^2} \quad (4.8)$$

$$a_{1/3} = e^2 \left( \frac{0.617t_{5/6} - 0.862t_{1/3}}{t_{5/6}^2} \right) \quad (4.9)$$

$t_{i/j}$  étant le temps qui correspond au rapport  $i/j$  du maximum de la température.

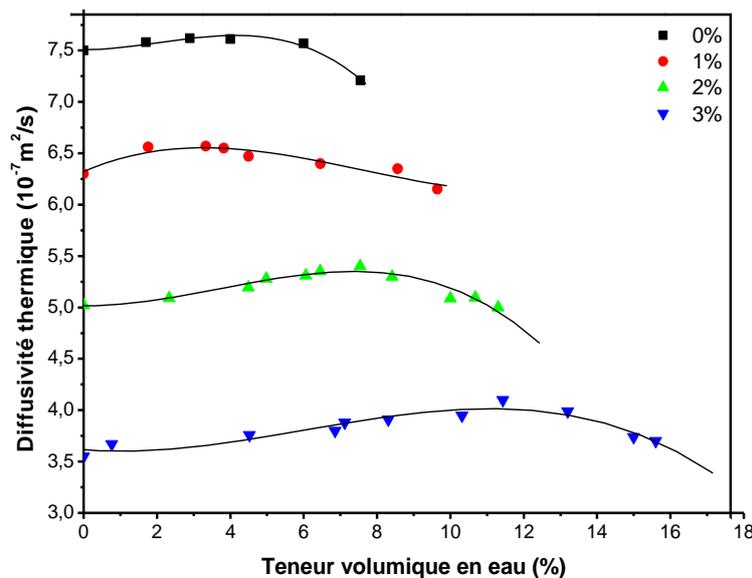
- **Modèle de Yezou :**

$$a_{5/6} = \frac{e^2}{t_{5/6} + t_0/2} \left[ 0.713 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right)^2 - 1.812 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right) + 1.037 \right] \quad (4.10)$$

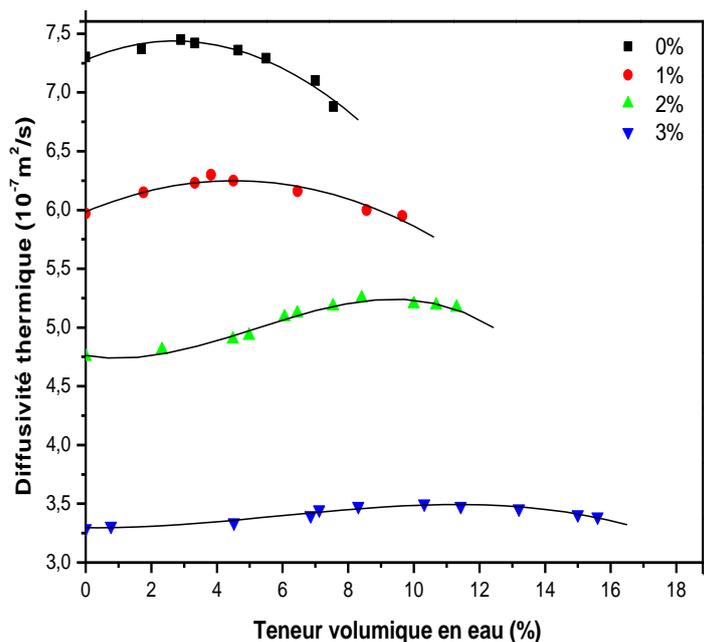
$$a_{1/2} = \frac{e^2}{t_{1/2} + t_0/2} \left[ -0.4032 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right)^2 + 0.1103 \left( \frac{t_{1/2} + t_0/2}{t_{5/6} + t_0/2} \right) + 0.2027 \right] \quad (4.11)$$

Pour chacun des modèles, la valeur de la diffusivité thermique ( $a$ ) est calculée comme étant la moyenne des expressions respectives, utilisées précédemment.

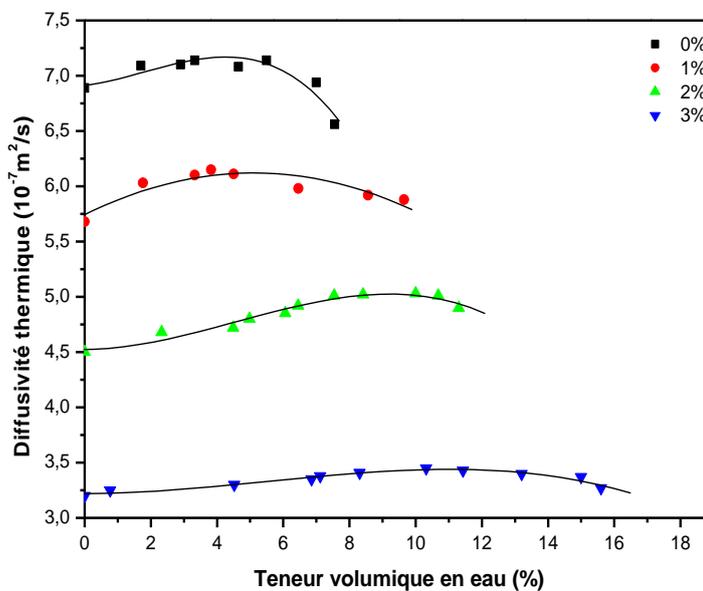
La variation de la diffusivité thermique avec la teneur volumique en eau de différents pourcentages en grignons d'olives (0%, 1%, 2% et 3%) est illustrée respectivement par les figures VI.14, VI.15 et VI.16, en utilisant respectivement les modèles de Parker, de Digiovanni et de Yezou.



