

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université El-Hadj Lakhdar - BATNA 1

Faculté des Sciences de la Matière

Département de Physique



THÈSE

En vue de l'obtention du
Diplôme de Doctorat troisième cycle (LMD)

Présenté par :
Bourhaneddine HABA

Thème :

**Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques
des matériaux biosourcés et locaux**

Domaine : Sciences de la Matière
Filière : Physique
Spécialité : Energétique
Intitulé de la Formation : Energétique et développement durable

Soutenue le 18 /12 / 2017

Devant le jury :

Président :	Khaldi Fouad	Pr.	Université Batna1
Rapporteur :	Agoudjil Boudjemaa	Pr	Université Batna 1
Co-rapporteur	Boudenne Abderrahim	M.C	Université Paris-Est
Examineurs :	Bouras Fethi	M.C.A	Université El-Oued
	Aksas Mounir	Pr.	Université Batna 1

Tables des matières

Introduction	i
--------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art sur les matériaux biosourcés pour l'habitat

I. Introduction.....	1
II. Contexte environnemental	1
II.1. Changement climatique et impact du secteur du bâtiment	1
II.2. Contribution des matériaux de construction	3
III. Ecomatériaux et enjeux de développement durable	4
III.1. Matériaux biosourcés.....	5
IV. Bois de palmier dattier	6
IV.1. Palmier dattier et valorisation des déchets	6
IV.2. Propriétés de bois de palmier dattier	8
IV.2.1. Structure et morphologie	8
IV.2.2. Propriétés thermophysiques	9
IV.2.3. Propriétés mécaniques	11
IV.2.4. Propriétés chimiques.....	12
IV.2.5. Propriétés hydrophiliques	13
V. Composites à base de bois de palmier dattier.....	14
V.1. Fibres de palmier dattier	15
V.2. Composite à base de gypse	16
V.2.1. Préparation des composites	16
V.2.2. Propriétés mécaniques.....	16
V.2.3. Propriétés thermophysiques	17
V.2.4. Composites optimaux.....	18
V.3. Composite à base de ciment	19
V.3.1. Préparation des composites	19
V.3.2. Propriétés thermophysiques	20
V.3.3. Propriétés mécaniques.....	21
V.3.4. Composites optimaux.....	22
VI. Béton de chanvre : matériau de construction concurrentiel	23
VII. Objectif de l'étude	25
VIII. Conclusion.....	25

Chapitre II : Propriétés hygrothermiques de béton de palmier dattier : Etude théorique et expérimentale

II. Introduction	29
III. Comportement hygrothermique	29
III.1. Généralités	29
III.2. Transfert et stockage hygrothermique : Analyse théorique.....	30
III.2.1. Transfert et stockage de chaleur.....	30
III.2.2. Transfert et stockage d'humidité	31
III.2.3. Transfert et stockage de chaleur et d'humidité	33
IV. Matériau : Béton de palmier dattier (DPC).....	34
IV.1. Composants du matériau	34
IV.1.1. Ciment Portland (CP)	34
IV.1.2. Granulats.....	35
IV.1.3. Eau de mélange.....	35
IV.1.4. Fibres de palmier dattier (DPF)	35
IV.2. Concentration massique des composants	36
V. Etude expérimentale des propriétés hygrothermiques.....	37
V.1. Porosité	37
V.1.1. Porosité totale.....	38
V.1.2. Porosité ouverte.....	40
V.2. Absorption d'eau et cinétique de séchage	41
V.2.1. Saturation libre vs. Saturation sous vide	41
V.2.2. Succion capillaire	42
V.2.3. Cinétique de séchage.....	44
V.3. Perméabilité à la vapeur d'eau.....	45
V.4. Isotherme de sorption	47
V.4.1. Analyse expérimentale de l'isotherme de sorption	47
V.4.2. Modélisation de l'isotherme de sorption.....	50
V.5. Diffusivité hydrique.....	52
V.6. Conductivité thermique	54
VI. Conclusion	55

Chapitre III : Résultats et discussions

III. Introduction	58
IV. Béton de palmier dattier (DPC)	58

V. Masse volumique et porosité	59
VI. Absorption d'eau et cinétique de séchage	60
VI.1. Absorption d'eau	60
VI.1.1. Saturation libre vs saturation sous vide	60
VI.1.2. Succion capillaire.....	63
VI.2. Cinétique de séchage	66
VII. Perméabilité à la vapeur d'eau.....	68
VIII. Isotherme de sorption	70
IX. Diffusivité hydrique	72
X. Conductivité thermique	77
XI. Conclusion	80

Chapitre IV : Etude numérique de transfert hygrothermique à l'échelle mur

IV. Introduction	84
V. Comportement hygrothermique à grande échelle.....	84
V.1. Echelle composant ou système	85
V.1.1. Système de mur	85
V.2. Fonctionnement hygrothermique des matériaux biosourcés	86
VI. Prédiction numérique du comportement hygrothermique	88
VI.1. Modèles numériques.....	88
VI.1.1. Modèle WUFI®	89
VI.2. Prédiction des risques majeurs liés à l'humidité.....	93
VI.2.1. Condensations superficielles et moisissures	93
VI.2.2. Condensations interstitielles	95
VII. Etude numérique de transfert hygrothermique à travers le béton de palmier dattier.....	95
VII.1. Propriétés intrinsèques des matériaux étudiés.....	97
VII.2. Sollicitations estivales.....	98
VII.2.1. Transfert de chaleur seulement.....	98
VII.2.2. Transfert simultané de chaleur et d'humidité.....	101
VII.3. Sollicitations hivernales	101
VII.3.1. Condensations superficielles et moisissures.....	102
VII.3.2. Risque de gel	105
VII.3.3. Confort.....	106
VIII. Conclusion.....	107

Conclusion générale et perspectives.....	110
Annexes	114

Introduction

I. Introduction

Le développement durable est l'un des principaux défis dans ces dernières décennies. Il est basé sur la promotion de la conscience environnementale concernant la nécessité de limiter les impacts de l'activité humaine sur l'environnement.

En Algérie, la consommation d'énergie a connu une croissance accrue, principalement due à l'amélioration du niveau de vie des citoyens. L'efficacité énergétique s'impose comme une réponse appropriée à cette problématique. Le programme d'efficacité énergétique à l'horizon 2030 de L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) s'intéresse à l'ensemble des secteurs de consommation qui ont un impact significatif sur la demande d'énergie : il s'agit du bâtiment, du transport et de l'industrie [1]. L'objectif de ce programme est de réduire la consommation énergétique de 9% à travers l'introduction des équipements et des technologies performantes. Ce programme présente plusieurs axes d'intervention sur l'ensemble des secteurs. Concernant le secteur du bâtiment, ce programme consiste en l'introduction et la diffusion des pratiques et des technologies innovantes autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles [1].

La construction naturelle est un moyen de parvenir à une construction plus durable. Elle favorise les matériaux, les technologies et les méthodes de construction qui peuvent contribuer à réduire considérablement la consommation des ressources et d'énergie, et offre une meilleure efficacité énergétique sans provoquer de pollution ou affecter la santé et les écosystèmes [2].

La prise de conscience environnementale encourage l'utilisation des matériaux de construction verts à haute performance thermique afin de réduire la consommation d'énergie et de matières premières non renouvelables.

Dans les années récentes, l'attention s'est concentrée sur la recherche de remplacer le béton traditionnel en tant que matériau de construction principal, avec des matériaux biosourcés offrant des performances thermiques et environnementales compétitives. Parmi les matériaux biosourcés, on peut citer les matériaux composites à base de liants minéraux chargés avec des particules ou des fibres végétales. L'utilisation des matériaux végétales présente de nombreux avantages : (i) ressources renouvelables, (ii) disponibles dans la nature à faible coût

économique et (iii) neutre vis-à-vis des émissions de CO₂. En outre, ils peuvent être utilisés pour alléger les mélanges de béton.

Dans ce cadre, le principal objectif de notre projet de recherche est le développement des matériaux composites chargés avec fibres de palmier dattier dédiés aux applications d'isolation thermique dans la construction.

La problématique majeure de ce travail, c'est : Quelles sont les propriétés hydriques et la conductivité thermique de ce type de matériau ? Et Comment sera son comportement hygrothermique à l'échelle mur ?

Ce mémoire de thèse se divise en quatre parties. Le premier chapitre rappelle tout d'abord le contexte environnemental concernant le changement climatique et l'impact du secteur du bâtiment. Les concepts d'écomatériaux et matériaux biosourcés seront également précisés dans cette partie. Les parties suivantes constituent une recherche bibliographique sur le bois de palmier dattier et ces principales propriétés, ainsi que les matériaux composites à base de bois de palmier dattier et les principaux résultats expérimentaux. Une synthèse des travaux antérieurs sera présentée, il s'agit des travaux menés sur le développement d'un écomatériau de construction prometteur : le béton de chanvre.

Le deuxième chapitre concerne l'étude des propriétés hydriques et thermiques de béton de palmier dattier. Le transfert et le stockage hygrothermique seront tout d'abord analysés théoriquement. La mise en œuvre de béton de palmier dattier et leurs principaux constituants seront présentés dans un deuxième temps. Les différentes méthodes expérimentales pour l'étude des propriétés hydriques et thermiques de béton de palmier dattier seront notamment décrites.

Le troisième chapitre concernera la diffusion des résultats expérimentaux de l'étude hygrothermique à l'échelle matériau. Dans cette partie, nous discuterons les propriétés hydriques de béton de palmier dattier ainsi que l'influence de la température sur la conductivité thermique pour les deux (2) états sec et humide. Les résultats seront comparés à plusieurs matériaux de construction.

Le travail qui sera présenté dans les chapitres 2 et 3 a été publié dans le document de Haba et al [3].

La dernière partie de cette thèse portera sur la prédiction numérique du comportement hygrothermique de béton de palmier dattier à l'échelle mur en utilisant l'outil numérique WUFI® sous des sollicitations estivales ainsi que les risques majeurs liés à l'humidité qui peuvent se produire sous des sollicitations hivernales. Le travail de ce chapitre sera basé sur les résultats publiés en [3].

Références

- [1] "Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030," APRUE, Ministère de l'Energie et des Mines, Algérie, 2015.
- [2] T. Colinart, P. Glouannec, and P. Chauvelon, "Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 372-380, 2012.
- [3] B. Haba, B. Agoudjil, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 963-971, 2017.

Chapitre I : Etat de l'art sur les matériaux biosourcés pour l'habitat

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons de faire un état de l'art concernant tout d'abord le contexte environnemental. Le changement climatique, l'impact du secteur du bâtiment et la contribution des matériaux de construction seront présentés.

Dans un deuxième temps, nous définirons la notion de développement durable en génie civil. Nous présenterons aussi les thématiques écomatériaux et matériaux biosourcés.

La troisième partie sera constituée d'une recherche bibliographique sur le palmier dattier en Algérie et la valorisation des déchets. Les propriétés principales de bois de palmier dattier seront rapportées dans cette partie.

Dans la partie suivante de ce chapitre, nous rappellerons les travaux antérieurs concernant les matériaux composites à base de bois de palmier dattier. La préparation des fibres, les composites à base de gypse et les composites à base de ciment seront présentés ainsi que les principaux résultats.

Enfin, nous définirons un matériau de construction concurrentiel connu par le béton de chanvre. Les principales caractéristiques ainsi que les nouvelles recherches sur ce matériau innovant seront présentés dans ce chapitre.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous mentionnerons l'objectif de cette étude. Cette partie comprendra des informations sur l'originalité de cette étude et sa relation avec les travaux précédents.

II. Contexte environnemental

II.1. Changement climatique et impact du secteur du bâtiment

Le changement climatique représente une menace grave pour la société humaine (par exemple, l'accès à l'eau, la sécurité alimentaire, la santé) et pour la planète. Causé par l'activité humaine, cette menace est maintenant documentée par un travail scientifique et interdisciplinaire qui le rend incontestable [1] :

- La hausse de la température moyenne mondiale pourrait atteindre jusqu'à 4.8°C à la fin du siècle.

- Une élévation de niveau de la mère, jusqu'à un mètre en 2100.
- Augmentation des événements météorologiques extrêmes (des sécheresses et progression des zones désertiques, etc.).

L'accord de Paris (2015) réaffirme la nécessité de la coopération la plus large possible de tous les pays pour accélérer la réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre et de limiter l'augmentation de la température mondiale moyenne à moins de 2°C (suivre les efforts pour limiter le réchauffement climatique à 1.5°C à 2100). Dans ce contexte, plusieurs solutions ont été proposées afin de limiter les effets du réchauffement climatique en raison des émissions de gaz à effet de serre notamment le CO₂, parmi eux [1] : la réduction progressive de l'utilisation de l'énergie fossile ; la transition vers un modèle économique bas carbone ou décarboné.

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus consommateurs d'énergie et qui a un effet sur le changement climatique. L'analyse de cycle de vie des bâtiments est une méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts des bâtiments.

La norme Européenne EN 15804 fixe le cadre des analyses de cycle de vie (ACV) des bâtiments par quatre (4) phases obligatoires (Figure I.1) [2] :

- i. Produit de construction qui comporte les phases de l'extraction, le transport des matières premières jusqu'à l'usine ainsi que le procédé de fabrication.
- ii. Construction qui inclut le fret et le chantier.
- iii. Utilisation qui comporte la maintenance, le remplacement des composants, les consommations d'énergie et les consommations d'eau.
- iv. Fin de vie qui inclut les phases de démolition (ou déconstruction de l'ouvrage), le transport des matériaux et leur traitement dans une filiale spécialisée.



Figure I.1. Phases d'analyse de cycle de vie des bâtiments.

Durant toute la durée de sa vie, le bâtiment peut fortement affecter la consommation d'énergie (transport, processus de construction, chauffage, éclairage, etc.) et l'environnement à travers la consommation des ressources naturelles (roches, bois, eau, etc.) [3].

En l'Algérie, l'installation des équipements de chauffage et de climatisation "grand consommateur d'énergie" dans les bâtiments est devenu très coûteuse faute d'isolation thermique. La consommation du secteur du bâtiment a été estimée à plus de 40% de la consommation globale d'énergie selon l'APRUE (l'agence de la promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie). En outre, 60% à 80% de cette consommation est perdue, majoritairement à travers les toits, les murs et les sols [4]. La meilleure isolation de l'enveloppe mènera à un habitat basse consommation énergétique. Selon des experts, réaliser des bâtiments avec bonne et efficace isolation thermique n'implique qu'un surcoût de 10-15% mais permettra d'économiser 40% de la consommation énergétique [4].

II.2. Contribution des matériaux de construction

Concernant la partie des matériaux de construction, l'analyse de cycle de vie (ACV) des bâtiments s'appuient généralement sur des déclarations environnementales pour les matériaux de construction.

Les principaux matériaux utilisés dans la construction sont l'acier, le bois, le verre, mais c'est le béton qui est le matériau le plus utilisé. Ce matériau est difficile à remplacer dans la construction en raison de sa résistance à la compression qui est associée à un coût raisonnable. Cependant, l'empreinte écologique est le point noir de béton car sa fabrication est basée sur un matériau peu écologique, le ciment. Pour faire une tonne de ciment, environ 400 kg de CO₂ peuvent être émis dans l'atmosphère.

Face à ces préoccupations environnementales, le choix des matériaux adéquats est une bonne solution pour limiter l'impact sur l'environnement et assurer un milieu intérieur confortable. Ce choix doit se baser sur de nombreux critères : (i) l'économie (de point de vue énergétique et financier), (ii) l'esthétique et l'impact environnemental [5].

Dans ce contexte, le développement des matériaux de construction respectueux de l'environnement s'impose comme une problématique prioritaire. Ces matériaux doivent limiter la consommation énergétique du secteur du bâtiment liée à leur qualité thermique, et

participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de leur durée de vie.

III. Ecomatériaux et enjeux de développement durable

Le développement durable a été défini comme une nouvelle conception de l'intérêt général menant à une politique de développement qui s'efforce de concilier la protection de l'environnement, l'efficacité économique et la justice sociale, en vue de répondre aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins [6].

La Figure I.2 présente les principaux piliers du développement durable. L'objectif de cette démarche est d'aboutir à un développement économiquement viable "satisfaction des besoins humains", socialement équitable et écologiquement viable "empreinte écologique".

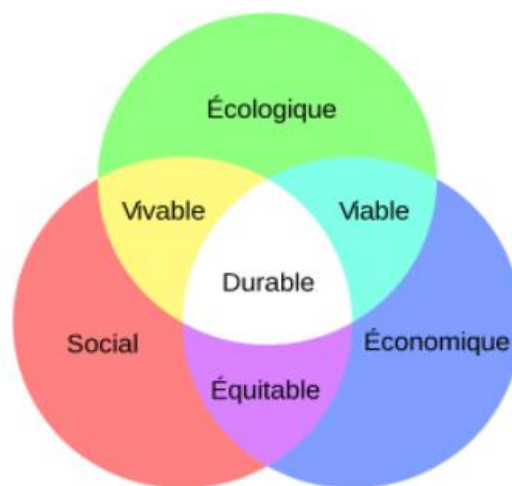


Figure I.2. Piliers du développement durable.

La prise en compte des piliers du développement durable dans le génie civil peut contribuer à la réduction des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie des bâtiments tout en assurant leur qualité d'usage [6].

La thématique *matériaux et écologie* conduit à évoquer *ecomatériau*. C'est un matériau clé de la construction écologique et répond aux critères techniques habituellement exigés des matériaux de construction (confort, sanitaire), mais aussi à des critères environnementaux (Figure I.3).

Le matériau de construction a-t-il un impact sur la santé des habitants ? Diverse études ont révélé que la qualité de l'air intérieur peut être influencée par des substances nocives émises par certains matériaux de construction. En revanche, les écomatériaux peuvent être plus sains et durable pour l'utilisation sans impact sur la santé des habitants tout au long de leur durée de vie.

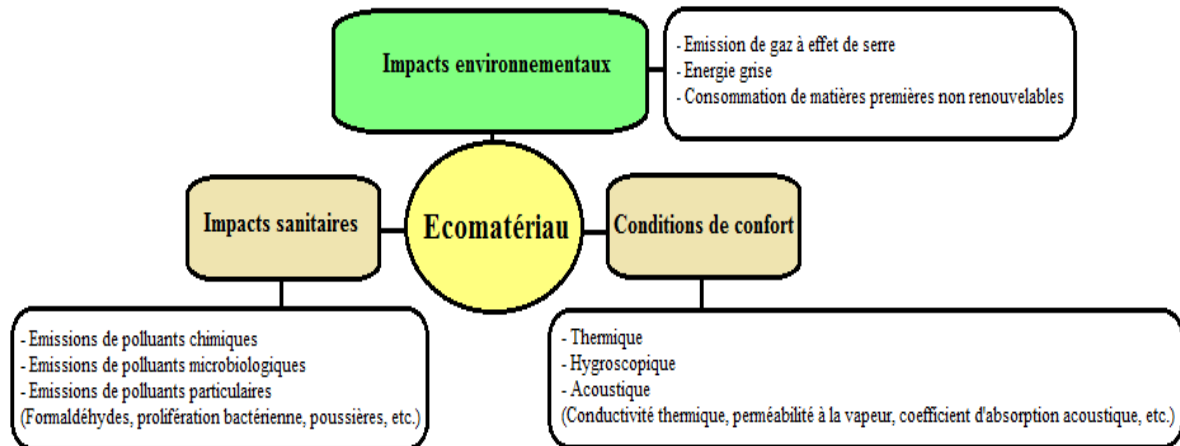


Figure I.3. Propriétés caractéristiques d'un écomatériau [7].