**Figure IV.19.** Variation de la diffusivité thermique avec la teneur volumique en eau des différents pourcentages en grignons d'olives : modèle de Parker



**Figure IV.20** Variation de la diffusivité thermique avec la teneur volumique en eau des différents pourcentages en grignons d'olives : modèle de Digiovanni



**Figure IV.21** Variation de la diffusivité thermique avec la teneur volumique en eau des différents pourcentages en grignons d'olives : modèle de Yezou

Il est aisé de constater que pour tous les matériaux élaborés (sans et avec fibres ajoutées) et quelque soit le modèle utilisé, que l'humidité influe significativement sur la diffusivité thermique. Il apparaît clairement que cette dernière augmente rapidement avec la teneur en eau, ce qui peut être expliqué par le fait qu'à l'état sec le transfert de chaleur s'effectue aux niveaux des points de contacts entre les granulats formant le matériau. Avec l'addition d'eau un ménisque liquide se forme autour des points de contacts et représente un pont thermique, d'où l'augmentation brutale de la diffusivité thermique à des faibles teneurs en eau. En augmentant l'humidité au sein du matériau, la surface mouillée s'élargit autour des points de contacts, favorisant moins le transfert de chaleur, il en résulte un ralentissement du processus de diffusivité pour des moyennes teneurs volumiques en eau. A l'état de saturation qui correspond à la formation de chemins continus, les propriétés thermiques tendent à se stabiliser.

Ces observations confirment que l'incorporation des grignons d'olive dans le béton diminue sa diffusivité thermique et que ces fibres agissent comme un ralentisseur de la progression de la chaleur. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus pour la conductivité thermique. Ainsi l'allègement du béton par les grignons d'olives est bénéfique pour l'isolation thermique du matériau de construction.

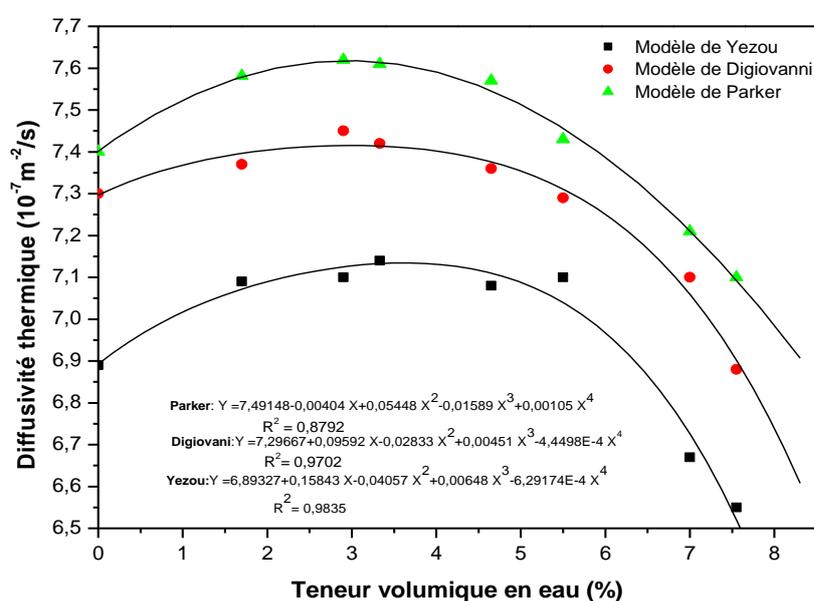
### **IV.4.2. Comparaison des différents modèles de dépouillement de la diffusivité thermique**

Nous nous sommes aussi intéressés à mettre en évidence l'écart entre les différents modèles utilisés pour calculer la diffusivité thermique ou la vitesse de propagation de la chaleur dans le matériau bio sourcé humide .

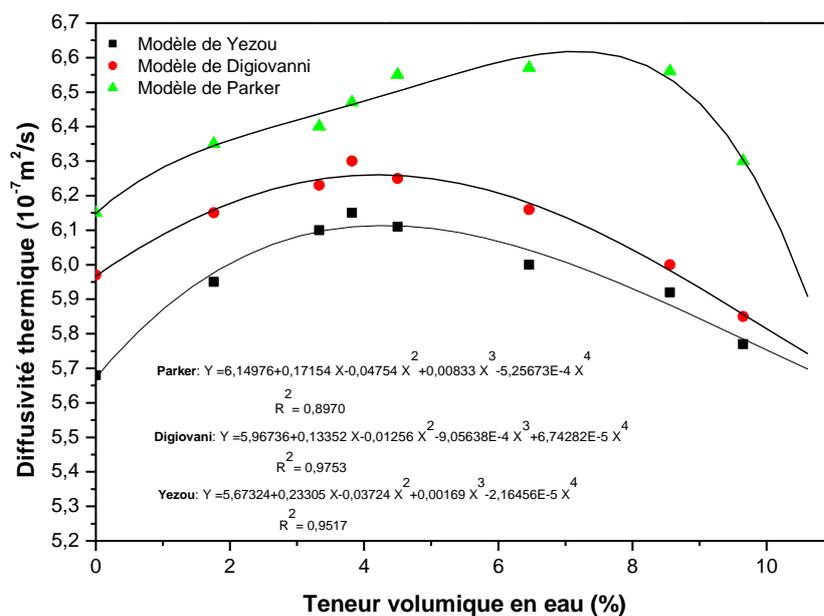
Il faut cependant noter qu'il ya un écart relativement important entre les valeurs de la diffusivité thermique à la même teneur volumique en eau selon le modèle utilisé (Yezou, Digiovanni ou Parker) pour le dépouillement des thermogrammes, et ce pour tous les échantillons (béton témoin, béton à 1%, à 2% ou à 3% de fibres) (figures IV.17, IV.18, IV.19 et IV.20)

Cet écart résulte probablement de la différence des hypothèses de base retenue pour chaque modèle. En effet, pour le développement de leur modèle, Parker et al, ont travaillé sur des échantillons cylindriques et parfaitement isolés en supposant qu'ils étaient homogènes, isotropes et opaques et de propriétés thermo-physiques constantes, une très courte impulsion et le transfert de chaleur unidirectionnel. Ce modèle présente des aspects physiques loin de la réalité. En effet, les pertes de chaleur sur les faces latérales de l'échantillon ne sont jamais nulles et la durée de l'impulsion n'est pas négligeable. L'originalité du modèle de Digiovanni

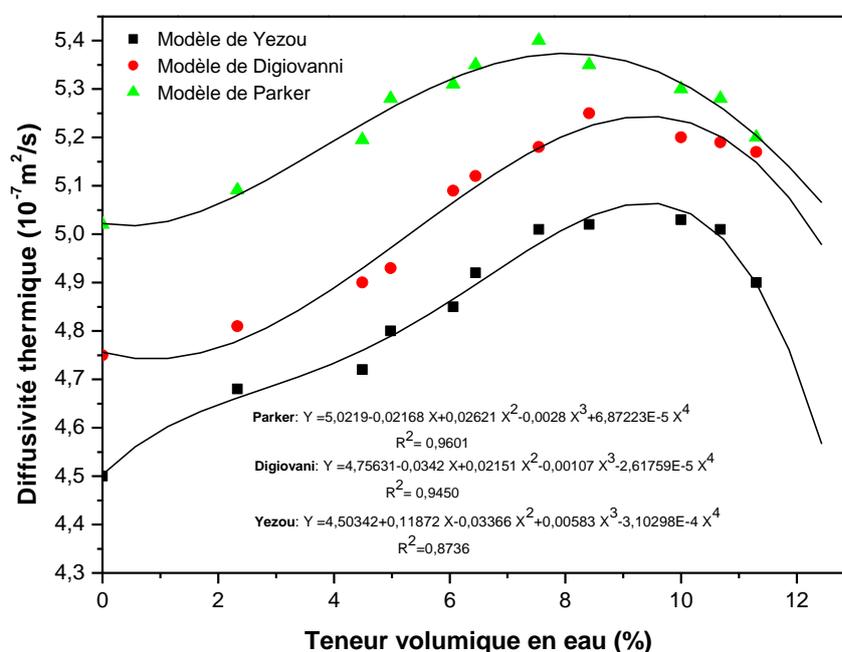
repose sur le fait qu'il tient compte des pertes thermiques sur toutes les faces de l'échantillon cylindrique sans les évaluer. Pour le modèle de Yezou, les échantillons sont parallélépipédiques. Les pertes de chaleur sur les faces avant et arrière de l'échantillon sont prises en compte, les pertes latérales sont négligées et la durée de l'excitation thermique  $t_0$  est relativement importante (20s). Néanmoins, il est possible d'estimer que le modèle de Yezou reflète (approche) bien le comportement thermique des matériaux étudiés. En général, Ce modèle est très approprié pour des matériaux de construction.



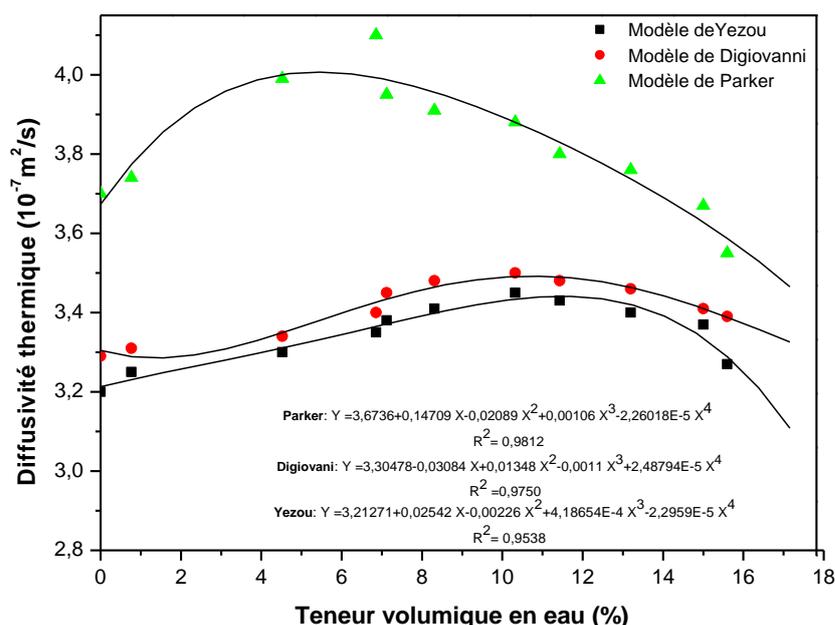
**Figure IV.22** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni pourcentage de fibres (0%)



**Figure IV.23** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni pourcentage de fibres (1%)



**Figure IV.24** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni pourcentage de fibres (2%)



**Figure VI.25** Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur volumique en eau pour les modèles de Yezou, Parker et Digiovanni (pourcentage de fibres = 3 %)

#### IV.5. Capacité calorifique thermique

La capacité thermique massique, ou chaleur massique, quantifie la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie thermique pour une masse donnée, lorsque sa température augmente. Dans le domaine de la construction, les matériaux lourds et denses tels que le béton, la brique et la pierre possèdent une capacité thermique élevée. Ils ont la capacité d'absorber et de stocker la chaleur, puis de la libérer progressivement. La capacité thermique joue un rôle essentiel dans les calculs de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermique, deux grandeurs cruciales pour évaluer l'inertie thermique d'un matériau. Cette capacité thermique peut être calculée en utilisant la relation (4.12), où la conductivité thermique est mesurée selon la méthode des boîtes et la diffusivité thermique est déterminée expérimentalement à l'aide de la méthode flash.

$$a = \lambda / \rho \cdot Cp \quad (4.12)$$

Avec :