III.1. Matériaux biosourcés

Renouvelable, respectueux de l'environnement, à faible coût et à haute résistance thermique, sont les caractéristiques le plus demandés dans le domaine de matériau de construction [8]. Dans ce contexte, les matériaux biosourcés sont des matériaux dont la matière première est issue de biomasse animale ou végétale. Parmi eux, on trouve principalement des isolants qu'ils soient en rouleaux, en panneaux ou en vrac (laine, chanvre, paille, etc.). Les bétons biosourcés sont des matériaux composites constitués des particules ou fibres végétales et un liant à base minéral. Ces matériaux biosourcés présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de matériaux, parmi eux, faible impact sur l'environnement, matières premières renouvelables et matériaux économiquement concurrentiel.

Selon Liu et *al* [8], l'intérêt des matériaux biosourcés pour l'isolation a nettement augmenté à partir de 2003, mais après 2010, le nombre des travaux de recherche a fortement augmentée. Ces auteurs ont révélé que L'Algérie figure parmi les cinq (5) premiers pays dans la recherche sur les matériaux biosourcés pour l'application en isolation thermique. Les matériaux biosourcés favorables à la recherche en Europe et au Royaume-Unis sont le chanvre, le lin et

les pailles. En Algérie, les matériaux favorables à la recherche sont le bois, la paille et le palmier dattier.

IV. Bois de palmier dattier

IV.1. Palmier dattier et valorisation des déchets

Selon les statistiques récentes (2015) du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, le palmier dattier occupe en Algérie une superficie évaluée à 167.000 hectares pour un nombre de palmier estimé à plus de 18.6 millions d'unités.

Les régions phoenicoles se situent généralement au sud de l'atlas saharien et couvrent 16 wilayas. Les wilayas de Biskra et d'El Oued sont les premières régions phoenicoles avec respectivement 27.4% et 22% de la superficie totale, et respectivement 23.1% et 22.4% du nombre total de palmiers dattiers.

Le palmier dattier (Figure I.4) peut vivre jusqu'à un âge d'environ 200 ans, et peut atteindre une hauteur de plus de 80 pieds (environ 24 mètres). Les opérations de nettoyage des palmiers dattiers consistent principalement à éliminer les organes végétatifs qui ne sont plus fonctionnels, en particulier les palmes sèches. Le nombre des palmes peut atteindre 50 à 200 chez un arbre adulte, avec une durée de vie de trois à sept ans, selon la variété et le mode de culture [9].



Figure I.4. Forêt de Palmier dattier.

Une palme ou *djerid* (Figure I.5) est une feuille composée de plusieurs parties principales : (i) base pétiolaire ou *kornaf*, (ii) rachis ou pétiole qui porte les épines, *chouks* et les folioles. Les épines et les folioles sont disposées en position généralement oblique le long du rachis [9].

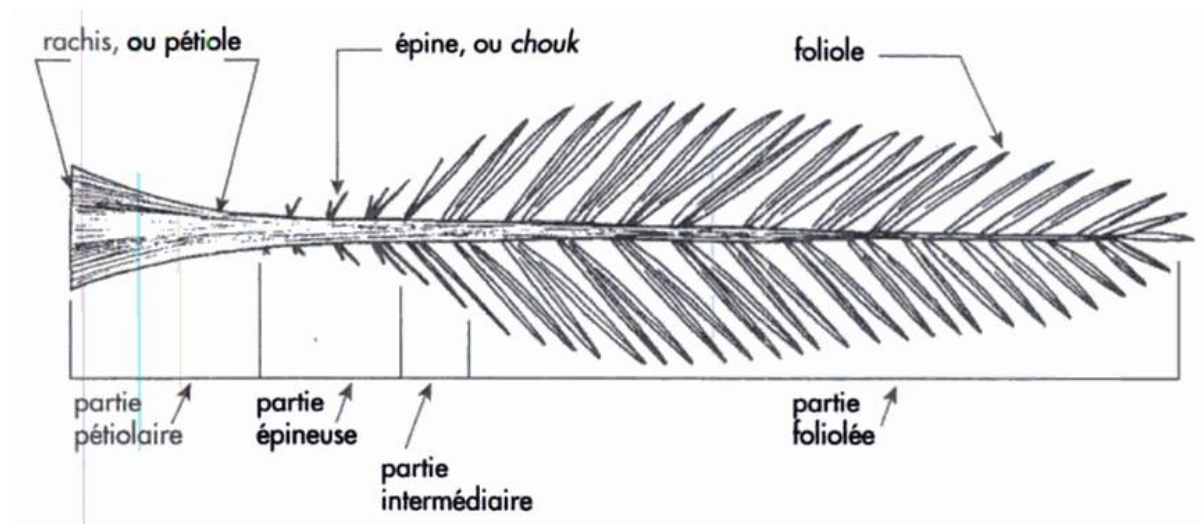


Figure I.5. Schéma d'une palme [9].

La seule partie utile de la palme sèche est la partie foliolée, tandis que la partie restante est jetée comme déchet d'agriculture sans aucune valeur économique (Figure I.6).

L'idée consiste à utiliser cette ressource naturelle renouvelable (déchet de palmier dattier) dans de nombreux domaines, ce qui aurait un impact positif sur notre environnement et contribuerait à réduire la consommation de matières premières non renouvelables.

Dans le cadre de la définition de ce matériau naturel, plusieurs travaux dans la littérature ont été consacrés à l'étude des propriétés thermophysiques, mécaniques, chimiques et hydrophiliques.



Figure I.6. Bois de palmier dattier [10].

IV.2. Propriétés de bois de palmier dattier

IV.2.1. Structure et morphologie

Le bois de palmier dattier a une structure fibreuse. Les images MEB de la fibre de pétiole présente une surface cylindrique et irrégulière avec de nombreuses impuretés, cellules et pores (Figure I.7).

L'analyse de la structure et de la morphologie d'un autre type de fibre de palmier dattier (fibres entourant la tige de palmier dattier) a révélé des résultats similaires (Figure I.8). La fibre de palmier dattier est de forme cylindrique. L'image MEB montre que la surface extérieure n'est pas lisse et recouverte d'impuretés artificielles (sable et poussière) et de la lignine résiduelle. En outre, la vue transversale révèle que la fibre de palmier dattier est une collection de fibres multicellulaires chacune contenant un vide central (lumen), ces fibres ont un diamètre d'environ 2 – 5 μm .

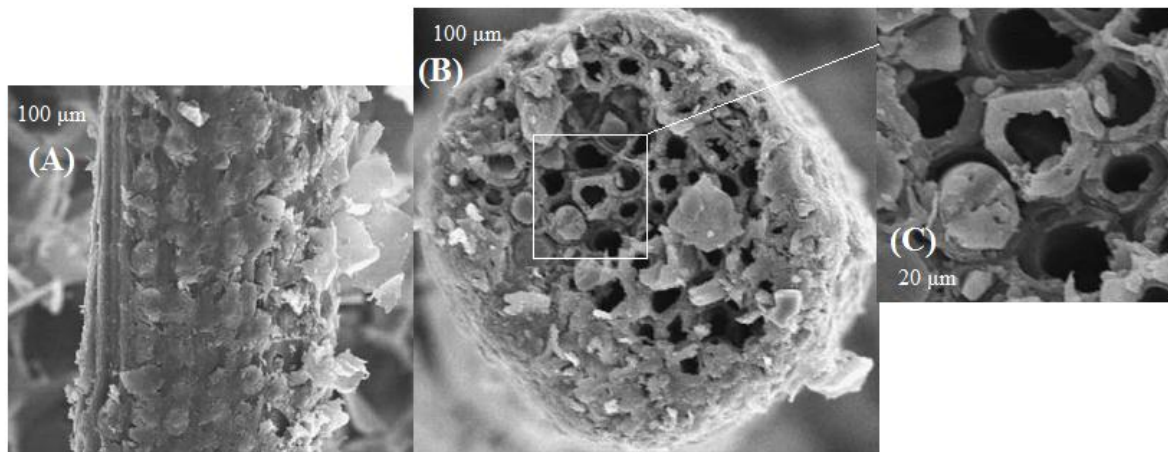


Figure I.7. Images MEB d'une fibre de bois de palmier dattier : vue longitudinale (A), vue transversale (B), zoom de la vue transversale (C) [10].

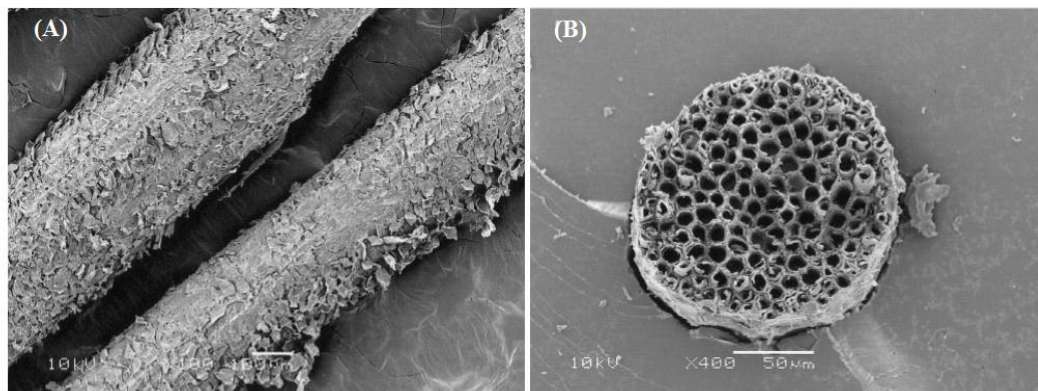


Figure I.8. Images MEB d'une fibre de palmier dattier : vue longitudinale (A), vue transversale dans une matrice polymère (B) [11].

IV.2.2. Propriétés thermophysiques

Les propriétés thermophysiques de bois de palmier dattier ont été étudiées en utilisant des échantillons sous forme de plaque carrée (*kornaf*) (Figure I.9).

Les résultats de l'étude thermophysique ont révélés que [10] :

- L'effet de l'orientation des fibres sur la conductivité thermique est négligeable.
- Les variétés de palmier dattier ont un faible effet sur la conductivité thermique avec une valeur moyenne de $0.083 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ mesurée à la pression atmosphérique.

- La conductivité thermique de bois de palmier dattier est proche de la gamme de nombreux matériaux naturels d'isolation.
- La masse volumique de bois de palmier dattier est légèrement supérieure à celle de liège et du chanvre (276 kg.m^{-3} pour la partie pétiole de palmier dattier de type Deglet-Noor).

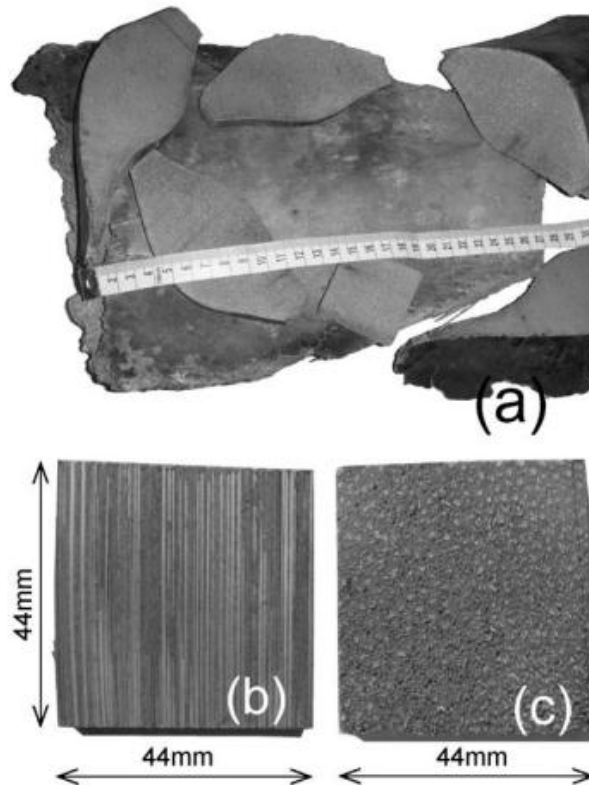


Figure I.9. Base pétiolaire (ou kornaf) (a), échantillons avec différentes directions des fibres (b), (c) [10].

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique (perte de masse vs. température) sur les fibres entourant la tige de palmier dattier ont révélé que la température de dégradation est d'environ 250°C . Ces résultats sont comparables à ceux obtenus avec d'autres types de fibres naturelles telles que le sisal [11].

Enfin, les auteurs [10] ont indiqué que le bois de palmier dattier est un bon candidat pour le développement des matériaux moins coûteux pour l'application dans le domaine de l'isolation thermique.

IV.2.3. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier ont été déterminées et comparées à d'autres fibres naturelles (Tableau I.1).

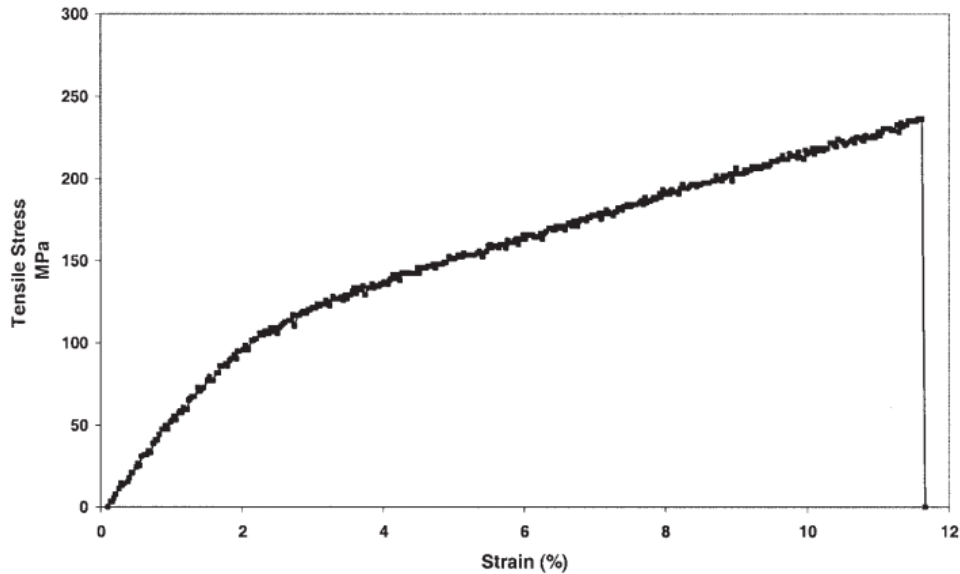


Figure I.10. Courbe typique contrainte-déformation des fibres de palmier dattier (10 mm de longueur) [11].

La courbe contrainte-déformation (Figure I.10) est caractérisée par une région initiale linéaire suivie par une courbure indiquant l'augmentation de taux de déformation avec la contrainte. Ce comportement est similaire à d'autres types de fibres naturelles [11].

Les valeurs typiques de la résistance à la traction des fibres de palmier dattier se situaient entre 170 et 275 MPa, tandis que les valeurs pour le module de Young se situaient entre 5 et 12 GPa. En outre, l'allongement à la rupture se situait entre 5 et 10%.

Selon la comparaison faite dans le Tableau I.1, la résistance à la traction des fibres de palmier dattier est faible par rapport aux autres fibres naturelles. En outre, une observation similaire peut être faite sur le module de Young.

Ces faibles propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier peuvent être attribuées à leurs grands diamètres qui se situaient entre 100 et 1000 μm (Figure I.11) [11]. Cette gamme de diamètre est plus grande en général que les autres fibres naturelles.

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques de certaines fibres naturelles [12].

Fibre	Résistance à la traction	Module de Young	Allongement à la rupture
	MPa	GPa	%
Palmier dattier*	170 – 275	5 – 12	5 – 10
Chanvre	690	70	1.6
Sisal	511 – 635	9.4 – 22	2.0 – 2.5

*Fibre naturelle entourant la tige de palmier dattier.

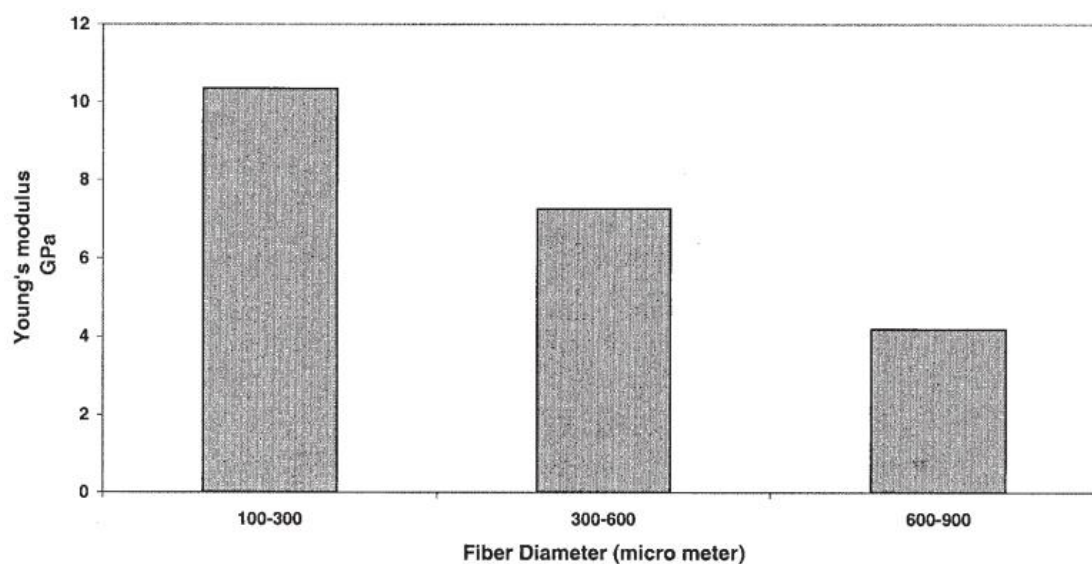


Figure I.11. Module de Young de fibre de palmier dattier en fonction du diamètre de la fibre [11].

IV.2.4. Propriétés chimiques

Les compositions chimiques des fibres de palmier dattier par rapport aux autres fibres naturelles sont présentées dans le Tableau I.2.

A sec, tous les murs de cellules végétales sont principalement constitués de polymères à base de sucre (cellulose, hémicelluloses) qui sont combinés avec de la lignine [12].

Tableau I.2 : *Composition chimique de certaines fibres naturelles [11, 12].*

Fibre	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine
	% _{masse}	% _{masse}	% _{masse}
Palmier dattier*	46	18	20
Chanvre	68	15	10
Sisal	65	12	9.9

*Fibre naturelle entourant la tige de palmier dattier.

Il est très clair que la grande quantité de cellulose est une bonne indication de la résistance de la fibre. Les fibres de chanvre, qui ont la plus grande résistance à la traction (Tableau I.1), ont en même temps la plus grande teneur en cellulose (Tableau I.2). La fibre de palmier dattier a 18%_{masse} d'hémicelluloses et 20%_{masse} de lignine. La quantité d'hémicelluloses est similaire à celle des fibres naturelles usuelles. Cependant, la teneur en lignine est généralement supérieure à celle des fibres usuelles. La teneur en lignine des fibres peut influencer leur structure, leurs propriétés et leur morphologie [11].