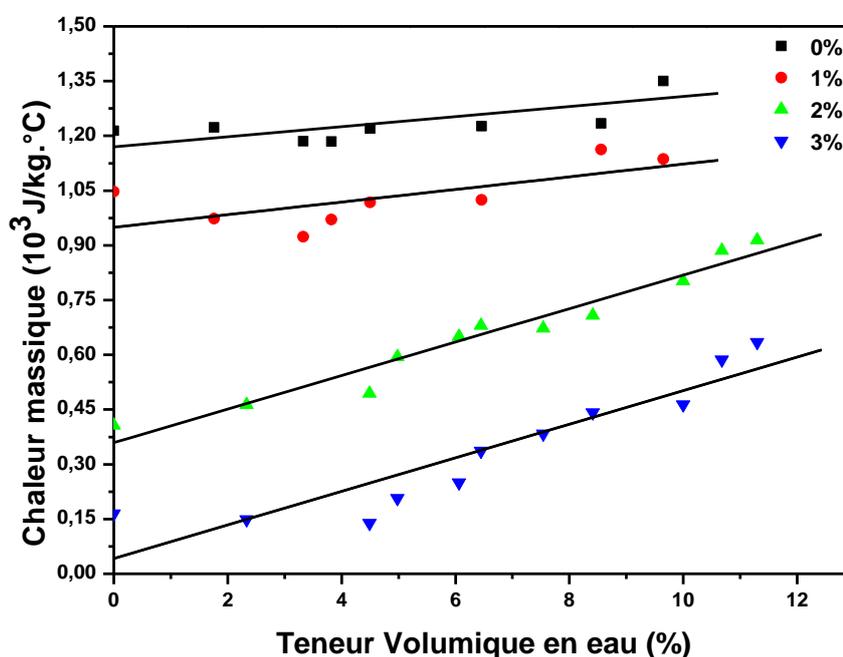
$a$  : Diffusivité thermique,

$C_p$  : Capacité thermique massique,

$\rho$  : Masse volumique,

$\lambda$  : Conductivité thermique

Les valeurs de la capacité thermique des échantillons élaborés (béton classique et bétons avec différents pourcentages de fibres) à divers teneurs volumiques en eau sont reportées sur la figure IV.19.



**Figure IV.26** Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur volumique en eau pour les différents pourcentages de fibres (**modèle de Yezou**)

La méthode de dépouillement des thermogrammes, utilisée est celle de Yezou du fait que ses conditions expérimentales sont proches des nôtres.

L'examen des courbes de la figure IV.26 permet de noter d'une part que celles-ci ont la même allure linéaire et d'autre part que la chaleur massique des différents échantillons diminue avec la proportion de fibres ajoutée [15] ce qui se traduit par une meilleure isolation thermique.

Sachant que l'eau a une capacité thermique massique plus élevée que la plupart des matériaux de construction soit  $4182 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  à température ambiante [19], la teneur en eau d'un matériau poreux peut affecter considérablement sa capacité thermique massique. Cela signifie que la capacité thermique massique sera plus élevée tant que la teneur volumique en eau de ce matériau est élevée.

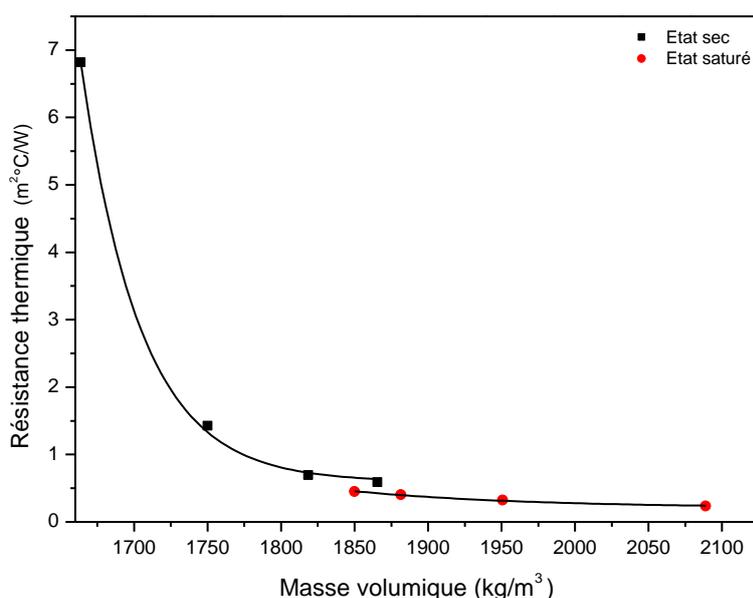
#### IV.6. Résistance thermique

Les matériaux allégés par des fibres végétales ont plusieurs avantages, notamment leurs performances mécaniques, leurs propriétés d'isolation thermique et acoustique, leur capacité à amortir les vibrations et leur légèreté. La résistance thermique de ces matériaux est liée à leur conductivité thermique, qui mesure la facilité avec laquelle la chaleur peut traverser le matériau. Plus la conductivité thermique est faible, plus la résistance thermique est élevée.

Des études ont montré que l'ajout de fibres végétales à des matériaux tels que l'adobe et le mortier peut augmenter leurs performances thermiques et mécaniques [20] et [21]. Citons les travaux de Laborel-Préneron et al. [22], qui consiste en l'ajout de fibres de maïs à l'adobe peut augmenter sa résistance thermique en diminuant sa conductivité thermique. Des mortiers renforcés par des fibres végétales ont également été trouvés pour avoir un bon comportement hygrothermique. Cependant, la résistance thermique spécifique d'un matériau donné dépendra de divers facteurs, tels que le type et la quantité de fibres utilisées, la composition du matériau et le processus de fabrication [23].

Nous présentons dans cette partie, les résultats concernant la résistance thermique des matériaux étudiés.

$$\mathbf{R}_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (4.13)$$



**Figure IV.27** Variation de la résistance thermique du béton allégé en fonction de la densité aux états sec et saturé

Il est évident, à partir de la Figure IV.27, que l'augmentation de l'humidité dans le béton léger étudié se traduit par une réduction de sa résistance thermique, ce qui a un impact négatif sur sa capacité d'isolation thermique. Cette observation peut s'expliquer simplement par le fait que l'eau est un excellent conducteur thermique, ce qui diminue la résistance thermique du béton en remplaçant l'air, un excellent isolant thermique. De plus, on peut constater que la densité du matériau exerce une influence significative sur sa résistance thermique, et donc sur sa capacité d'isolation thermique. En effet, en augmentant la densité du matériau, sa résistance thermique diminue. Il est clair que la porosité du matériau est le facteur déterminant de cette réduction de la résistance thermique.