L'analyse chimique des fibres de palmier dattier mentionnées dans le Tableau I.2 pourrait être affectée par l'origine de la plante, la qualité du sol et les conditions météorologiques [11].

IV.2.5. Propriétés hydrophiliques

Le caractère hydrophile de fibres de palmier dattier a été comparé à d'autres fibres naturelles usuelles et les résultats sont présentés dans le Tableau I.3.

Dans un premier temps, on peut constater que l'absorption d'eau des fibres naturelles est très élevée ; elles ont la capacité, pour la majorité d'entre elles, d'absorber une masse d'eau supérieure à leur propre masse [7]. La fibre naturelle a une teneur élevée en hydroxyle de la cellulose qui la rend susceptible d'absorber de l'eau : les molécules réagissent avec le groupe hydroxyle (-OH) des molécules de cellulose pour former des liaisons hydrogènes [13].

Nous remarquons que l'absorption d'eau par les fibres de palmier dattier est relativement similaire à celle du sisal, plus élevée que celle de fibres de chanvre. Cette variation de la

capacité d'absorption d'eau des fibres naturelles peut être attribuée à la taille de fibre et à la teneur en cellulose.

Tableau I.3 : *Absorption d'eau de certaines fibres naturelles usuelles [7, 14].*

Fibre	Absorption à la saturation
	%
Palmier dattier*	241
Chanvre	158
Sisal	190 – 250

*Fibre naturelle à partir de broyage de bois de palmier dattier.

V. Composites à base de bois de palmier dattier

Un composite est un matériau qui combine les propriétés de ses composants pour permettre d'améliorer certaines caractéristiques qui seront mieux adaptés à certaines applications, comme la résistance à la rupture, ou la rigidité, pour des composites à usages mécaniques [15].

En raison de l'augmentation de la population, les ressources naturelles sont largement exploitées comme alternative aux matériaux synthétiques. Les composites à fibres naturelles, et en particulier les fibres végétales ont reçu beaucoup d'attention en raison de leurs avantages. Tout d'abord, ces fibres sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutre vis-à-vis des émissions de CO₂ et largement disponibles dans la nature à faible coût [7]. La même chose n'est pas possible avec les fibres synthétiques telles que les fibres de verre. D'autre part, les composites à fibres naturelles ouvrirait de nouveaux débouchés aux produits agricoles dans les pays peu industrialisés [15]. Parmi ces fibres, on peut citer notamment les fibres de chanvre qui sont utilisées pour l'isolation.

Les fibres dans un matériau qui constitué d'un ensemble des fibres résistantes noyées dans une matrice dont les propriétés mécaniques sont nettement faibles, jouent le rôle de renfort tandis que la matrice assure la cohésion du composite et le transfert des efforts aux fibres [7].

L'utilisation des composites à fibres végétales dans les activités de construction entraînera des structures économiques.

Dans le cadre de développement des matériaux de construction à faible coût économique dédiés à l'isolation thermique, de nombreux travaux scientifiques ont étudiés les propriétés mécaniques et thermophysiques des matériaux composites à fibres de palmier dattier.

V.1. Fibres de palmier dattier

Les déchets de palmier dattier (Figure I.6) ont été prélevés à partir les oasis de Biskra (Algérie), puis ils ont été soumis à un broyage mécanique à deux niveaux (broyage grossière et concassage) pour produire des fibres de différentes tailles. L'analyse granulométrique permet de classer les échantillons selon leurs tailles. Deux types de fibres on été obtenus : (i) fibres fines avec un diamètre moyen de 3 mm et une longueur comprise entre 2.5 et 3.2 mm, (ii) fibres grossières avec une longueur comprise entre 3.2 et 16 mm et un diamètre moyen de 6 mm. Les étapes de broyage du bois de palmier dattier sont illustrées dans la Figure I.12.



Figure I.12. Préparation des fibres de bois de palmier dattier : (A) bois de palmier dattier, (B) broyeur mécanique (moteur de base), (C) appareil de tamisage du bois de palmier dattier, et finalement (D) les fibres de bois de palmier dattier avec différentes tailles.

V.2. Composite à base de gypse

Dans la littérature, les particules de chanvre (chènevotte) sont mélangées avec la chaux ou d'autre liant spécifique pour confectionner des mortiers, ou des bétons de chanvre. Dans le même contexte, le bois de palmier dattier a été utilisé pour préparer des matériaux composites à matrice minérale.

Chikhi et *al* [16] ont réalisés des matériaux composites dans le laboratoire contenant différentes tailles et concentrations massiques de fibres de bois de palmier dattier. L'objectif était le développement d'un nouveau matériau composite à faible conductivité thermique et masse volumique adapté pour l'isolation thermique dans les bâtiments, en utilisant des composants à faibles coûts économiques.

V.2.1. Préparation des composites

Le composite gypse-fibres a été préparé en laboratoire selon la méthode suivante : (i) mélanger dans un malaxeur automatique pendant 5 minutes la poudre de gypse et l'eau avec un rapport eau/gypse égale à 0.6 qui produit une pâte bonne à travailler, donc une ouvrabilité meilleure, (ii) ajouter des fibres au mélange et mélanger les composants pendant 5 minutes, (iii) verser rapidement le mélange dans les moules.

V.2.2. Propriétés mécaniques

Le comportement mécanique des composites peut être significativement affecté par l'ajout des fibres naturelles. La première observation est que la résistance à la compression et à la flexion des composites gypse-fibres diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres (Figure I.13).

Les auteurs ont révélé aussi que les valeurs de la résistance à la flexion et à la compression des composites chargés avec des fibres fines sont plus élevées que celles des composites préparés avec des fibres grossières et pour des concentrations supérieures à 2%. La Figure I.14 présente quelques échantillons après l'essai de flexion.

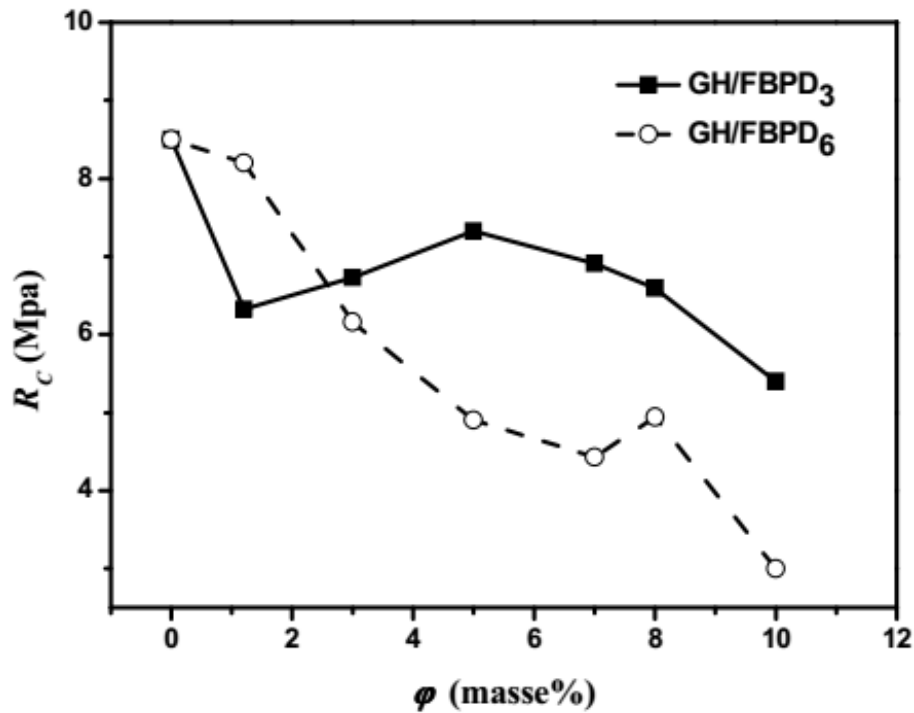


Figure I.13. Résistance à la compression des composites gypse-fibres au 28^{ème} jour [17].



Figure I.14. Echantillons de composite gypse-fibres après des essais de flexion [17].

V.2.3. Propriétés thermophysiques

Les mesures de la conductivité thermique ont été effectuées sur plusieurs composites pour deux tailles de fibres et pour différentes concentrations (jusqu'à 10%). Les résultats ont révélés que lorsque la charge des fibres augmente, une diminution significative de la conductivité thermique et la masse volumique est produite (Figure I.15). Par ailleurs, l'effet

de la concentration des fibres sur la conductivité thermique et la masse volumique des composites est plus significative que l'effet de la taille des fibres.

Les auteurs ont démontrés expérimentalement que l'ajout de 10% de fibres de palmier dattier a produit des composites avec une conductivité thermique comprise entre 0.15 et 0.17 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

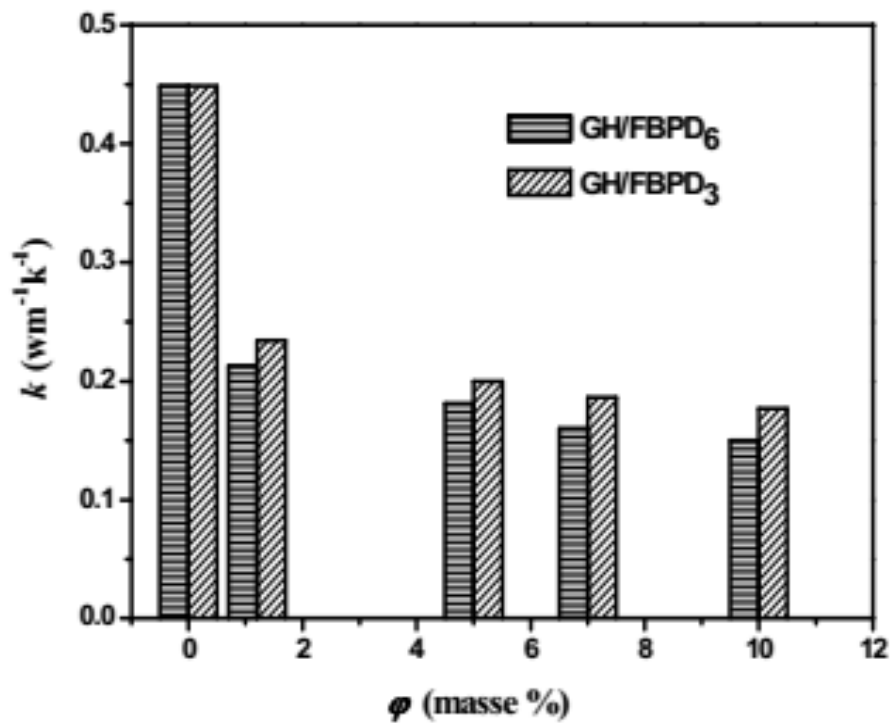


Figure I.15. Conductivité thermique des composites gypse-fibres [17].

V.2.4. Composites optimaux

L'effet de la concentration des fibres est le paramètre le plus influent sur les propriétés thermophysiques (conductivité thermique). Tandis que, les propriétés mécaniques de ces composites sont influencés par les deux paramètres, la concentration des fibres et leur taille (pour des concentrations supérieures à 2%).

Les auteurs recommandent l'utilisation de 5% de fibres de palmier dattier dans la matrice de gypse afin d'obtenir des composites avec de bonnes propriétés thermiques et mécaniques (Tableau I.4).

Selon les résultats de l'étude, les auteurs recommandent l'utilisation de ces matériaux pour une application d'isolation thermique dans les panneaux solaires ou dans les façades

intérieures des bâtiments. Outre, les auteurs suggèrent l'utilisation d'une nouvelle matrice comme le ciment pour produire des composites dédiés aux applications structurelles avec de meilleures performances en compression.

Tableau I.4 : Propriétés mécaniques et thermophysiques à 28^{ème} jour [16, 17].

Concentration massique %	Résistance à la flexion MPa	Résistance à la compression MPa	Conductivité thermique W.m ⁻¹ K ⁻¹	Masse volumique kg.m ⁻³
0	4.50	8.50	0.45	1130
5 (fibres fines)	2.92	7.32	0.20	887
5 (fibres grossières)	2.24	4.90	0.18	890

V.3. Composite à base de ciment

Benmansour et al [14] ont étudiés un nouveau matériau, composé d'un liant à base de ciment et les fibres de palmier dattier. L'objectif principal était d'évaluer la possibilité d'utiliser ce composite comme un matériau de construction pour l'isolation thermique.

V.3.1. Préparation des composites

La préparation des composites est effectuée en ajoutant les fibres, le ciment et le sable (0/5 mm) dans un mélangeur pendant 3 minutes. L'eau de gâchage est ensuite ajoutée progressivement jusqu'à ce que le mélange devient homogène et plus malléable. Finalement, le mélange est rapidement versé dans les moules. Les échantillons après le démoulage sont présentés dans la Figure I.16.



Figure I.16. Echantillons de composite fibres-matrice à base de ciment [18].

V.3.2. Propriétés thermophysiques

L'emploi des fibres de palmier dattier a pour première conséquence une diminution de la masse volumique de béton. De plus, un matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction. Les résultats de la conductivité thermique révèlent que l'addition des fibres de palmier dattier dans une matrice à base de ciment réduit la conductivité thermique du composite (Figure I.17).

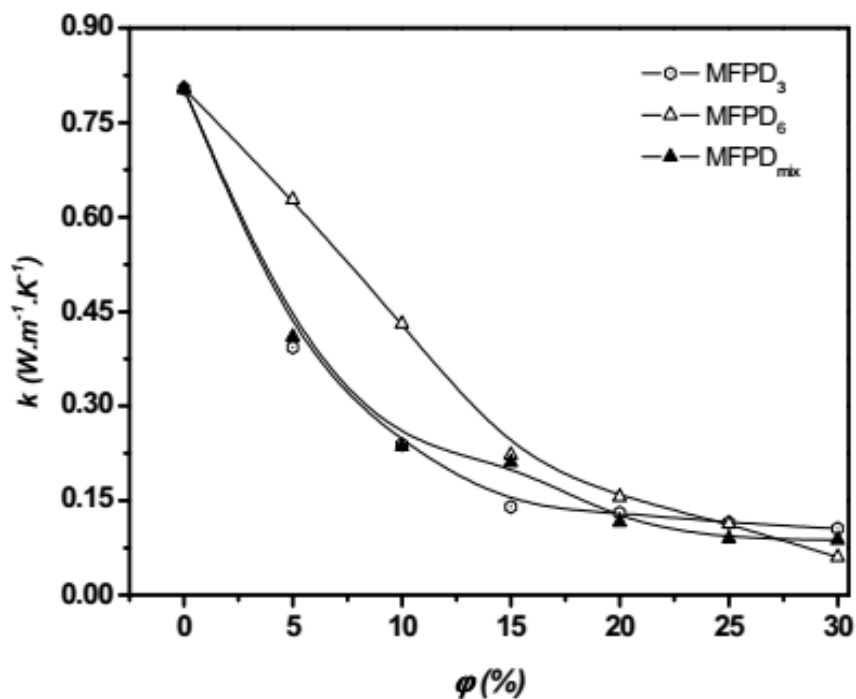


Figure I.17. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres [18].

En outre, l'influence de la taille des fibres sur la conductivité thermique est plus évidente sur les composites avec une concentration des fibres inférieure à 15% ; la conductivité thermique de composites chargés avec des fibres grossières est supérieure à celle de composites avec des fibres fines. Par ailleurs, cette influence est négligeable pour des concentrations supérieures à 15% ; l'effet de la concentration des fibres sur les propriétés thermiques est plus significatif que l'effet de la taille.

V.3.3. Propriétés mécaniques

L'étude de la variation de la résistance à la compression des composites à base de ciment en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier a été effectuée. Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la concentration de fibres (Figure I.18).

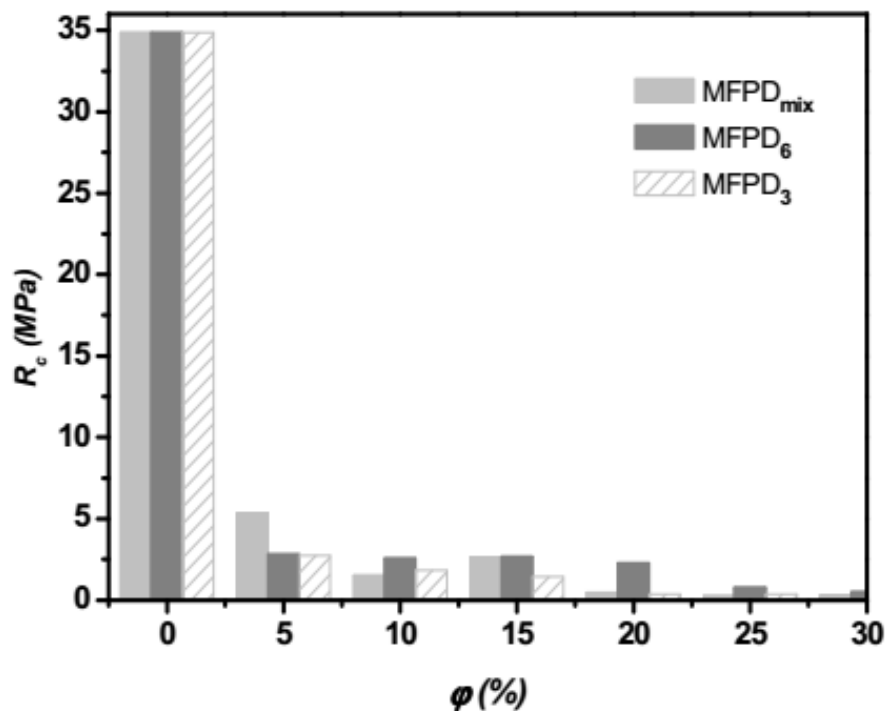


Figure I.18. Résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres [18].

En outre, la résistance à la compression des composites peut être affectée par la taille de fibres ; pour la charge de fibres supérieure à 5%, les composites chargés avec des fibres grossières présentent des résistances mécaniques supérieures à ceux chargés avec des fibres fines. Finalement, on peut souligner que l'eau de gâchage ainsi que la compatibilité entre la

fibres et la matrice (liaison fibres-matrice) peuvent fortement affecter le comportement mécanique des composites à fibres naturelles.

V.3.4. Composites optimaux

Les auteurs ont conclu que la charge optimale des fibres de palmier dattier se situe entre 5-15%. Pour ces concentrations, la résistance mécanique et la conductivité thermique des composites à fibres de palmier dattier sont compatibles avec l'utilisation dans le domaine de l'isolation thermique des bâtiments (Tableau I.5).

Tableau I.5 : *Propriétés mécaniques et thermophysiques à 28^{ème} jour [14, 18].*

Concentration massique %	Résistance à la compression MPa	Conductivité thermique W.m ⁻¹ K ⁻¹	Masse volumique kg.m ⁻³
0	34.87	0.80	1890
15 (fibres fines)	1.44	0.14	984
15 (fibres grossières)	2.67	0.22	1254

D'après les résultats obtenus au cours de cette étude, les auteurs recommandent d'améliorer la compatibilité entre fibre-ciment en utilisant par exemple certains produits argileux comme la pouzzolane. En plus, ils conseillent le traitement des fibres de palmier dattier afin de limiter le problème de l'absorption de l'eau.

Dans le même contexte, le développement de béton de chanvre a rencontré de nombreux problèmes dans les bâtiments, principalement en raison des liants inappropriés [19]. Ces problèmes ont été résolus en utilisant des liants spécifiques.