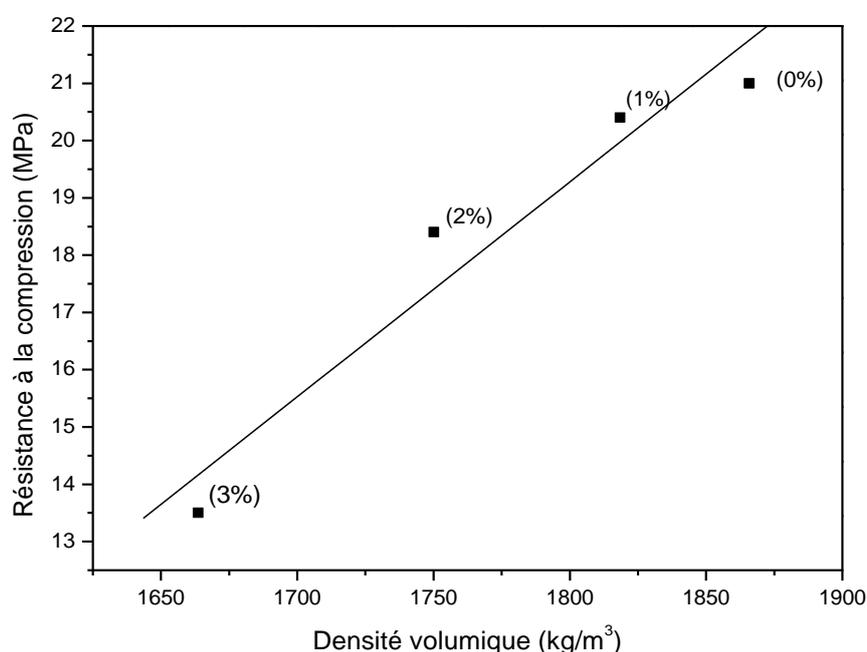
#### IV.7. Etude mécanique : Résistance à la compression

Ces dernières années, une attention croissante a été accordée à la recherche et au développement de matériaux à la fois isolants et porteurs. De nombreuses études ont été entreprises pour créer des éléments de structure destinés à être utilisés dans la construction de murs porteurs pour des maisons individuelles, tout en assurant une performance efficace en matière d'isolation thermique.

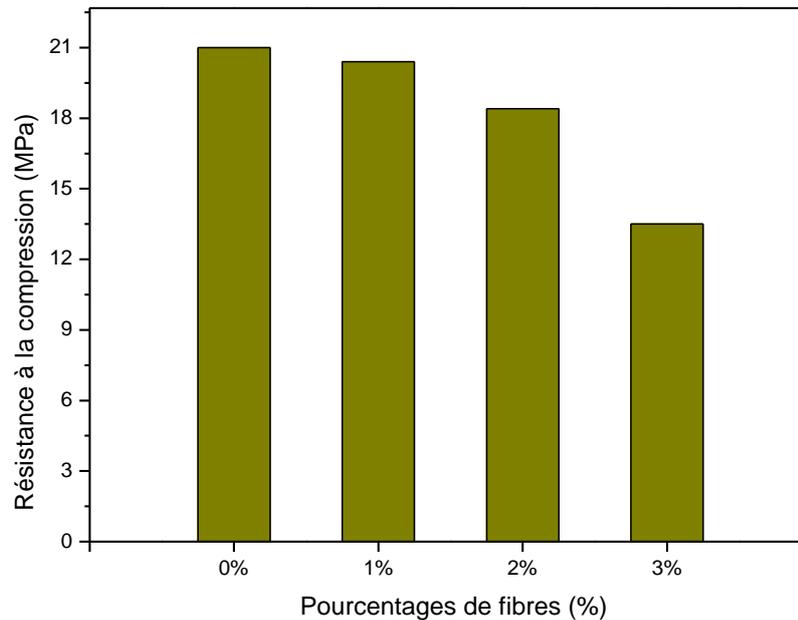
Actuellement, il n'existe aucune norme nationale fixant les valeurs limites des caractéristiques thermiques (conductivité thermique) et mécaniques (résistances à la compression) des matériaux isolants porteurs.

Pour cela une étude expérimentale a été réalisée au sein du laboratoire des travaux publics LTPest . Les mesures ont été réalisées sous une presse automatique de type 101/3000 E de la marque Form-Test Seidner pouvant atteindre une charge de rupture de 3000 kN pour les cylindres.

L'influence de l'ajout des fibres de grignons d'olives sur la résistance est représentée sur les figures IV.28 et IV.29. Nous pouvons observer que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation des pourcentages de fibres de grignons d'olive. Ceci est en accord avec les travaux de Kriker et al. sur un composite de mortier avec fibres de palmier dattier avec des proportions comprise entre 0% et 3%. Il apparait clairement à travers tous les résultats obtenus que lorsqu'on gagne en légèreté du matériau, on améliore son isolation thermique mais on perd en résistance à la compression [25].



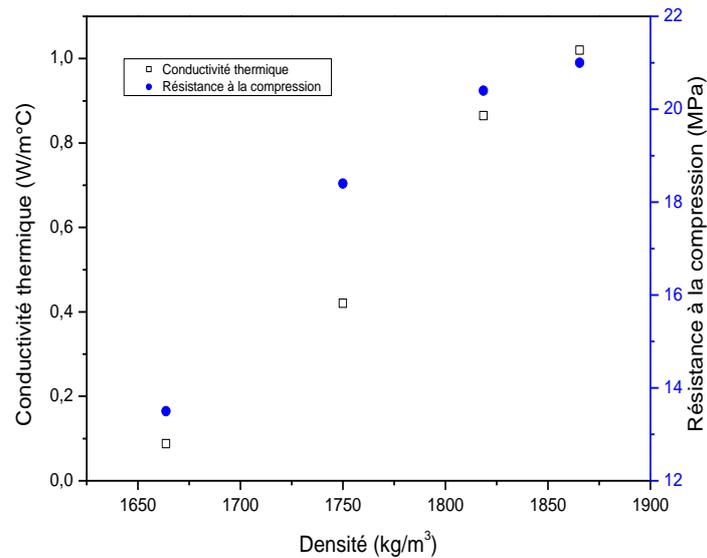
**Figure IV.28** Variation de la résistance à la compression en fonction de la densité volumique des échantillons



**Figure IV.29** Variation de la résistance à la compression en fonction de différents pourcentages de fibres.

L'effet d'ajout de fibres de grignons d'olive sur la variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression est montré clairement sur la figure IV.30.