En raison de l'importance de béton de chanvre en tant que matériau de construction alternative, en particulier en Europe, il est important de mentionner dans la partie suivante ses propriétés principales.

VI. Béton de chanvre : matériau de construction concurrentiel

Le béton de chanvre est un matériau de construction biosourcé qui a été redécouvert à la fin du 20^{ème} siècle [20]. Ce matériau présente plusieurs avantages tels que [21] : (i) ses bonnes propriétés d'isolation thermique, (ii) son faible impact sur l'environnement (l'analyse de cycle de vie présente une très faible empreinte du carbone [22]), (iii) sa porosité unique.

Le béton de chanvre entend généralement un mélange [7] :

- de granulats/particules de chanvre : la chènevotte.
- de liant à base de chaux.
- d'une quantité suffisante d'eau qui assure une bonne maniabilité du mélange.
- parfois, de charges minérales, comme du sable.

La Figure I.19 présente un échantillon de béton de chanvre. Les particules de chanvre sont utilisées comme des agrégats dans le béton de chanvre et cela peut être justifié par deux (2) raisons principales [23] : (i) la préservation des ressources naturelles telles que les agrégats minéraux dont les conditions d'extraction deviennent de plus en plus difficiles, et (ii) la nécessité de concevoir des matériaux de construction efficaces (isolation thermique, absorption acoustique, isolation phonique) ayant un impact environnemental plus faible, notamment en ce qui concerne l'empreinte du carbone.



Figure I.19. Béton de chanvre [20].

Plusieurs types de béton de chanvre peuvent être distingués dans la littérature selon leurs méthodes de fabrication [7] : (i) béton de chanvre coulé en place : ce mode de mise en œuvre a besoin d'une bétonnière ou un malaxeur et un coffrage. Ce mode nécessite de gâcher le

béton de chanvre avec une quantité importante d'eau en raison de fort pouvoir absorbant de la chènevotte (au moment du malaxage), avec un rapport E/L varie entre 1.6 à 2. Cette technique présente un problème de temps de séchage qui est relativement long (plusieurs mois) ; (ii) béton de chanvre projeté : la projection mécanique par voie sèche consiste au pré-mélange à sec des constituants (chènevotte et liant) puis à la pulvérisation d'une quantité réduite d'eau. Cette quantité d'eau peut être proche de celle nécessaire à l'hydratation du liant. Cette technique ne laisse pas le temps à la chènevotte d'absorber l'eau de gâchage. Le temps de séchage de béton de chanvre projeté peut être réduit à une dizaine de jours ; (iii) béton de chanvre préfabriqué : ce mode consiste à utiliser le procédé de projection pour remplir des moules et produire des blocs préfabriqués.

Le béton de chanvre peut être utilisé pour plusieurs applications, paroi, plancher ou toit. Ses faibles propriétés mécaniques nécessitent l'utilisation avec un cadre qui peut être en acier, béton ou bois [24]. De plus, l'étude thermique a révélée une bonne capacité d'isolation thermique avec une conductivité thermique qui varie entre 0.07 et 0.3 W.m⁻¹K⁻¹ et qui dépend de sa formulation, de sa masse volumique et de sa teneur en eau [24].

En revanche, l'étude de comportement de béton de chanvre avec l'humidité a reçus beaucoup d'attention ces dernières années. Ceci en raison de l'impact important de l'humidité sur l'efficacité des matériaux de construction, et donc sur le bâtiment. A titre d'exemple, les murs de chanvre « respirent » ou permettant à l'humidité de passer à travers, ce qui décourage la croissance des moisissures.

La caractérisation expérimentale du comportement hydrique est largement étudiée à l'échelle matériau. Comme tous les matériaux biosourcés, le béton de chanvre est un matériau fortement hygroscopique que les matériaux de construction habituels. En raison de leur grande porosité ouverte, les matériaux biosourcés ont une perméabilité à la vapeur d'eau élevée ; la résistance à la diffusion de vapeur d'eau de béton de chanvre au point sec varie de 5 à 12 [24].

Collet et al [20] ont étudiés l'effet de la composition et de la méthode de fabrication des bétons de chanvre sur leurs propriétés hydriques ; les résultats ont révélé que ces matériaux sont très poreux, avec une porosité ouverte et interconnectée. En outre, ils sont classés comme excellents régulateurs hydriques (ou presque excellents) en fonction de leurs capacités élevées de transfert et de stockage d'humidité. Les auteurs ont indiqué que la composition et la

méthode de fabrication ont un impact faible mais non négligeable sur les propriétés hydriques des bétons de chanvre. Rahim et al [22] ont comparé les propriétés hydriques de béton de lin avec le béton de chanvre ; les résultats ont montré que ces matériaux biosourcés ont des propriétés hydriques très intéressantes et présentent une importante capacité tampon hydrique.

VII. Objectif de l'étude

Le présent travail est une continuation de travaux précédents [10, 14, 16-18] qui entrent dans le cadre de développement des matériaux composites à fibres de palmier dattier dédiés aux applications d'isolation thermique dans la construction.

Le but de ce travail est d'une part, l'étude expérimentale des propriétés hygrothermiques d'un matériau composite contenant un liant à base de ciment et bois de palmier dattier, et d'autre part, la prédiction numérique du comportement hygrothermique du matériau à l'échelle mur. L'étude expérimentale nécessite l'évaluation par des essais expérimentaux les propriétés intrinsèques du matériau étudié, parmi eux, on peut citer la porosité, la conductivité thermique, l'isotherme de sorption et la perméabilité à la vapeur. L'étude hygrothermique peut conduire à comprendre le comportement de l'enveloppe du bâtiment, et par conséquent sa performance énergétique.

Le matériau étudié est un composite à base de ciment. La formulation choisie (la cellule ombrée dans le Tableau I.5) a montré des résultats intéressants pour les exigences du béton léger pour les applications d'isolation thermique dans les bâtiments par rapport aux autres formulations.

VIII. Conclusion

Le choix des matériaux de construction est un facteur clé au développement durable dans le domaine de l'habitat. Ce choix doit se baser principalement sur la protection de l'environnement.

Une offre grandissante d'écomatériaux (comme la paille, le lin et le chanvre) aux propriétés toujours plus performantes est actuellement en plein essor et permet de répondre aux problématiques du développement durable. En Algérie, les écomatériaux font aujourd'hui leur grand retour comme le bois de palmier dattier. La valorisation des déchets du palmier dattier en Algérie aurait un impact positif sur notre environnement et contribuerait à réduire la

consommation de matières premières non renouvelable. Le développement des bétons biosourcés à bois de palmier dattier dans le domaine de construction entraînera des structures économiques et écologiques.

Dans la suite de nos travaux, nous étudierons le comportement hygrothermique de béton de palmier dattier à l'échelle matériau. Cette étude se base sur des essais expérimentaux afin d'évaluer les propriétés intrinsèques du matériau.

Références

- [1] "Réunion parlementaire à l'occasion de la conférence des nations unies sur les changements climatiques," Organisée conjointement par l'Union interparlementaire et le Parlement français, Document final, Paris, France, 2015.
- [2] F. Riesser, "Etude d'impact des matériaux de construction," Eco initiatives@Dauchez Payet, Rapport technique, 2014.
- [3] J. Chamoin, "Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation," Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Rennes, France, 2013.
- [4] S. Berkouk, "Bâtiment : Plus de 60% de la consommation énergétique finale est perdue," CDER, Algérie, 2014.
- [5] A.D. Tran Le, "Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment," Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2010.
- [6] N. Bur, "Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable," Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, France, 2012.
- [7] C. Magniont, "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2010.
- [8] L. Liu, H. Li, A. Lazzaretto, G. Manente, C. Tong, Q. Liu, and N. Li, "The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 912-932, 2017.

- [9] G. Peyron, *Cultiver le palmier-dattier : Guide illustré de formation*. Montpellier, France: CIRAD, 2000.
- [10] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [11] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, and A. Hammami, "Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: Fiber Characterization," *Polymer Composites*, vol. 26, pp. 486-497, 2005.
- [12] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, pp. 1552-1596, 2012.
- [13] C.W. Nguong, S.N.B. Lee, and D. Sujana, "A Review on Natural Fibre Reinforced Polymer Composites," 2013.
- [14] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building," *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 98-104, 2014.
- [15] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite.," Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 2007.
- [16] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. boudenne, and A. Gherabli, "Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation," *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 267-273, 2013.
- [17] M. Chikhi, "Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible coût pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires," Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2013.
- [18] N. Benmansour, "Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat," Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2015.
- [19] A. Evrard, "Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials," Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2008.

- [20] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, and C. Lanos, "Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 294-303, 2013.
- [21] P. De Bruijn and P. Johansson, "Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1235-1242, 2013.
- [22] M.Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, and T. Langlet, "Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity," *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 91-99, 2015.
- [23] L. Arnaud and E. Gourlay, "Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 50-56, 2012.
- [24] F. Collet and S. Pretot, "Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall," *Building and Environment*, vol. 82, pp. 459-466, 2014.

**Chapitre II : Propriétés
hygrothermiques de béton de
palmier dattier : Etude
théorique et expérimentale**

II. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'étude hygrothermique de béton de palmier dattier. La première partie s'intéresse à l'analyse théorique de transfert et stockage hygrothermique. La deuxième partie est consacrée à la présentation des principaux constituants du matériau ainsi que leurs concentrations massiques. La dernière partie de ce chapitre est dédiée à la présentation des différentes méthodes expérimentales pour l'étude des propriétés hygrothermiques de béton de palmier dattier.

III. Comportement hygrothermique

III.1. Généralités

Chaque année, de nombreux problèmes dans les bâtiments sont détectés en conséquence direct ou indirect de l'humidité. L'humidité via sa phase liquide (par exemple, la pluie) peut provoquer des dommages structurels du bâtiment et peut aussi réduire la capacité d'isolation thermique. En outre, la condensation superficielle de la vapeur d'eau peut provoquer des problèmes cosmétiques et des effets préjudiciables sur la santé des occupants [1]. Pour ces raisons, l'étude du comportement hydrique des matériaux de construction est fortement recommandée afin de simuler leur comportement dans des environnements humides.

La physique du bâtiment est un domaine basé principalement sur l'étude de transfert de chaleur et d'humidité à travers les éléments de construction et le bâtiment. Les chercheurs ont découvert une relation interdépendante entre le transfert et le stockage de chaleur et d'humidité : c'est-à-dire l'effet de l'humidité sur la partie thermique ainsi que l'influence de la température sur la partie hydrique ; c'est l'objet de l'hygrothermie. Plus particulièrement, le comportement hygrothermique décrit le transfert interdépendant (simultané) de chaleur et d'humidité (vapeur /liquide) entre un matériau et son environnement [2].

L'efficacité énergétique des bâtiments dépend du comportement hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment et de la performance des systèmes ; ce comportement est lié aux propriétés hydriques et thermiques des matériaux constitutifs [3]. Parmi ces propriétés, la conductivité thermique, la sorption de la vapeur d'eau et la perméabilité à la vapeur d'eau seront étudiés dans ce travail.

III.2. Transfert et stockage hygrothermique : Analyse théorique

III.2.1. Transfert et stockage de chaleur

Le changement de l'enthalpie d'un matériau peut être déterminé par la divergence de son flux thermique et les sources ou les puits de chaleur du matériau [1]. Par conséquent, le changement de l'enthalpie totale d'un matériau peut s'exprimer par l'équation suivante [4] :

$$\partial H / \partial t = - (\partial q / \partial x) + S_h \quad (1)$$

Avec,

H : enthalpie totale en $J.m^{-3}$, t : temps en s, q : densité de flux thermique en $W.m^{-2}$, S_h : source ou puits de chaleur en $W.m^{-3}$.

La teneur en chaleur d'un matériau sous conditions isobariques peut être appelée "enthalpie", et elle est déterminée dans le cas d'un matériau humide avec la prise en considération de l'enthalpie de l'humidité contenue dans le matériau [1].

La loi de Fourier annonce que le transfert de chaleur entre deux éléments dans le même matériau dépend de la conductivité thermique et de la différence de température entre ces deux éléments [4]. Ce transport se produit à partir de l'élément avec la haute valeur de température vers l'élément avec la basse valeur de température, et il s'arrête lorsque ces deux (2) éléments ont la même valeur de température. Le flux thermique transféré peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (2)$$

Avec,

λ : conductivité thermique du matériau en $W.m^{-1}.K^{-1}$.

La conductivité thermique des matériaux poreux peut être affectée par la variation des conditions ambiantes, en raison de la capacité des matériaux poreux à stocker l'humidité. La relation suivante peut être utilisée pour calculer la conductivité thermique d'un matériau de construction à l'état humide [1] :

$$\lambda(w) = \lambda_0(1 + b \cdot w / \rho_0) \quad (3)$$

Avec,

λ_0 : conductivité thermique d'un matériau de construction à l'état sec en $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, ρ_0 : masse volumique d'un matériau de construction à l'état sec en kg.m^{-3} , w : teneur en eau en kg.m^{-3} , b : supplément hydrique de la conductivité thermique en $\%/(M.-\%)$.

Le supplément hydrique de la conductivité thermique quantifie l'augmentation de la conductivité thermique lorsque la teneur en eau augmente de 1% [5].

$$b = (\rho_0 \cdot (\lambda - \lambda_0)) / (\lambda_0 \cdot w) \quad (4)$$

D'autre part, le transfert thermique est fortement influencé par le transport d'humidité dans le cas où la diffusion de vapeur d'eau est couplée avec un changement de phase [1] :

$$S_h = -h_v \nabla \cdot g_v \quad (5)$$

Avec,

S_h : source ou puits de chaleur en W.m^{-3} , h_v : chaleur latente de changement de phase en J.kg^{-1} , g_v : flux de diffusion de vapeur d'eau en $\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

La résistance thermique de la couche d'air (air stable) adjacente à la surface de la paroi peut influencer le transfert de chaleur entre la surface de la paroi et l'ambiance. Cette résistance était prise en compte dans la loi de Newton [4] :

$$q = h \cdot (T_a - T_s) \quad (6)$$

Avec,

h : coefficient de transfert thermique en $\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$, T_s : température de la surface en K, T_a : température ambiante en K.

III.2.2. Transfert et stockage d'humidité

Le transfert et stockage d'humidité à travers un élément de construction peuvent être traités de façon analogue au transfert et stockage de chaleur, puisqu'ils soumettent à des lois formellement similaires.

La variation de l'humidité dans un matériau peut être obtenue par la divergence de son flux d'humidité et des sources ou puits d'humidité du matériau [1], et peut s'exprimer selon l'équation suivante :

$$(\partial w / \partial t) = - (\partial / \partial x)(g_w + g_v) + S_w \quad (7)$$

Avec,

w : teneur en eau en kg.m^{-3} , t : temps en s, g_w : flux de liquide en $\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, g_v : flux de diffusion de vapeur d'eau en $\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, S_w : source/puits de l'humidité en $\text{kg.m}^{-3}\text{s}^{-1}$.

Selon Kunzel [1], Il est très rare que les sources de l'humidité se produisent dans les composants du bâtiment (par exemple une rupture d'un tuyau d'eau), ainsi les puits de l'humidité correspondent aux processus chimiques (cas de durcissement du béton et mortier) qui ne sont pas considérés dans la physique du bâtiment, le terme source/puits de l'humidité généralement n'est pas pris en considération.

La loi de Fick (Figure II.1) indique que le flux de diffusion de vapeur d'eau à travers une couche d'air peut être déterminé en utilisant la perméabilité à la vapeur d'eau (fonction de la température et la pression d'air) et le gradient de pression partielle de vapeur d'eau [4] qui est fortement dépendante de la température, où la pression de vapeur saturante est une fonction exponentielle de température [6].

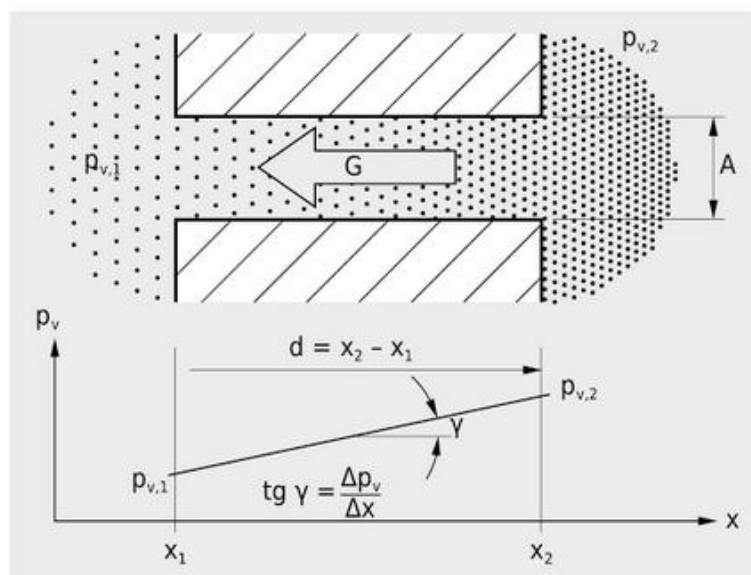


Figure II.1. Diffusion de vapeur dans un gradient de pression [7].

La diffusion de la vapeur d'eau dans les matériaux poreux est considérée comme une diffusion dans l'air (air dans les pores), mais avec réduction en raison du système de pore du matériau (porosité et tortuosité) [8]. Cette réduction peut être estimée par le facteur de la résistance à la diffusion de vapeur :

$$g_v = - (\delta_a / \mu) (\partial P_v / \partial x) \quad (8)$$

Avec,

δ_a : perméabilité à la vapeur d'eau dans l'air en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$, μ : facteur de la résistance à la diffusion de vapeur (adim), P_v : pression partielle de la vapeur d'eau en Pa, x : coordonnée spatiale en m.

Le transport de l'eau liquide est dominé par les forces capillaires qui sont principalement fonction de l'humidité relative (équation de Kelvin) [6] comme montré dans l'équation suivante :

$$g_w = - D_\varphi \cdot \nabla \varphi \quad (9)$$

Avec,

D_φ : coefficient de conduction liquide en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$, φ : humidité relative (adim).

III.2.3. Transfert et stockage de chaleur et d'humidité

L'équation du bilan thermique ainsi que l'équation du bilan hydrique peuvent être couplées en raison de [1] :

- Enthalpie totale (qui est obtenue par la somme de l'enthalpie du matériau de construction sec et de l'enthalpie de l'humidité à l'intérieur du matériau de construction), conductivité thermique ainsi que le terme source dépendent de la teneur en humidité dans un matériau.
- Flux de diffusion de la vapeur d'eau et le flux de l'eau liquide dépendent de la température. Le flux de liquide est légèrement influencé par l'effet de la température sur la viscosité du liquide et par conséquent sur D_φ .

Par conséquent, le transfert et le stockage simultané de chaleur et d'humidité peuvent être déterminés par le system d'équations suivant :

$$(\partial H/\partial T)(\partial T/\partial t) = (\partial/\partial x)(\lambda \cdot (\partial T/\partial x)) + h_v \cdot (\partial/\partial x)(\delta_p \cdot (\partial/\partial x)(\varphi \cdot P_s)) \quad (10)$$

$$(\partial w/\partial \varphi)(\partial \varphi/\partial t) = (\partial/\partial x)(D_\varphi \cdot (\partial \varphi/\partial x) + \delta_p \cdot (\partial/\partial x)(\varphi \cdot P_s)) \quad (11)$$

Avec,

$\partial H/\partial T$: capacité de stockage thermique en $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, δ_p : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, P_s : pression de vapeur saturante en Pa, $\partial w/\partial \varphi$: capacité de stockage d'humidité du matériau en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

IV. Matériau : Béton de palmier dattier (DPC)

IV.1. Composants du matériau

Le matériau de l'étude est un composite compris des matières premières naturelles (eau, fibres de palmier dattier), artificiel (granulats) et transformé (Ciment Portland).

IV.1.1. Ciment Portland (CP)

Le ciment est un matériau adhésif et cohésif qui est capable de lier un ensemble de particules de matière solide en une masse durable compacte [9]. Les procédés de production de CP sont compliqués et généralement basés sur les processus suivantes : extraction et concassage des matières premières (argile et calcaire), préparation de cru (mélange poudre et homogène des matières premières), cuisson à haute température (transformation chimique de cru en clinker), refroidissement de clinker, ajouter le gypse et éventuellement des ajouts cimentaires (pouzzolane, calcaire, etc.) afin d'améliorer la performance de ciment et enfin un broyage final (poudre fine). Les principales compositions chimiques de CP sont la chaux, la silice et l'alumine qui peuvent affecter plus ou moins la résistance et la solidité du ciment.

Notre travail est basé sur l'utilisation de CP de catégorie CEM II/A selon la norme NF EN 197-1 avec une résistance minimale de compression de 32.5 MPa (à 28 jours). Cette catégorie constitue de 80 à 94% de clinker (NF EN 197-1). La réaction chimique entre le ciment et l'eau connue par l'hydratation du ciment, et conduit à la formation d'une pâte qui durcisse progressivement à l'air.

IV.1.2. Granulats

Lors de la production de mortier ou de béton, les agrégats sont essentiellement utilisés comme une charge avec le liant, et peuvent influencer les propriétés du matériau (résistance, masse volumique, porosité, etc.) et avoir un effet économique [9]. Les agrégats choisis doivent être propres, durs, forts et durables. Ainsi que, deux (2) catégories nettement différentes sont connues : agrégats grossiers (gravier) et agrégats fins (sable) [9].

Dans ce travail, le sable de type artificiel concassé gris a été utilisé comme une charge avec le CP. Outre, ces granulats ont une taille fine comprise entre 0.01 mm et 5 mm.

IV.1.3. Eau de mélange

L'hydratation de ciment nécessite l'utilisation de l'eau, mais un excès d'eau de mélange peut affecter la porosité du composite (l'évaporation rend le matériau poreux). En revanche, moins d'eau de mélange conduit à une difficulté de travail avec les composants, ce qui affecte l'homogénéité du mélange qui produit un composite avec une résistance faible [9]. La détermination de la quantité d'eau de mélange doit être donc précise afin de produire un composite à haute performance. Le choix de la qualité d'eau de mélange dépend de plusieurs paramètres tels que : (i) la concentration d'impuretés dans l'eau de mélange où leur excès peut affecter la résistance et la durabilité du composite et peut provoquer une décoloration de la surface, (ii) le pH d'eau de mélange qui doit être entre 6 – 8 [9].

Concernant ce travail, l'eau utilisée est une eau potable de robinet avec pH 7.75. De plus, le rapport eau/ciment utilisé est de 0.68.

IV.1.4. Fibres de palmier dattier (DPF)

Le bois de palmier dattier utilisé dans ce travail est la partie renouvelable du palmier et elle est disponible gratuitement : il s'agit du pétiole et du rachis. Ces déchets sont recueillis et préparés afin de les utiliser comme des inclusions dans une matrice cimentaire. Ces déchets sont disponibles à l'état sec dans les forêts de palmier dattier au sud d'Algérie. La préparation des fibres de palmier dattier est basée sur le broyage des déchets du palmier dattier en utilisant un broyeur mécanique. En outre, l'analyse granulométrique permet de classer les fibres broyées en utilisant le tamisage.

Le tamisage est un procédé permettant de séparer et de classer les grains selon leur taille à l'aide d'une série de tamis par vibration. L'analyse granulométrique a été effectuée sur un diamètre moyen de l'ordre de 3 mm : cette analyse permet de séparer les fibres fines des fibres grossières. Les fibres fines obtenues sont caractérisées par une longueur comprise entre 2.5 et 3.2 mm.

IV.2. Concentration massique des composants

Les bétons légers sont des bétons avec une masse volumique plus faible (inférieure à 1600 kg.m⁻³), ces matériaux peuvent être obtenus par substitution des gravillons traditionnels par des granulats allégés avec une masse volumique inférieure à 1200 kg.m⁻³ (exemple, béton de bois) ou l'incorporation des bulles d'air (exemple, béton cellulaire) [10].

Le béton de palmier dattier peut être considéré comme un béton de bois où sa préparation est basée sur la substitution des gravillons traditionnels par des fibres de palmier dattier. Benmansour et al [11] ont déterminé les concentrations massiques des constituants de béton de palmier dattier en jouant sur la concentration massique des fibres (Tableau II.1).

Tableau II.1 : Composition massique en pourcentage de béton sans fibres [12].

Ciment	Sable	Fibres
73%	27%	0%

Au cours de cette étude, nous nous sommes concentrés sur une seule formulation où la concentration des fibres est 15% (Figure II.2). Cette formulation a montré que les comportements thermique et mécanique du composite restent compatibles avec les exigences de béton léger pour l'isolation dans les bâtiments [11].

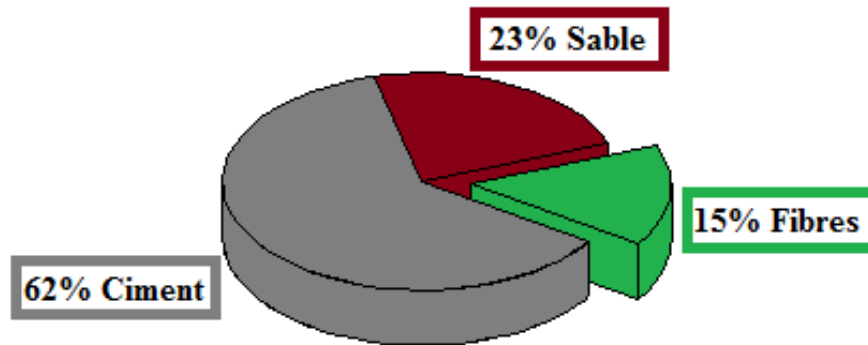


Figure II.2. Concentrations massiques des composants solides de béton de palmier dattier.

V. Etude expérimentale des propriétés hygrothermiques

V.1. Porosité

La porosité est un paramètre physique très important qui peut affecter à la fois les propriétés hydriques et thermiques des matériaux de construction. La porosité totale et la porosité ouverte sont largement utilisées pour étudier le taux de vide dans les matériaux de construction.

Différents types des pores peuvent être distingués dans les matériaux de construction [13] : (i) pores interconnectés (ou connectés) : espaces favorisent le transport et le stockage de matière au sein du matériau (Figure II.3a), (ii) pores piégés (aveugles ou bras morts) : espaces contribuent au stockage au sein du milieu (Figure II.3b), (iii) pores isolés (ou occlus) : espace ne participe ni au transport ni au stockage de matière (Figure II.3c). En outre, différentes classes des pores peuvent être distingués selon leurs tailles [14]: (i) micropores : pores ayant un diamètre inférieur à 2 nanomètre, (ii) mésopores : pores ayant un diamètre entre 2 nanomètre et 50 nanomètre, (iii) macropores : pores ayant un diamètre supérieur à 50 nanomètre.

Les pores interconnectés ainsi que les pores piégés sont considérés comme des pores ouverts, tandis que les pores isolés sont des pores fermés qui peuvent influencer la masse volumique ainsi que le comportement thermique et mécanique du matériau [13].

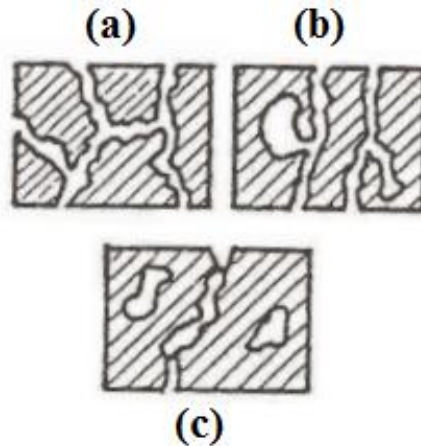


Figure II.3. Types des pores dans le matériau : connectés (a), piégés (b), isolés (c).

V.1.1. Porosité totale

La porosité totale (ouverte et fermée) de béton de palmier dattier a été déterminée en utilisant la masse volumique apparente et la masse volumique du solide, comme indiqué dans l'équation (12) [15] :

$$\emptyset = (V - V_s)/V = (\rho_s - \rho)/\rho_s \quad (12)$$

Avec,

\emptyset : porosité totale en vol.%, V : volume apparent en m^3 , V_s : volume du solide en m^3 , ρ_s : masse volumique du solide en $kg.m^{-3}$, ρ : masse volumique apparente en $kg.m^{-3}$.

La masse volumique apparente et la masse volumique du solide indiquent respectivement la masse d'une unité de volume d'un matériau dans son état naturel (c'est-à-dire, avec des pores et des vides) et dans son état réel (c'est-à-dire, sans inclusion de pores et de vides) [9].

La méthode pycnométrique (Figure II.4) est utilisée pour la détermination de la masse volumique réelle de béton de palmier dattier ; il s'agit de remplir les espaces d'air dans le matériau avec l'acétone (et parfois avec le toluène).

Après le séchage, un échantillon est broyé et placé dans le pycnomètre (une fiole à volume constant) qui est ensuite rempli à l'aide d'un liquide. Ce liquide permet de compléter le volume non occupé par l'échantillon solide. L'ensemble (matériau et liquide) est régulièrement agité, complété par le liquide et pesé jusqu'à la stabilisation de la masse [13]. Les mesures de masse ont été effectuées avec une précision de 0.001 g.



Figure II.4. Méthode pycnométrique (broyage et mise en place) [13].

Le Tableau II.2 présente l'équation utilisée pour déterminer la masse volumique réelle d'un matériau selon la méthode pycnométrique. Cette méthode est basée sur cinq (5) mesures de masse : M_0 , M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , où :

- M_0 : masse pycnomètre vide.
- M_1 : masse pycnomètre vide + matériau.
- M_2 : masse pycnomètre vide + matériau + acétone.
- M_3 : masse pycnomètre vide + acétone.
- M_4 : masse pycnomètre vide + eau distillée.

En revanche, la masse volumique apparente de béton de palmier dattier a été déterminée avec un échantillon à l'état sec de volume (15 cm × 15 cm × 15 cm).

Tableau II.2 : Masse volumique réelle selon la méthode pycnométrique [13].

Paramètre physique	Equation
Volume occupé par l'échantillon dans le pycnomètre en m ³	$V_{\text{matériau}} = V_{\text{pycnomètre}} - V_{\text{acétoneajouté}} = \frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} - \frac{M_2 - M_1}{\rho_{\text{acétone}}}$ $= \frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} - \frac{M_2 - M_1}{\frac{M_3 - M_0}{M_4 - M_0} \rho_{\text{eau}}} = \frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} \left(1 - \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_0} \right)$
Masse volumique réelle de l'échantillon en kg.m ⁻³	$\rho_s = \frac{M_{\text{matériau}}}{V_{\text{matériau}}} = \frac{M_1 - M_0}{\frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} \left(1 - \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_0} \right)} = \frac{(M_1 - M_0) \rho_{\text{eau}}}{(M_4 - M_0) \left(1 - \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_0} \right)}$

V.1.2. Porosité ouverte

La mesure de la porosité ouverte de béton de palmier dattier a été effectuée en utilisant la méthode de saturation sous vide. Un échantillon à l'état sec (10 cm × 9 cm × 3 cm) a été placé dans un dessiccateur et l'air a été évacué pendant plusieurs heures à l'aide d'une pompe à vide, puis l'eau distillée a été injectée jusqu'à l'immersion totale de l'échantillon (l'imbibition à lieu sous vide afin d'assurer le remplissage total des vides). Après 24 heures de saturation sous vide, la porosité ouverte peut être déduite par trois (3) mesures de masse (avec une précision de 0.01 g), respectivement (Figure II.5) : (i) masse sèche, (ii) masse saturée obtenue par pesée hydrostatique, (iii) masse saturée obtenue par pesée dans l'air. La porosité ouverte peut être exprimée par l'équation suivante [16] :

$$Nt = V_v/V_t = ((W_2 - W_s)/(W_2 - W_1)) \quad (13)$$

Avec,

N_t : Porosité ouverte en vol.%, V_v : volume de vides en m^3 , V_t : volume total de l'échantillon en m^3 , W_1 : masse saturée par pesée hydrostatique en kg, W_2 : masse saturée par pesée dans l'air en kg, W_s : masse sèche en kg.

L'écart entre W_2 et W_s présente la teneur en vide occupée en totalité par l'eau, tandis que l'écart entre W_2 et W_1 permet de calculer le volume total de l'échantillon.

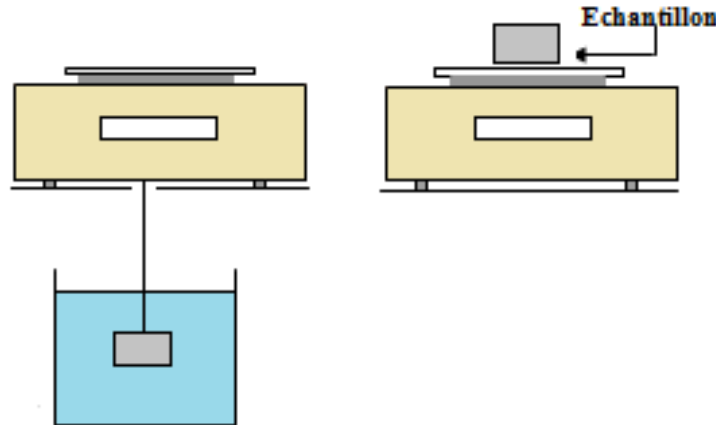


Figure II.5. Pesée hydrostatique et pesée dans l'air.

V.2. Absorption d'eau et cinétique de séchage

Le comportement d'absorption d'eau de béton de palmier dattier a été étudié pour simuler l'effet de la pluie. Deux (2) expériences ont été utilisées pour étudier ce comportement jusqu'à l'état de saturation.

V.2.1. Saturation libre vs. Saturation sous vide

La saturation obtenue par l'immersion libre a été comparée à la saturation sous vide qui a été estimée précédemment durant la détermination de la porosité ouverte (Section IV.1.2).

Après le séchage d'un échantillon de DPC (15 cm × 15 cm × 8 cm de dimensions) dans une étuve à 70°C jusqu'à la stabilisation de la masse. L'échantillon à l'état sec a été immergé complètement dans l'eau distillée, et la masse a été mesurée périodiquement jusqu'à atteindre l'état de saturation.

L'équation (14) représente l'expression de la teneur en eau massique (w) exprimée par unité de volume ($kg.m^{-3}$) :

$$w = (m - m_0)/V = ((m - m_0)/m_0) \cdot \rho_0 \quad (14)$$

Avec,

m : masse de l'échantillon humide en kg, m_0 : masse de l'échantillon à l'état sec en kg, V : volume de l'échantillon en m^3 , ρ_0 : masse volumique sèche de l'échantillon en $kg.m^{-3}$.

V.2.2. Succion capillaire

Lorsqu'un matériau poreux est en contact direct avec l'eau liquide, il absorbe l'eau par capillarité jusqu'à l'état de saturation. Le phénomène de capillarité joue un rôle principal pour les matériaux de construction dont les pores ont des rayons compris entre $0.1 \mu m$ et $1 mm$, par contre les matériaux de construction avec une capillarité très fine ou très grossière ne subissent pratiquement pas de remontée d'humidité (absorption d'eau capillaire) [7].

Le transport par capillarité (Figure II.6) est causé par les tensions superficielles dues aux forces d'attraction mutuelles entre les molécules du fluide (cohésion) et le mouillage dû à l'effet des forces à l'interface entre le fluide et le corps solide (adhésion) [7].

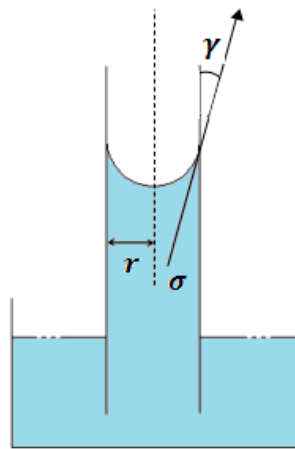


Figure II.6. Représentation schématique du phénomène d'absorption capillaire.

La pression capillaire peut être exprimée par l'équation suivante :

$$P_c = 2 \sigma / R = (2 \sigma \cos \gamma) / r \quad (15)$$

Avec,

P_c : pression capillaire en Pa, r : rayon du capillaire en m, γ : angle de contact eau-solide en degré, σ : tension superficielle eau/air en N.m^{-1} , R : rayon de courbure du ménisque en m.

La succion capillaire de DPC a été étudiée expérimentalement. Les faces latérales perpendiculaires à la surface de contact de l'échantillon à l'état sec (de dimensions $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$) ont été scellées par paraffine et ceci pour trois (3) cm de hauteur ; ensuite, l'échantillon a été placé dans un bain contenant l'eau distillée avec un niveau de 1 cm du fond. Les mesures de masse ont été effectuées avec une précision de 0.001 kg.

Des résultats expérimentaux ont révélé que pour des matériaux biosourcés (exemple, béton de chanvre) en contact direct avec l'eau liquide, l'absorption capillaire de l'eau dans une direction verticale est proportionnelle à la racine carrée du temps [5, 17, 18] :

$$m_w = A_c \Delta\sqrt{t} \quad (16)$$

Avec,

m_w : masse d'eau par unité de surface en kg.m^{-2} , A_c : coefficient d'absorption d'eau en $\text{kg.m}^{-2}\text{h}^{-1/2}$, t : temps en h.

Le coefficient d'absorption d'eau correspond à la masse d'eau absorbée durant 1 h rapportée à la surface [7].

$$A_c = \Delta m / (A \Delta\sqrt{t}) \quad (17)$$

Avec,

Δm : masse d'eau absorbée en kg, A : surface de l'échantillon en contact avec l'eau en m^2 .

Ce paramètre peut être utilisé pour caractériser la capacité d'absorption d'eau des matériaux de construction en contact avec de l'eau liquide, comme indiqué dans le Tableau suivant :

Tableau II.3 : Caractérisation des matériaux de construction selon leur coefficient d'absorption d'eau par contact avec de l'eau liquide [7].

Coefficient d'absorption d'eau $\text{kg.m}^{-2}\text{h}^{-1/2}$	Classification des matériaux de construction
$A_c > 2$	Fortement absorbant
$A_c \leq 2$	Inhibiteur d'eau
$A_c \leq 0.5$	Hydrofuge
$A_c \leq 0.001$	Imperméable*

* Imperméable ne signifie pas simultanément étanche à la vapeur.