Ce résultat montre que le béton allégé par les fibres végétales perd son pouvoir d'isolation thermique lorsqu'il devient plus dense donc plus résistant. Ainsi lorsque la densité du béton allégé augmente, sa conductivité thermique augmente également, ce qui diminue son pouvoir d'isolation thermique. Il est donc important de trouver un équilibre entre la résistance à la compression et la conductivité thermique du matériau pour obtenir les meilleures performances possibles. Cela peut être réalisé en optimisant la formulation du matériau, en utilisant des fibres végétales de meilleure qualité ou en modifiant la structure du matériau, sans affecter sa conductivité thermique.



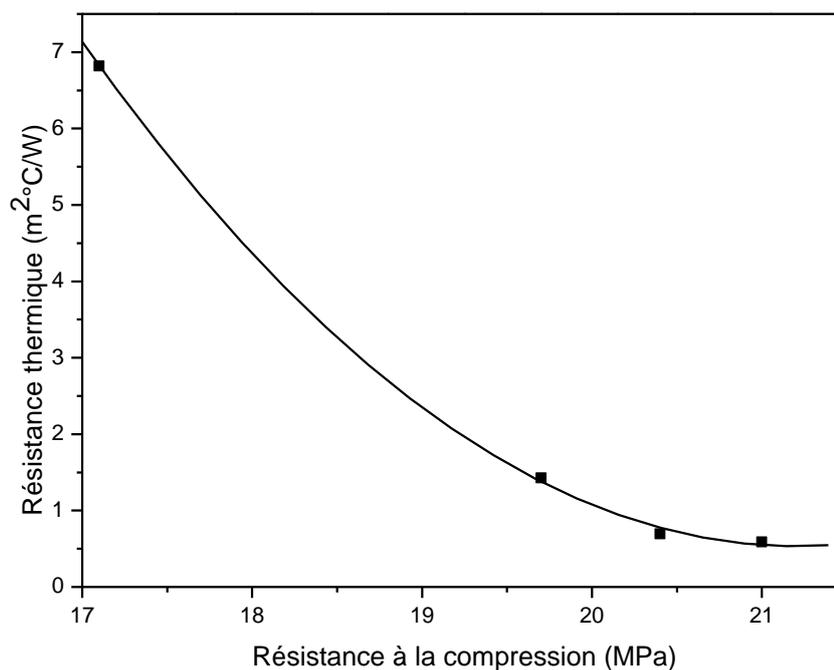
**Figure IV.30** Variation de la conductivité thermique du béton allégé en grignons d'olive en fonction de la résistance à la compression pour divers densités des échantillons

### Effet thermomécanique

En ce qui concerne un matériau destiné à la fois à l'isolation thermique et au support structurel, l'objectif recherché est d'obtenir une résistance thermique maximale tout en maintenant une résistance mécanique élevée, comme illustré dans la figure IV.31.

Notre principal objectif est d'améliorer les propriétés thermiques du béton en incorporant des matériaux isolants lors de son mélange, tout en préservant des performances mécaniques optimales.

L'évolution de la résistance thermique d'un matériau allégé par des fibres végétales en fonction de sa résistance à la compression permet de définir une plage où les valeurs de ces deux caractéristiques sont acceptables [26].



**Figure IV.31** Variation de la Résistance thermique du béton allégé en fonction de la résistance à la compression pour divers échantillons

### Conclusion

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors des essais entrepris sur des bétons à différents proportions de fibres végétales (0%, 1%, 2%, 3%) et différents teneurs en eau, permet de remarquer que l'ajout de fibre végétales qui sont les grignons d'olives épuisés ou bruts semble améliorer les performances thermiques et engendre une baisse significative de la densité, en effet, la majorité des auteurs rapportent que l'ajout des fibres végétales au béton a un effet positif sur sa capacité d'isolation thermique [27], [28] et [29].

Il apparaît en particulier une diminution considérable de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique avec l'augmentation de dosage en fibres.

Aussi il a été montré que les paramètres thermiques ont été fortement influencés par l'humidité contenu dans le matériau, il apparaît en particulier une baisse de la conductivité thermique avec l'augmentation de dosage en fibres, concernant la teneur en humidité, nous avons montré un accroissement très important de la conductivité thermique pour de faibles teneurs en eau puis une augmentation plus lente pour des valeurs moyenne et de nouveau une croissance plus rapide pour des teneurs proches de l'état de saturation.

Lorsqu'on compare les points expérimentaux de conductivité thermique avec ceux obtenus à partir des modèles théoriques déjà présents dans la littérature, on constate que le modèle de Krisher-Kroll s'avère être un choix pertinent pour expliquer l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau. Effectivement, ce modèle prend en considération divers aspects de la réalité physique du matériau.

L'étude de la diffusivité thermique montre que les valeurs dépendent du modèle utilisé pour le dépouillement du thermo-gramme expérimental enregistrée sur la face non irradiée de l'échantillon. Cependant, les courbes qui traduisent l'évolution de la diffusivité en fonction de la teneur en eau donnent un maximum pour une valeur de la teneur volumique de l'eau. De même pour la capacité thermique massique qui varie linéairement avec la variation de la teneur volumique en eau et chute quand le dosage en fibre est plus important.

La résistance à la compression décroît avec l'augmentation du dosage en fibres et l'augmentation de l'isolation thermique.