V.2.3. Cinétique de séchage

Afin de comprendre la cinétique de séchage de DPC, un échantillon à l'état saturé (Section IV.2.1) a été placé dans une étuve à 70°C (Figure II.7). Le comportement de séchage a été étudié par des mesures périodiques de masse avec une précision de 0.001 kg jusqu'à atteindre l'état sec (c'est-à-dire, lorsque la masse reste stable entre deux (2) mesures).



Figure II.7. Etuve memmert UN "Universal Oven" 450.

V.3. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau a été étudiée afin de caractériser l'aptitude de DPC à transférer l'humidité sous un gradient de pression de vapeur une fois que l'état stationnaire est atteint. La méthode de la coupelle sèche (EN ISO 12572) a été utilisée pour étudier la diffusion de vapeur d'eau à travers le matériau sous des conditions sèches (valeurs typiques : 0% vs. 50% HR). L'essai consiste à créer un gradient de pression partielle de vapeur d'eau sur les deux (2) cotés du matériau afin d'évaluer sa capacité à laisser passer un flux unidimensionnel de vapeur d'eau.

Un échantillon à l'état sec (1.6 cm d'épaisseur et 23 cm² de surface) a été fixé dans le couvercle de la coupelle et scellé par paraffine puis exposé à 44±5% d'humidité relative (condition créée en utilisant une solution saturée de Nitrate de Magnésium) pendant environ un mois. Par ailleurs, la coupelle a été remplie par le gel de silice et une couche d'air a été laissée libre entre l'échantillon et le gel de silice où l'humidité relative était environ 3%. La coupelle (Figure II.8) a été exposée à 44±5% d'humidité relative et des mesures de masse ont été effectuées périodiquement avec une précision de 0.001 g. Pour cet essai, la température a été maintenue à 23°C.

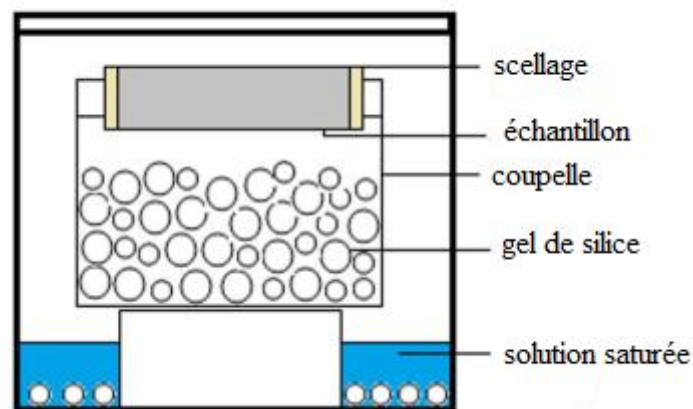


Figure II.8. Représentation schématique du test de perméabilité à la vapeur d'eau.

Le taux de masse (G) est calculé par une régression linéaire de la cinétique de masse, et la perméabilité à la vapeur d'eau est déduite par l'équation (19) [19] :

$$G = \Delta m / \Delta t = -\delta_p A (\Delta P_v / e) \quad (18)$$

$$\delta_p = (G e)/(A (-\Delta P_v)) \quad (19)$$

$$P_v = \varphi \exp(23.5771 - (4042.9/(T - 37.58))) \quad (20)$$

Avec,

G : taux de masse en kg.s^{-1} , δ_p : perméabilité à la vapeur d'eau en $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$, Δm : variation de masse en kg, Δt : temps en s, e : épaisseur de l'échantillon en m, A : aire de la surface de passage en m^2 , ΔP_v : gradient de pression de vapeur d'eau en Pa, T : température en K, φ : humidité relative (adim).

Selon la relation (19), la perméabilité à la vapeur d'eau indique la quantité d'eau en kg qui traverse chaque seconde une section transversale de 1 m^2 lorsque, sur le chemin de diffusion de 1 m de longueur, règne un gradient de pression de vapeur de 1 Pa.

Le rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air et la perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau se dénomme facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ), [17] :

$$\mu = \delta_a/\delta_p \quad (21)$$

Avec,

δ_a : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air en $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$.

Ce facteur indique combien de fois la résistance à la diffusion d'un matériau est plus élevée que celle qu'aurait une lame d'air de même épaisseur à la même température [7].

La détermination du facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau en utilisant les équations (19) et (21) n'est valable que s'il existe un mélange idéal de l'air humide à l'intérieur de la coupelle. En réalité, cette situation est très difficile à atteindre, et pour cette raison le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau doit être corrigé [5].

De façon analogue à la transmission de chaleur, le transport de vapeur à travers un élément de construction peut être traité comme suit [5, 7] :

$$g_v = -(\delta_a/\mu)(\Delta P_v/e) = -\delta_a(\Delta P_v/s_d) = \Delta m/(A \cdot \Delta t) \quad (22)$$

Avec,

s_d : épaisseur d'air équivalente en m.

L'épaisseur d'air équivalente représente l'épaisseur d'une lame d'air ayant une résistance à la diffusion équivalente à celle de la couche de matériau considérée [7].

$$s_{d,tot} = (\delta_a A (-\Delta P_v) \Delta t) / \Delta m \quad (23)$$

$$s_{d,tot} = \mu_{tot} \cdot e_{tot} = \mu \cdot e + \mu_a \cdot e_a \quad (24)$$

$$\mu = (s_{d,tot} - e_a) / e \quad (25)$$

Avec,

$s_{d,tot}$: épaisseur totale d'air équivalente en m, e_a : épaisseur de la couche d'air à l'intérieur de la coupelle en m, μ_a : facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'une lame d'air ($\mu_a = 1$).

V.4. Isotherme de sorption

V.4.1. Analyse expérimentale de l'isotherme de sorption

Les matériaux hygroscopiques ont la capacité de capter les molécules d'eau sur la surface interne de leur système poreux jusqu'à ce qu'ils atteignent une teneur en eau à l'équilibre avec l'humidité de l'air ambiant [1].

Selon les conditions de l'air environnant, la teneur en eau des matériaux poreux augmente avec l'humidité relative. En outre, la courbe d'équilibre qui représente la variation de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative ambiante pour une température donnée est dénommée *isotherme de sorption* : courbe permet de caractériser l'aptitude d'un matériau à fixer de l'eau par adsorption.

Trois (3) zones peuvent être distinguées selon les mécanismes de fixation des molécules de vapeur d'eau dans les pores (Figure II.9) [20] :

- Zone 1 : domaine de l'adsorption mono-moléculaire où la surface des pores recouvre par une seule couche des molécules de vapeur d'eau. Les forces d'attraction sont de type Van der Waals.
- Zone 2 : domaine de l'adsorption poly-moléculaire où l'adsorption des molécules de vapeur d'eau est effectuée sur la monocouche initiale. Cette région peut commencer lorsque l'humidité relative atteint 10-20% [8].

- Zone 3 : domaine de la condensation capillaire où les couches poly-moléculaires se rejoignent et un changement de phase se produit et l'eau se condense en formant un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. Lorsque l'humidité relative augmente encore, les pores se remplissent des plus fins au plus gros.

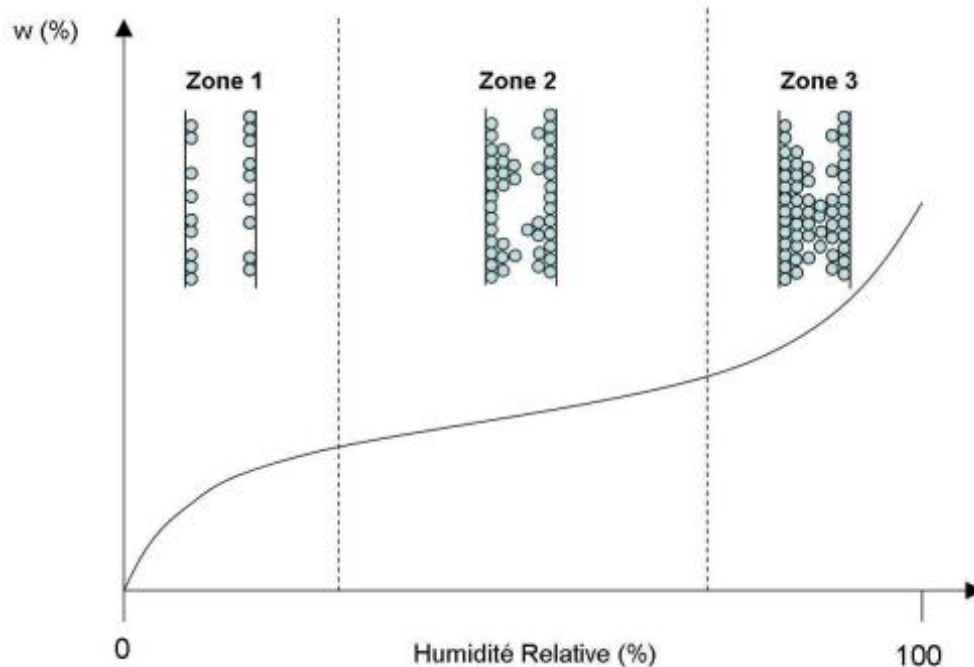


Figure II.9. Représentation schématique d'une isotherme de sorption et des mécanismes de fixation des molécules d'eau [20].

Dans la zone 1, les forces intermoléculaires de type Van der Waals agissant sur les molécules de vapeur d'eau au voisinage de l'interface solide-fluide ; ce sont des forces qui agissent à courte distance mais de forte intensité (dix mille fois supérieures à celle de la pesanteur) ce qui influe sur les propriétés physiques de l'eau physisorbée (c'est-à-dire, les propriétés physiques de l'eau physisorbée sont différentes des propriétés de l'eau pure) [16]. En outre, la physisorption n'est pas spécifique : elle est peu influencée par la nature de la surface [16].

La teneur en eau à l'équilibre ainsi que le point où la condensation capillaire commence sont des paramètres spécifiques du matériau ; cela dépend de la taille des surfaces internes disponibles pour l'adsorption et du volume poreux approprié pour la condensation capillaire [8]. La valeur (0.6) d'humidité relative peut être considérée comme un point de transition arbitraire entre l'adsorption physique et la condensation capillaire [8].

La méthode la plus courante pour maintenir l'humidité relative stable dans une enceinte hermétique est basée sur l'utilisation d'une solution. Le contrôle de l'humidité relative de l'air en équilibre avec la solution est basé sur l'activité de l'eau en modifiant les concentrations, ou la nature des solutés [16]. L'activité de l'eau a_w est conventionnellement considérée comme étant équivalente à sa pression de vapeur, par rapport à celle de l'eau pure à la même température [21].

Les systèmes eau-sel ont été choisis : pour une solution saturée par un sel, l'activité de l'eau reste stable quand il y a au moins un cristal de sel en excès dans la solution [16], tandis que le travail avec des solutions très saturées (avec une grande quantité de sel non dissous) permet de maintenir la valeur de l'humidité relative constante pendant toute la durée de l'expérience.

La méthode de travail est basée sur la détermination de l'isotherme de sorption point par point par des paliers successifs d'humidité relative croissante (EN ISO 12571) : $27\pm 5\%$, $47\pm 5\%$, $77\pm 5\%$, $88\pm 5\%$ et $97\pm 5\%$. Ces ambiances sont maîtrisées par les solutions salines saturées suivantes : chlorure de magnésium, nitrate de magnésium, chlorure de sodium, chlorure de potassium, chlorure de baryum. Les mesures de gain de masse ont été effectuées avec une précision de 0.001 g. L'effet de la température sur l'isotherme de sorption n'est pas pris en compte et la température a été fixée à 23°C . Cette méthode impose que l'échantillon soit en équilibre avec le milieu ambiant afin de déterminer le point de l'isotherme.

Les échantillons testés ($3\text{ cm}\times 3\text{ cm}\times 2\text{ cm}$) ont été séchés pendant 24 heures dans une étuve à 70°C , puis pendant 72 heures dans le gel de silice. Les environnements humides ont été créés à l'intérieur de cinq (5) bocal en verre en utilisant cinq (5) différentes solutions salines saturées qui ont été préparées selon la recommandation de la procédure du group COST 90 [21]. On considère que l'équilibre de la teneur en eau est atteint lorsque les mesures de gain de masse restent stables.

La plupart des isothermes de sorption peuvent être regroupées dans les six (6) types représentés dans la Figure II.10 (IUPAC classification) [14]. La quantité de gaz adsorbée a été représentée en fonction de la pression relative P/P_0 , où P est la pression d'équilibre et P_0 est la pression de saturation à la température de mesure.

Les types II et IV présentent un point d'inflexion (point B) qui souvent pris pour indiquer le point de transition de fixation mono-moléculaire à poly-moléculaire.

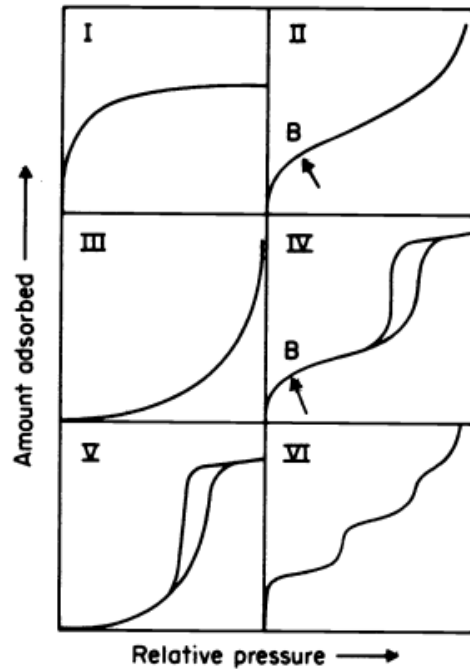


Figure II.10. Types des isothermes de sorption [14].

V.4.2. Modélisation de l'isotherme de sorption

Dans le but d'exprimer mathématiquement la relation entre la teneur en eau d'un matériau avec la température et l'humidité relative de l'environnement, divers modèles théoriques (empiriques et semi-empiriques) ont été proposés tels que BET et GAB.

Le modèle de Brunauer-Emmet-Teller (BET) a été développé en considérant que les molécules de la première couche sont liées au solide par une énergie égale à la chaleur molaire d'adsorption E_1 ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$), et que les molécules des autres couches sont liées entre elles par une énergie égale à la chaleur molaire latente de vaporisation E_L ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) [13, 15]. Son application pour les milieux poreux n'est valable que pour les humidités relatives inférieures à 40%. Plus tard, Guggenheim, Anderson et De Boer ont indépendamment établi le modèle GAB. Ce modèle postule que les états de molécules d'eau dans la deuxième couche et dans les couches supérieures sont identiques mais différents de ceux à l'état liquide pur [22]. Ce modèle tient compte d'une chaleur d'adsorption $E_m \neq E_L$ pour toutes les couches moléculaires [13].

Le modèle GAB est un bon outil de lissage mathématique des isothermes de sorption sur la quasi-totalité du domaine d'humidité relative [13].

D'un point de vue physique, ce modèle est valable lorsqu'il n'y a pas de condensation capillaire : typiquement $HR < 40\%$, c'est-à-dire l'ajustement du modèle doit se faire en excluant la zone de condensation capillaire, mais d'un point de vue mathématique, l'ajustement du modèle peut également se faire sur l'ensemble du domaine d'humidité relative [13].

Le modèle GAB s'appuie principalement sur des données expérimentales puisque l'évolution de la teneur en eau est très sensible à la nature du matériau. Ce modèle couvre une large gamme d'humidité relative (0.05 to 0.8-0.9) et peut être exprimé selon l'équation suivante [19] :

$$u/u_m = [C_G k \varphi] / [(1 - k \varphi)(1 - k \varphi + C_G k \varphi)] \quad (26)$$

Avec,

u_m : saturation de la monocouche en kg.kg^{-1} , φ : humidité relative (adim), C_G , k : paramètres d'ajustement du modèle de GAB.

La teneur en eau mono-moléculaire (u_m) d'un matériau peut donner une idée sur sa surface spécifique (plus la teneur en eau mono-moléculaire est élevée plus la surface spécifique est plus grande). La surface spécifique d'un solide est égale au rapport entre l'aire de la surface accessible à un fluide et la masse du solide, exprimée en $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ [16]. Les constantes de GAB peuvent être théoriquement exprimées par les équations suivantes [13] :

$$C_G = \exp((E_l - E_m)/RT) \quad (27)$$

$$k = \exp((E_L - E_m)/RT) \quad (28)$$

Avec,

R : constante des gaz parfaits en $\text{J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$, T : température absolue en K.

La méthode la plus simple pour déterminer les constantes de l'isotherme de GAB est connue par *la forme transformée de l'isotherme de GAB* ; la relation de GAB transformée à la forme parabolique peut être écrite comme suit [23] :

$$\varphi/u = \alpha + \beta \varphi + \gamma \varphi^2 \quad (29)$$

$$\alpha = 1/(k C_G u_m) \quad (30)$$

$$\beta = (C_G - 2)/(C_G u_m) \quad (31)$$

$$\gamma = -k (C_G - 1)/(C_G u_m) \quad (32)$$

L'ajustement polynomial de second degré permet de déterminer les constantes de l'équation (29) ; ces constantes sont utilisées pour calculer les paramètres de GAB comme suit [22] :

$$k = (f^{1/2} - \beta)/(2 \alpha) \quad (33)$$

$$C_G = 2 + \beta/(k \alpha) \quad (34)$$

$$u_m = 1/(\beta + 2 k \alpha) \quad (35)$$

$$f = \beta^2 - (4 \alpha \gamma) \quad (36)$$

V.5. Diffusivité hydrique

Dans un état isotherme, la loi de Fick indique la relation entre le taux de diffusion de vapeur d'eau dans l'air et le gradient de concentration de vapeur d'eau [8] :

$$g_a = -D_a (\partial \rho_v / \partial x) \quad (37)$$

Avec,

g_a : densité de flux de vapeur dans l'air en $\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, D_a : diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air stagnant en m^2s^{-1} , ρ_v : concentration de la vapeur d'eau en kg.m^{-3} .

Cette loi est adoptée dans la physique du bâtiment pour décrire la diffusion de la vapeur d'eau dans les matériaux poreux :

$$g_v = -D_w (\partial w / \partial x) \quad (38)$$

Avec,

D_w : diffusivité hydrique en m^2s^{-1} .

Prenant en compte l'isotherme de sorption, la relation précédente devienne :

$$g_v = -D_w ((\partial w / \partial \varphi) \cdot (\partial \varphi / \partial x)) \quad (39)$$

Considérant que le gradient de pression de vapeur d'eau est linéaire dans le matériau, le gradient d'humidité relative est également linéaire [19] :

$$(\partial\varphi/\partial x) = (\varphi_2 - \varphi_1)/e = (P_{v2} - P_{v1})/(e \cdot P_s) \quad (40)$$

$$g_v = -D_w \left((\partial w/\partial\varphi) \cdot ((P_{v2} - P_{v1})/(e \cdot P_s)) \right) \quad (41)$$

D'autre part, la diffusion de la vapeur d'eau dans les matériaux poreux peut être exprimée par l'équation suivante :

$$g_v = -\delta_p (\partial P_v/\partial x) \quad (42)$$

L'égalité entre les équations (41) et (42) conduit à une expression de la diffusivité hydrique [24] :

$$D_w = (\delta_p \cdot P_s)/(\partial w/\partial\varphi) \quad (43)$$

La pression de vapeur de saturation peut être déterminée en fonction de la température en utilisant la relation empirique suivante qui est valable dans la plage de température 0 – 80°C avec $\pm 0.15\%$ de précision [8] :

$$P_s = \exp(23.5771 - (4042.9/(T - 37.58))) \quad (44)$$

Avec,

T : température absolue en K.

La diffusivité hydrique est largement utilisée pour étudier le transport d'humidité dans les matériaux de construction sous un gradient de pression de vapeur [24]. Elle mesure la rapidité du changement des conditions d'humidité dans le matériau sous des conditions ambiantes variables. Ce paramètre est déterminé en utilisant la valeur expérimentale de la perméabilité à la vapeur d'eau ainsi que la capacité hydrique spécifique (dérivée de l'isotherme de sorption).

La capacité hydrique spécifique décrit la capacité de stockage de l'humidité par le matériau de construction. Mathématiquement, ce paramètre est défini par la pente de l'isotherme de sorption [8].

V.6. Conductivité thermique

Pour évaluer le comportement thermique de DPC sous plusieurs conditions, des mesures ont été effectuées à l'état sec et à l'état humide (80% HR) et pour différents niveaux de température (14°C, 27°C et 42°C). La mesure de la conductivité thermique est effectuée à l'aide d'un dispositif commercial produit par Applied Precision, Ltd (Figure II.11) qui applique une méthode de mesure dynamique qui permet de réduire la période de mesure à environ 10 à 16 min. Cette mesure est basée sur l'analyse de la réponse de la température du matériau analysé aux impulsions de flux de chaleur. Le flux de chaleur est généré par une résistance électrique de chauffage insérée dans la sonde qui est en contact thermique direct avec la surface de l'échantillon. L'évaluation de la conductivité thermique est basée sur les enregistrements de températures échantillonnées périodiquement en fonction du temps.



Figure II.11. Appareil ISOMET 2114 (unité de commande et sonde).

Afin de contrôler l'humidité relative et la température pendant les essais, les mesures ont été effectuées sur un échantillon cubique (150 mm× 150 mm× 150 mm) placé dans une chambre climatique (Figure II.12).

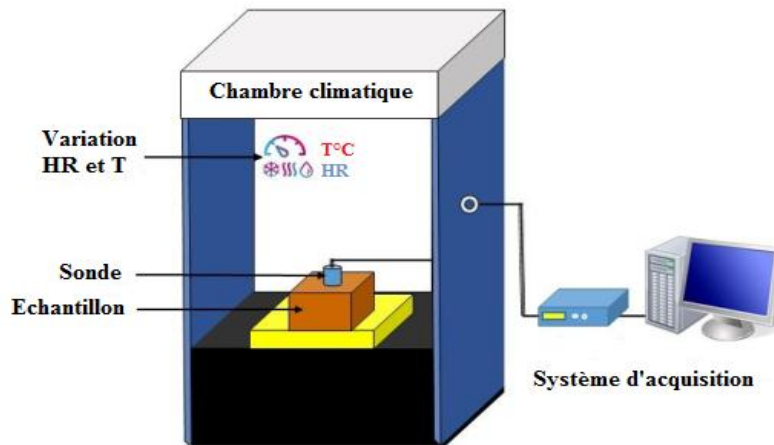


Figure II.12. Représentation schématique de la méthode de mesure de la conductivité thermique.

VI. Conclusion

Le béton de palmier dattier est un matériau basé principalement sur la substitution des gravillons traditionnels par des fibres de palmier dattier. Cette substitution par un matériau végétal affecterait les propriétés intrinsèques du matériau, parmi eux, on peut citer la porosité, la perméabilité à la vapeur d'eau et la conductivité thermique. Tous les résultats expérimentaux de ce travail seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

Références

- [1] H.M. Kunzel, "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and Two-dimensional Calculation Using Simple Parameters," Rapport, Institut Fraunhofer de physique des bâtiments, Allemagne, 1995.
- [2] D. Allinson and M. Hall, "Hygrothermal analysis of stabilised rammed earth test building in the UK," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 845-852, 2010.
- [3] F.Collet and S. Pretot, "Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 612-619, 2014.
- [4] G.B.A. Coelho and F.M.A. Henriques, "Influence of driving rain on the hygrothermal behavior of solid brick walls," *Journal of Building Engineering*, vol. 7, pp. 121-132, 2016.

- [5] A. Evrard, "Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials," Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2008.
- [6] M.R. Hall and D. Allinson, "Transient numerical and physical modelling of temperature profile evolution in stabilised rammed earth walls," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 433-441, 2010.
- [7] C. Zürcher and T. Frank, *Physique du Bâtiment - Construction et Energie: vdf Hochschulvlg*, Zürich, Suisse, 2014.
- [8] R. Peuhkuri, "Moisture Dynamics in Building Envelopes," Thèse de doctorat, Rapport R-071, Université Technique du Danemark, Danemark, 2003.
- [9] S.K. Duggal, *Building Materials: New Age International (P) Ltd, Publishers*, New Delhi, India, 2008.
- [10] V. Cérezo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'état, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2005.
- [11] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, and A. Kareche, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building," *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 98-104, 2014.
- [12] N. Benmansour, "Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat," Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2015.
- [13] J. Chamoin, "Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation," Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Rennes, France, 2013.
- [14] K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouquérol, and T. Siemieniowska, "Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 57, pp. 603-619, 1985.

- [15] A.D. Tran Le, "Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment," Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2010.
- [16] B.R. Tournier, "Transferts par capillarité et évaporation dans des roches - Rôles des structures de porosité," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, France, 2001.
- [17] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, and T. Langlet, "Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 679-687, 2016.
- [18] R. Walker and S. Pavia, "Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 64, pp. 270-276, 2014.
- [19] F.Collet, J. Chamoin, S. Pretot, and C. Lanos, "Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 294-303, 2013.
- [20] C. Magniont, "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2010.
- [21] R. Jowitt and P.J. Wagstaffe, "The certification of the water content of microcrystalline cellulose (MCC) at 10 water activities," Rapport, Commission des Communautés Européennes, 1989.
- [22] E.O. Timmermann, J. Chirife, and H.A. Iglesias, "Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, pp. 19-31, 2001.
- [23] E.O. Timmermann, "Multilayer sorption parameters: BET or GAB values?," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 220, pp. 235-260, 2003.
- [24] M.Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, and T. Langlet, "Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity," *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 91-99, 2015.

Chapitre III : Résultats et discussions

III. Introduction

L'objectif de ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus à travers plusieurs expériences mentionnées dans le chapitre précédent concernant les propriétés hydriques et thermiques de béton de palmier dattier.

IV. Béton de palmier dattier (DPC)

Le béton de palmier dattier (DPC), comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, est un matériau composite constitué d'un liant à base de ciment et chargé avec des fibres de palmier dattier. La formulation présentée dans la Figure III.1 est composée de 15% de fibres de palmier dattier (fibres fines).

La Figure III.1A présente un échantillon typique de DPC de dimensions 15 cm× 15 cm× 15 cm. La Figure III.1B représente une vue de la surface de DPC au microscope optique. La vue d'une fibre de palmier dattier au MEB (Microscope Electronique à Balayage) (Figure III.1C) présente des fibres multicellulaires de forme cylindrique.

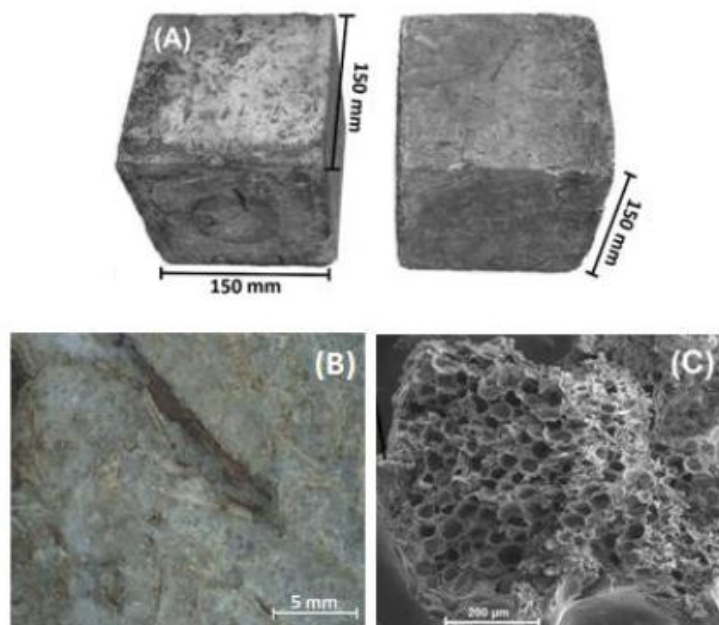


Figure III.1. Matériau DPC (A), vue au microscope optique de la surface de DPC (B) et vue au MEB d'une fibre de palmier dattier DPF (C).

V. Masse volumique et porosité

L'incorporation des fibres naturelles dans un liant à base de ciment peut contribuer à alléger le béton et augmenter la teneur en vide en raison de la porosité des fibres ainsi qu'aux espaces interparticules entre les fibres.

Le Tableau III.1 présente une comparaison des résultats de la masse volumique apparente et de la porosité de DPC avec ceux de MHC. MHC est un béton de chanvre fabriqué avec mélange un liant à base de chaux et particules de chanvre fibrées, avec un rapport de masse chanvre/liant égale à 0.5.

Il est important de souligner qu'il existe un effet de la nature des inclusions végétales, de leur concentration ainsi que de la nature de la matrice, de la composition du mélange et de la méthode de fabrication sur le comportement du matériau biocomposite. Cependant, nous prenons l'initiative de comparer la masse volumique et la porosité des matériaux biocomposites destinés à la même fonction, c'est-à-dire, matériaux pour la construction.

La porosité totale comprend des informations sur tous les pores existants, qu'ils soient connectés ou non. On peut constater que la porosité totale est importante pour les deux matériaux (au-dessus de 50%), avec une différence liée à la masse volumique apparente et à la masse volumique du solide de chaque matériau. La dépendance de la porosité sur la masse volumique est toujours vérifiée avec des matériaux à matrice minérale et fibres végétales [1]. Dans les matériaux composites, la porosité totale résulte des porosités internes du liant et du matériau végétal et des macroporosités. Concernant les matériaux végétaux, les fibres de palmier dattier (DPF) présentent une faible porosité par rapport au chènevotte.

Par ailleurs, le DPC montre une teneur élevée des pores ouverts (58%) qui représente (91%) de la porosité totale, et la même chose pour MHC (77%), beaucoup plus élevée que celui du liant à base de ciment comme le mortier (17%) [2]. Les matériaux avec des espaces vides connectés se comportent différemment par rapport aux matériaux avec le même pourcentage d'espaces vides qui sont cependant fermés. Un taux élevé de porosité ouverte peut contribuer à laisser la construction « respirer » permettant la transmission de la vapeur d'eau à l'extérieur.

Tableau III.1 : Résultats de la masse volumique et de la porosité.

	Masse volumique apparente	Masse volumique du solide	Porosité totale	Porosité ouverte	Référence
	kg.m ⁻³	kg.m ⁻³	Vol. %	Vol. %	
DPC	954	2619	64	58	Ce travail
MHC	430	2002	79	77	[3]
DPF	264	1615	84	-	Ce travail
Chènevotte	125	1259	90	-	[4]

VI. Absorption d'eau et cinétique de séchage

VI.1. Absorption d'eau

VI.1.1. Saturation libre vs. saturation sous vide

Le test d'immersion libre dans l'eau liquide a été étudié pendant 44 heures et l'évolution correspondante de l'absorption d'eau est représentée dans la Figure III.2. Deux (2) phases peuvent être distinguées : le remplissage de gros capillaires où 91%_{masse} d'eau a été absorbé au cours des cinq (5) premières heures, suivi par le remplissage des capillaires plus petits où 9%_{masse} d'eau a été absorbé pendant les 39 heures restantes (Tableau III.2).

L'absorption dépend principalement de la porosité ouverte du matériau biocomposite ; ces pores sont générés en grands nombres lors de l'introduction des fibres végétales dans des matériaux composites. Chikhi et al [5] ont constatés que l'absorption d'eau des matériaux composites à base de gypse a été affectée par la teneur en fibres de palmier dattier. Des résultats similaires ont été obtenus par Benmansour et al [6] pour des matériaux composites avec un liant à base de ciment et fibres de palmier dattier.

La saturation capillaire de DPC est de 429 kg.m⁻³ par rapport à 546 kg.m⁻³ pour LHM-wall [7]. Le matériau chaux-chanvre LHM-wall (formulation – mur) est un mélange de liant à base de chaux et de particules de chanvre (presque aucune fibre ni poussière), fabriqué avec un rapport de masse chanvre/liant égale à 0.5.

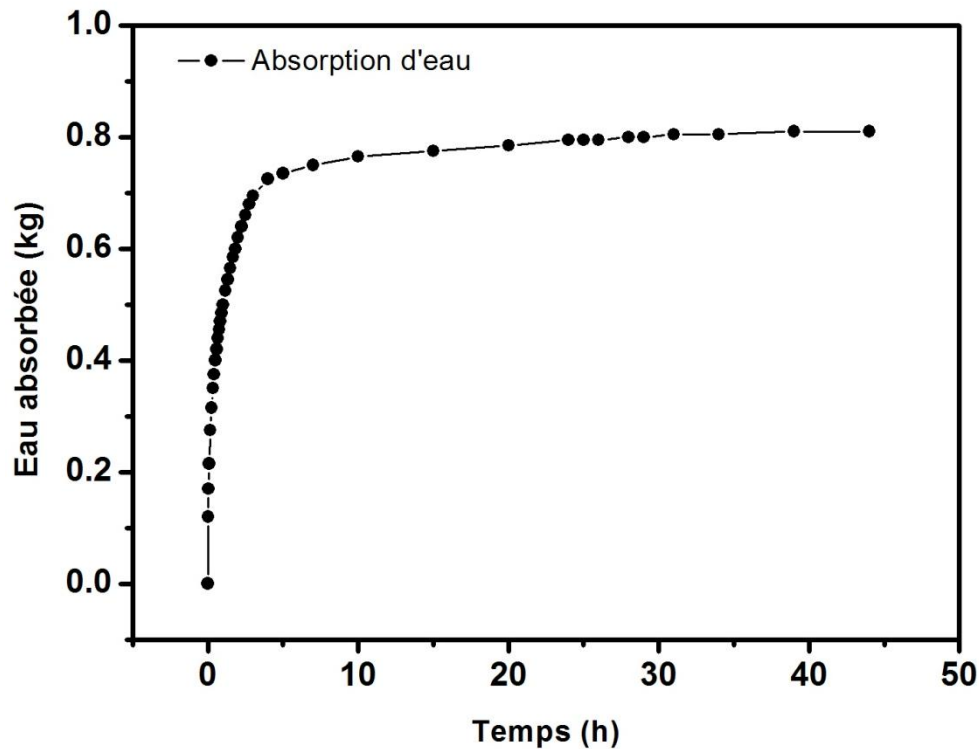


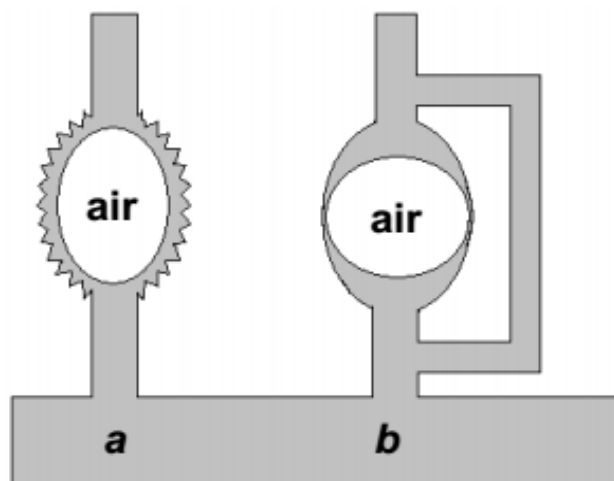
Figure III.2. Absorption d'eau lors du test d'immersion libre.

Concernant le test de saturation sous vide, le résultat montre que la teneur en eau au point de saturation a atteint une valeur élevée : $58\%_{\text{masse}}$ pendant 24 heures contre $45\%_{\text{masse}}$ pendant 44 heures en test d'immersion libre. En revanche, la teneur en eau maximale de LHM-wall est égale à $166\%_{\text{masse}}$ par rapport à $124\%_{\text{masse}}$ de saturation capillaire [7]. Ces résultats reflètent l'état où la structure poreuse est complètement remplie d'eau, alors qu'un test d'immersion n'entraîne pas une saturation maximale, du fait que l'air devient piégé dans le solide poreux.

Le piégeage est un phénomène qui apparaît fortement lorsqu'il y a une imbibition en régime "polyphasique" ou simplement "diphase". Ce phénomène peut disparaître lorsque l'imbibition devient en régime "monophasique". Lors de l'imbibition, le fluide le plus mouillant chasse partiellement le fluide le moins mouillant, mais en raison de la complexité du réseau poreux, une certaine quantité de ce dernier reste piégée dans le matériau [8]. Deux (2) mécanismes de piégeage peuvent être trouvés dans la littérature (Figure III.3) [8] : (i) par rugosité et/ou irrégularités à la surface des pores qui créent localement un réseau microporeux dans lequel le fluide poursuivra préférentiellement sa progression, (ii) par dérivation "un pore et son accès", où l'eau chemine plus rapidement par les petits chenaux (pores plus fins) contournant des grands pores, ce qui permet de piéger l'air dans les élargissements.

Tableau III.2 : Masse d'eau absorbée en fonction du temps.

Temps Heures	Masse d'eau absorbée kg
1	0.500
5	0.735
10	0.765
15	0.775
20	0.785
25	0.795
31	0.805
34	0.805
39	0.810
44	0.810

**Figure III.3.** Mécanismes de piégeages de l'air : par la rugosité (a), et par dérivation (b) [8].

VI.1.2. Succion capillaire

La succion capillaire a été étudiée pendant 82 heures. L'évolution de l'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps (Figure III.4) peut être divisée en deux (2) phases distinctes : une évolution linéaire durant les cinq (5) premières heures, suivie par une évolution faible et lente, où la masse d'eau absorbée durant 77 heures a été environ 12 kg.m^{-2} (Tableau III.3).

Généralement, l'expérience de la succion capillaire est terminée lorsque l'eau atteint le côté supérieur de l'échantillon pendant une période connue. Cette période est liée aux propriétés de transport du matériau et à la hauteur de l'échantillon. Selon la norme ISO 15148 standard, l'expérience est terminée après 24 heures et le coefficient d'absorption d'eau peut être déterminé par la pente de la courbe de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps. Le reste de la courbe est lié à la taille de l'échantillon et n'est pas utilisé pour la caractérisation des matériaux [7]. Dans notre cas, la cinétique de la masse d'eau absorbée présente une structure linéaire pendant les cinq (5) premières heures et le coefficient d'absorption d'eau a donc été estimé par ajustement linéaire (Figure III.4).