**Références**

- [1] M. Khelifa, N. Leklou, T. Bellal, R. Hebert, Is alfa vegetal fiber suitable for making green reinforced structure concrete, *European journal of environmental and civil engineering*. 2015.
- [2] Rode, C.; Peuhkuri, R.; Time, B.; Svennberg, K.; Ojanen, T. Moisture Buffer Value of Building Materials. *J. ASTM Int.* 2007, 5, 1–12.
- [3] Momoh, E.O.; Osofero, A.I. Behaviour of oil palm broom fibres (OPBF) reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2019, 221, 745–761.
- [4] F.Benmahiddine, R.Cherif, F.Bennai, R.Belarbi, A.Tahakourt, Effect of flax shives content and size on the hygrothermal and mechanical properties of flax concrete, *Constr. Build. Mater.* 2020, 262, p 1-12.
- [5] M. Fehri, Comportements mécanique et hydrique des composites renforcés par des fibres naturelles et/ou conventionnelles, Thèse de Doctorat. Université de Normandie. Université de Sfax (Tunisie). (2018).
- [6] Rahim, M.; Douzane, O.; Le, A.T.; Langlet, T. Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Constr. Build. Mater.* 2016, pp.111-119,127.
- [7] H. Bal, Y. Jannot, Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium: laterite based bricks with millet waste additive. *Constr Build Mater*; vol.41 pp.586-593, (2013).
- [8] H. Bal, Y. Jannot, Water content dependence of the porosity, density and thermal capacity of laterite based bricks with millet waste additive. *Constr Build Mater*; vol.31:pp.144-150, (2012).
- [9] N. Benmansour, développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, (2015).
- [10] Page, J.; Sonebi, M.; Amziane, S. Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material *Constr. Build. Mater.* 2017, 139, 502–512.
- [11] Al-Mohamadawi, A.; Benhabib, K.; Dheilily, R.-M.; Goullieux, A. Hygric Behavior of a Byproduct of the Linen Industry. *Waste Cement Composites Elaborated with Flax Shives*, *Biomass Valorization* 2019, 11, 5053–5066.
- [12] Benmahiddine, F.; Bennai, F.; Tahakourt, A.; Abahri, K. Effect of flax shives content and size on the hygrothermal and mechanical properties of flax concrete. *Constr.Build.*

- Mater. 2020, 262, 120077.
- [13] K. Amel, M. Bouchiba, Effet des techniques d'extraction des fibres végétales sur leurs caractéristiques physiques chimiques et mécaniques, 2018.
- [14] M. Charai, et al. Thermal performance and characterization of a sawdust-cjy composite material. *Procedia Manuf.* 2020; 46:690-694.
- [15] D. Azzouz, et al. Experimental study of the fibers content effect on the heat insuuulation capacity of new vegetable composite plaster-pea pad fibers. *Sustain. Master Technol.* 2020; 23: e00144.
- [16] M. Boumhaout, et al. Thermomechanical characterization of a bio-composite building material : mortar reinforced with date palm fibers mesh. *Constr. Build. Mater.* 2017;135:241-250.
- [17] T. Nguyen, et al. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Université Bretagne. (2010) pp.168
- [18] M. Khelifa, N. Leklou, T. Bellal, R. Hebert, Is alfa vegetal fiber suitabale for making green reinforced structure concrete, *European journal of environmental and civil engineering.* 2015
- [19] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker, "Mechanical properties and hygrosopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 59, pp. 161-168, 2014.
- [20] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques,thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales:approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de lyon, 2005, pp. 226.
- [21] Rahim, M.; Douzane, O.; Le, A.T.; Langlet, T. Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Constr. Build. Mater.* 2016, pp.111-119,127.
- [22] A. Cherki, B. Remy, Experimental thermal properties characterization of insulating cork- gypsum composite. *Constr Build Mater* 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.076>.
- [23] PS. Ngohe-Ekam, Y. Jannot, Thermophysical characterisation of tropical wood used as building materials: with respect to the basal density. *Const Build Mater*; vol.20 pp.929-938, (2006).
- [24] D. Taoukil, A. Bouardi. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood concrete composite. *Constr Build Mater*; vol.48 pp.104-115.(2013).

- [25] B. Abu-jdaij], et al. Traditional, state-of-the art and renewable thermal building insulation materials : An overview. *Const. Build. Mater.* 214 (2019) 709-735.
- [26] I. Amara, et al. Détermination de la conductivité thermique d'une plaque isolante fabriquée par le ciment et les fibres de palmier: Modélisation et experimentation. *Inter. Journ. Of scient. Research & Eng. Tech.*2016. pp.94-101.
- [27] D. Belkharchouche, A. Chaker. Effets of moisiture on thermal conductivity of the lightened construction material. *Jour. Of Hydr.* Vol.41 issue 17 (2016) pp. 7118-7125.
- [28] D. Belkharchouche, A. Chaker. Thermo-mechanical characterisation of construction material lightened by olive pomace. *Mater. Renew. Sustain. Energy* (2017) 6:15.
- [29] D. Sedan, et al. Propriétés mécaniques de matériaux enchevêtrés à base de fibre de chanvre. *CFM 2007* , France.

Conclusion générale et  
perspectives

## Conclusion générale et perspectives

Ce travail visait à développer un nouveau matériau composite à base de béton et de fibres végétales en vue de son utilisation comme isolant thermique dans le domaine de la construction. Une approche expérimentale a été entreprise pour caractériser les propriétés thermophysiques (conductivité et diffusivité thermiques) ainsi que les propriétés mécaniques des échantillons fabriqués en incorporant différentes proportions de grignons d'olive. L'influence de l'humidité, exprimée par la teneur en eau, sur ces propriétés a été également examinée en détail.

Les résultats expérimentaux obtenus révèlent que l'ajout de fibres végétales, en l'occurrence les grignons d'olive, permet de réduire de manière significative la densité des matériaux tout en améliorant leurs performances thermiques. Cette réduction de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en fibres démontre l'effet bénéfique de l'incorporation de grignons d'olive dans le béton sur son pouvoir d'isolation thermique. Cependant, il est à noter que cette addition favorise également la capacité du matériau à retenir et à fixer l'eau. Les pourcentages retenus dans cette étude sont 1% , 2%, 3% et 4% .

En ce qui concerne l'effet de la teneur en eau sur les propriétés thermiques, il est clair que la conductivité thermique augmente considérablement à faible teneur en eau, puis connaît une augmentation plus lente à des valeurs moyennes avant d'augmenter à nouveau rapidement aux niveaux proches de la saturation. Cette observation met en évidence l'influence significative de l'humidité sur les propriétés thermiques des matériaux, la présence même d'une petite quantité d'eau ayant un impact sur le pouvoir isolant du matériau.

Sur le plan mécanique, il est important de noter que la légèreté accrue résultant de l'ajout de fibres végétales s'accompagne d'une diminution de la résistance mécanique à la compression, due à la réduction de la compacité du matériau. Cependant, les valeurs de résistance mécanique à la compression obtenues au cours de cette étude pour les différents pourcentages retenus demeurent acceptables et compatibles avec l'utilisation de ces matériaux dans le domaine de la construction, notamment pour les bétons légers.

Les principales conclusions de cette recherche mettent en évidence l'importance de choisir soigneusement les proportions d'ajout (grignons d'olive) dans le béton afin d'améliorer ses caractéristiques thermiques, tout en préservant ses performances mécaniques, un paramètre crucial dans le secteur de la construction.

En ce qui concerne les perspectives, plusieurs domaines d'étude peuvent être envisagés. Il serait intéressant d'explorer la durabilité des grignons d'olive dans le béton, ainsi que l'influence de la température sur les propriétés thermophysiques des matériaux, notamment dans des environnements industriels tels que les fours. De plus, la conception de nouveaux composites à base de béton et de fibres artificielles représente une avenue prometteuse pour des recherches futures.

## **RESUME**

Dans le souci de réduire la consommation d'énergie, en constante augmentation ces dernières années, dans le secteur du bâtiment, l'utilisation de matériaux isolants dans l'enveloppe paraît une solution fort attractive. C'est dans cette démarche que s'inscrit ce travail dont l'objectif est de concevoir un nouveau matériau composite à base de béton et de fibres végétales (grignons d'olive) en vue de l'utiliser comme isolant thermique dans le bâtiment.

Une étude expérimentale a été menée pour déterminer les caractéristiques thermo-physiques (conductivité et diffusivité thermiques) et mécaniques des échantillons élaborés à base de béton et avec différentes proportions de grignons d'olive. L'effet de l'humidité (teneur en eau) sur leurs performances a été finement examiné.

Les résultats montrent que l'ajout de fibres (grignons d'olive) au béton conduit à un meilleur pouvoir isolant du matériau résultant (béton allégé) mais affecte ses performances mécaniques. Aussi un choix judicieux de la proportion de l'ajout (grignons d'olives) dans le béton doit être effectué, afin d'améliorer les caractéristiques thermiques (pouvoir isolant) mais pas au détriment des performances mécaniques qui restent le paramètre décisif dans l'emploi de tout matériau dans la construction.

**Mots Clés :** isolation thermique, béton allégé, fibres végétales, grignons d'olive, propriétés thermophysique, méthodes des boîtes.

## **Thermo-physical and mechanical characteristic of a building material: Vegetable fiber concrete**

### **Abstract**

In an effort to reduce energy consumption, which has been steadily increasing in recent years, in the building sector, the use of insulating materials in the envelope seems a very attractive solution. It is in this approach that this work is part of which the objective is to design a new composite material based on concrete and vegetable fibers (olive pomace) for use as thermal insulation in the building.

An experimental study was conducted to determine the thermo-physical (thermal conductivity and diffusivity) and mechanical characteristics of the samples made from concrete and with different proportions of olive pomace. The effect of moisture (moisture content) on their performance has been finely examined.

The results show that the addition of fibers (olive pomace) to the concrete leads to a better insulating capacity of the resulting material (lightened concrete) but affects its mechanical performance. Also a judicious choice of the proportion of the addition (olive pomace) in the concrete must be made, in order to improve the thermal characteristics (insulating power) but not to the detriment of the mechanical performances which remain the decisive parameter in the use of any material in the construction.

**Keywords:** thermal insulation, lightened concrete, vegetable fiber, olive pomace, thermophysical properties, boxes methods.

## الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمواد البناء: خرسانة الألياف النباتية

### ملخص

في محاولة للحد من استهلاك الطاقة، والذي يتزايد باطراد في السنوات الأخيرة، في قطاع البناء، يبدو استخدام المواد العازلة في المظروف حلاً جذاباً للغاية. وفي هذا النهج، يكون هذا العمل جزءاً منه الهدف هو تصميم مادة مركبة جديدة تعتمد على الألياف الخرسانية والخضراء (ثقل الزيتون) لاستخدامها كعزل حراري في المبنى أجريت دراسة تجريبية لتحديد الخصائص الفيزيائية الحرارية (الموصلية الحرارية والانتشار) والخصائص الميكانيكية للعينات المصنوعة من الخرسانة وبنسب مختلفة من ثقل الزيتون تم فحص تأثير الرطوبة (محتوى الرطوبة) على أدائها بدقة.

أظهرت النتائج أن إضافة الألياف (ثقل الزيتون) إلى الخرسانة يؤدي إلى قدرة عازلة أفضل للمواد الناتجة (الخرسانة الخاطفة) ولكنه يؤثر على أدائها الميكانيكي. كما يجب أن يكون الاختيار الحكيم لنسبة الإضافة (ثقل الزيتون) في الخرسانة، من أجل تحسين الخصائص الحرارية (الطاقة العازلة) ولكن ليس على حساب الأداء الميكانيكي الذي يبقى المعلمة الحاسمة في استخدام أي مواد في البناء.

**كلمات مفتاحية:** عزل حراري، خرسانة، ألياف نباتية، ثقل زيتون، خواص فيزيائية حرارية