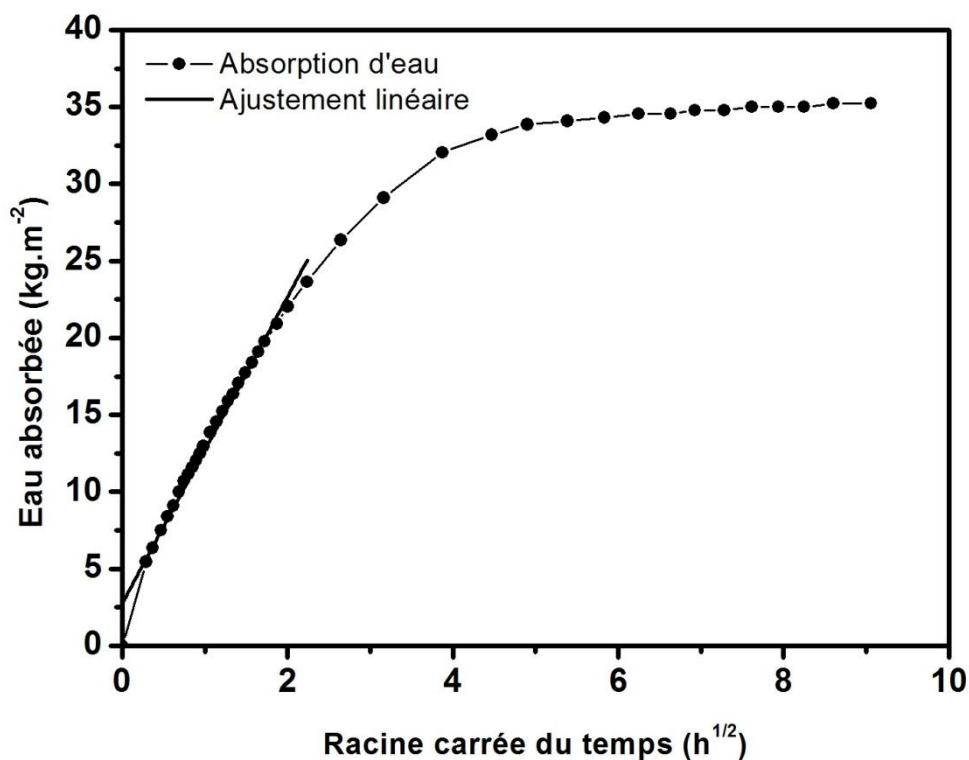


Figure III.4. Cinétique de la masse d'eau absorbée lors du test de succion capillaire.

Tableau III.3 : Masse d'eau absorbée (rapportée à la surface) en fonction du temps.

Temps Heures	Masse d'eau absorbée kg.m ⁻²
5	23.636
10	29.091
24	33.864
48	34.773
82	35.227

L'ordonnée à l'origine de la droite (Figure III.4) représente le taux d'absorption au moment de contact de l'échantillon avec l'eau ($t = 0$) ; c'est la quantité d'eau qui a été rapidement absorbée par les pores ouverts de la surface absorbante.

Comme indiqué dans le Tableau III.4, le DPC, les bétons de chanvre et le mortier (liant à base de ciment) peuvent être classés comme fortement absorbeur, car les résultats du coefficient d'absorption d'eau sont supérieurs à $2 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1/2}$ [9]. Cependant, le DPC présente une valeur élevée que celle des bétons de chanvre et du liant à base de ciment comme le mortier ; ceci est probablement lié aux structures de pores ouverts de ces matériaux.

La capacité d'un matériau à absorber de l'eau peut être affectée par le type de liant utilisé ; Arendigoyen et *al* [10] ont trouvé que le coefficient capillaire des pâtes de ciment-chaux diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment en raison des produits d'hydratation qui augmentent le nombre des plus petits pores. Des résultats similaires ont été obtenus par Walker et *al* [11] qui ont trouvés que l'utilisation de liant comprenant de la pouzzolane (20% de métakaolin) et de la chaux hydratée (80%), a produit un béton de chanvre avec 508 kg.m^{-3} de masse volumique qui permet de réduire le coefficient d'absorption d'eau à $3.4 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1/2}$.

Tableau III.4 : Résultats du coefficient d'absorption d'eau.

	Coefficient d'absorption d'eau $\text{kg.m}^{-2}\text{h}^{-1/2}$	R^2	Référence
DPC	9.9	0.983	Ce travail
M	3.4	0.922	[11]
LHM-wall	4.4		[7]
Mortier	3.4		[2]

M - béton de chanvre avec un liant chaux-métakaolin

Malgré la forte teneur en ciment dans le DPC, le coefficient d'absorption d'eau est encore très élevé. Dans cette situation, l'effet de 15% de fibres de palmier dattier sur l'absorption capillaire est plus évident que celui de 62% de liant hydraulique.

Les propriétés des composites dépendent de la matrice et des fibres, ainsi que de la compatibilité interfaciale [12]. Le principal inconvénient associé aux fibres de cellulose dans l'application du ciment est l'incompatibilité entre les deux (2) phases [13]. La rugosité ou la douceur de la peau de la fibre peut être l'une des principales raisons qui peuvent influencer la compatibilité interfaciale fibre-matrice, et par conséquent la résistance mécanique et le comportement d'absorption d'eau du matériau composite.

Le traitement de surface des fibres de cellulose est l'une des principales solutions pour la modification de la surface externe des fibres afin de réduire leur caractère hydrophile et améliorer leur adhérence sur la matrice cimentaire, et par conséquent diminuer l'absorption d'eau et améliorer les propriétés mécaniques du composite [13]. En outre, le traitement des fibres peut entraîner une liaison meilleur et plus stable entre les fibres et la matrice [12].

VI.2. Cinétique de séchage

La cinétique de séchage de DPC a été étudiée à 70°C pendant 92 heures et les résultats sont présentés dans la Figure III.5 et dans le Tableau III.5. Le séchage à une température très élevée pourrait modifier les propriétés du matériau et aussi la structure des pores, ce qui pourrait entraîner la formation de microfissures dans le matériau [14].

Lewis [15] a postulé que le séchage comprenait deux (2) processus : (i) la diffusion de l'humidité de l'intérieur du solide vers la surface, et (ii) l'évaporation de l'humidité de la surface du solide.

L'échantillon saturé en eau contenait initialement une quantité homogène d'eau dans sa géométrie (45%_{masse}). L'exposition à 70°C pendant 92 heures a entraîné une perte progressive de la teneur en eau jusqu'à atteindre l'état sec. Le comportement de séchage de DPC peut être divisé en trois (3) phases principales : (i) diminution linéaire de la teneur en eau avec un taux d'évaporation égal à 37 g.h⁻¹. Ce comportement est principalement dû à la continuité de l'approvisionnement en eau de l'intérieur du matériau vers la surface. Au cours de cette phase, la teneur en eau a atteint environ 24%_{masse} pendant les dix (10) premières heures. (ii) La diminution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage est poursuivie ; la teneur en eau a atteint une très faible valeur (environ 3%_{masse}) pendant les 34 heures suivantes. Cette évolution est due à la réduction de l'approvisionnement en eau de l'intérieur du matériau. Enfin, (iii) un comportement très lent peut être observé, où la teneur en eau est complètement évaporée (0%_{masse} de la teneur en eau). Le matériau a perdu 3%_{masse} de la teneur en eau pendant une très longue période, 48 heures. Ce comportement est dû à l'interruption de l'approvisionnement en eau liquide et à la prédominance de la diffusion de vapeur sur le processus de séchage.

A la fin, nous pouvons conclure que les phases de séchage dépendent principalement de la teneur en humidité initiale et des conditions aux limites. En outre, le processus de séchage devient long et difficile d'une phase à l'autre en raison de la transformation progressive des mécanismes de transfert d'humidité, commence par le transport en phase liquide et se termine par le transport en phase vapeur.

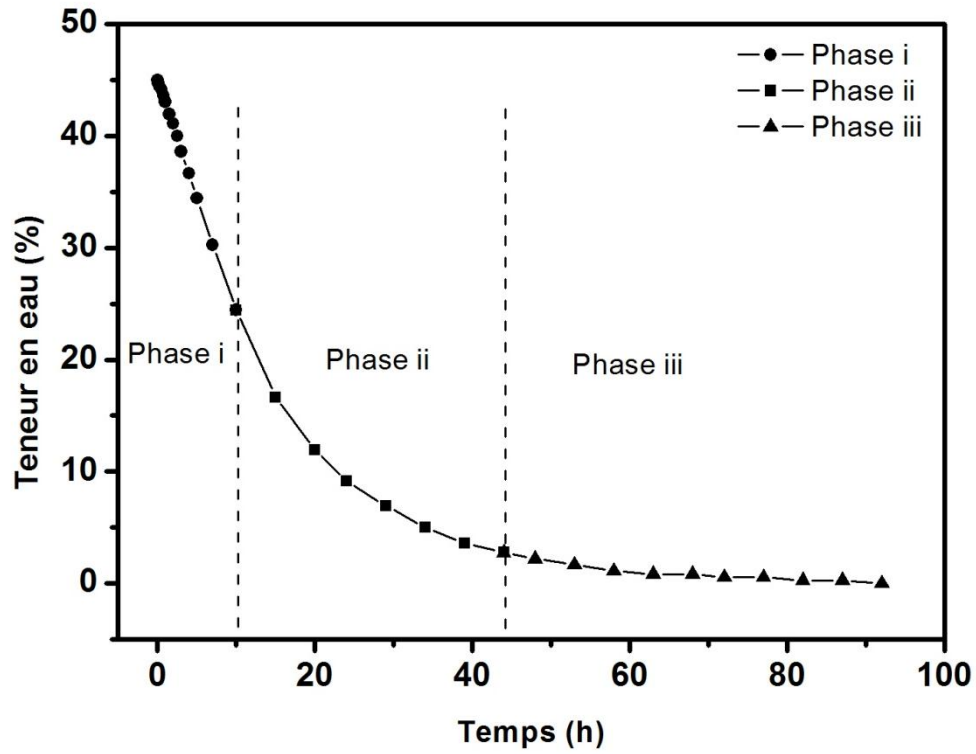


Figure III.5. Cinétique de séchage.

Tableau III.5 : Masse d'eau perdue en fonction du temps.

Temps Heures	Masse d'eau perdue kg
0	0
5	0.190
10	0.370
24	0.645
44	0.760
72	0.800
92	0.810

VII. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau de DPC a été étudiée en utilisant la méthode de la coupelle sèche (EN ISO 12572). La Figure III.6 présente la cinétique de la variation de masse durant l'expérience de la coupelle sèche ; l'état stationnaire est maintenu pendant huit (8) jours et le test se poursuit jusqu'à la saturation du gel de silice. Ainsi, la perméabilité à la vapeur d'eau est déterminée à partir de la pente de la cinétique de la variation de masse le long de la période stationnaire. Le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent avec un flux de vapeur constant dépend de la nature du matériau et aussi de l'épaisseur de l'échantillon [8]. Les résultats soulignent que le DPC est un matériau perméable à la vapeur d'eau en raison de sa microstructure. De nombreux chercheurs ont étudié l'effet de la microstructure sur la perméabilité à la vapeur d'eau. Walker et *al* [11] ont souligné que les macropores entre les charges végétales ont une influence significative sur la perméabilité à la vapeur d'eau par rapport aux micropores qui sont présents dans le liant pour le béton de chanvre.

Le Tableau III.6 présente les résultats du facteur de résistance à la vapeur d'eau de DPC par rapport aux autres matériaux de construction. On peut constater que le DPC a une valeur très faible ainsi que le béton de chanvre (LHM-wall) qui sont des matériaux biocomposites, contrairement aux matériaux de construction traditionnels comme le béton solide et le béton cellulaire autoclavé qui présentent une forte résistance à la vapeur d'eau. Ainsi, la présence de fibres de palmier dattier dans un liant à base de ciment a conduit à améliorer de manière significative la microstructure et également le transfert de vapeur d'eau.

Le facteur de résistance à la vapeur d'eau de DPC déterminé en négligeant la résistance de l'air à l'intérieur de la coupelle est relativement élevée (5.4) par rapport à la valeur corrigée (4.4). Un comportement similaire peut être observé pour LHM-wall [7].

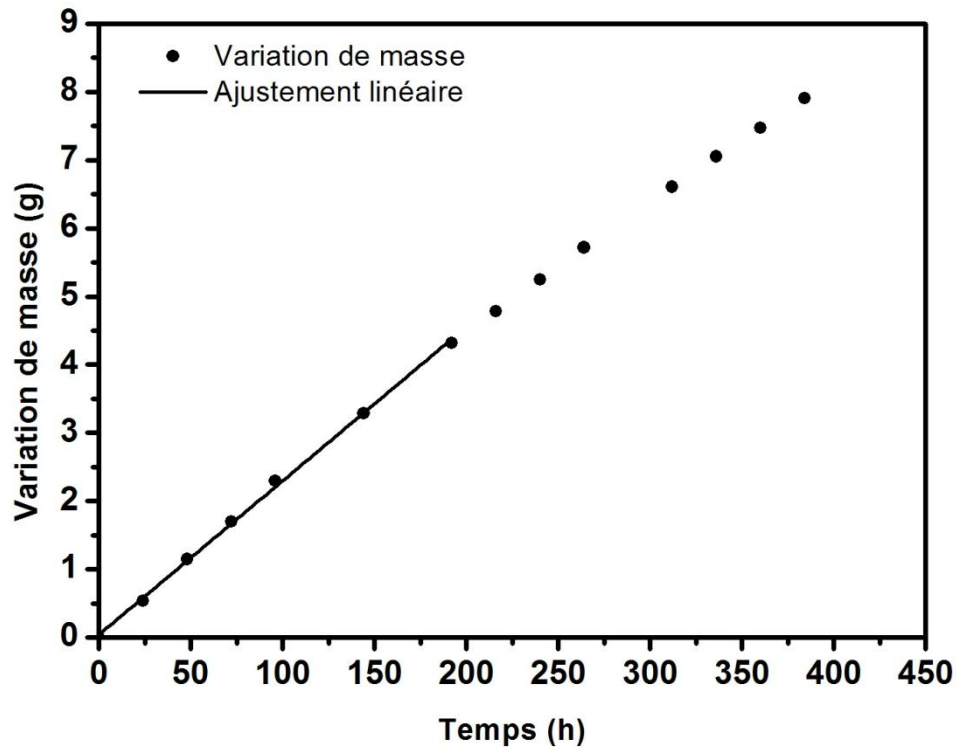


Figure III.6. Cinétique de variation de masse durant la coupelle sèche.

Table III.6 : Résultats du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau en point sec.

	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	Référence
	-	
DPC	4.4	Ce travail
LHM-wall	4.8	[7]
Béton solide	130	[16]
Béton cellulaire autoclavé	10	[16]

En revanche, la méthode de la coupelle humide est souvent utilisée pour déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau à un niveau élevé d'humidité relative ($0.5 < \varphi < 0.98$ [17]). Généralement, la grandeur communément appelée « perméabilité à la vapeur » est en fait la somme de trois (3) termes de transport d'humidité : (i) transport vapeur par diffusion, (ii)

transport vapeur par effusion et (iii) transport liquide [3]. Les mesures avec la méthode de la coupelle humide sont relativement différentes par rapport aux résultats secs. Ce phénomène est souvent expliqué par l'augmentation du transport d'humidité en phase liquide pour des niveaux élevés d'humidité relative (en raison de la condensation capillaire). Des résultats expérimentales de la coupelle humide obtenus pour LHM-wall présentent une valeur relativement faible (4.76), par rapport à (4.85) au point sec [7]. Les expériences de la coupelle sèche et de la coupelle humide ont été effectuées avec les couples suivantes d'humidité relative : (3% ; 50%) et (93% ; 50%), respectivement. De plus, la température est souvent maintenue constante à environ 23°C.

VIII. Isotherme de sorption

L'isotherme de sorption a été étudiée pour une large gamme d'humidité relative en utilisant plusieurs solutions salines saturées.

La Figure III.7 présente l'isotherme de sorption expérimentale et le lissage mathématique avec le modèle GAB. Les paramètres de modèle GAB sont donnés dans le Tableau III.7. La courbe d'isotherme de sorption a été obtenue en utilisant les données de la teneur en eau à l'équilibre pour chaque niveau d'humidité relative, où la teneur en eau est exprimée en %_{masse} et peut être également exprimée en kg.m⁻³ en multipliant les résultats par la masse volumique sèche. La courbe fournit un bon ajustement au type II, selon la classification de l'IUPAC des isothermes de sorption [18]. Ce type d'isotherme de sorption se caractérise par une forme sigmoïde avec un point d'inflexion correspondant à la transition de fixation mono-moléculaire à poly-moléculaire [19]. En outre, on constate que le modèle GAB donne une estimation très proche de l'isotherme de sorption.

L'évolution de la courbe de l'isotherme de sorption de DPC montre que lorsque l'humidité relative augmente, la teneur en eau augmente en raison de la sorption de vapeur d'eau. La teneur en eau augmente de 12 kg.m⁻³ pour 27% d'humidité relative à 19 kg.m⁻³ pour 47% HR. Cette caractérisation hygroscopique est importante, car les matériaux hygroscopiques sont capables de modérer les variations de l'humidité relative de l'intérieur, d'assurer le confort des occupants et de réduire la consommation d'énergie [20-22].

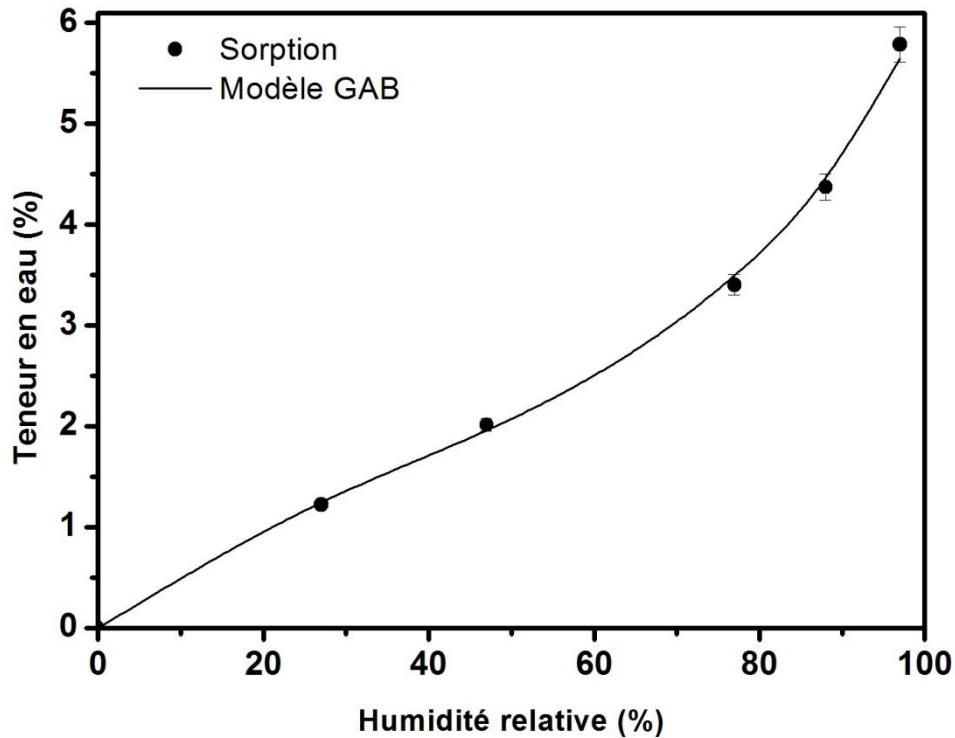


Figure III.7. Isotherme de sorption de DPC.

Tableau III.7 : Paramètres de modèle GAB.

	μ_m	C_G	k
DPC	0.017	5.626	0.740

Le Tableau III.8 présente les résultats de la teneur en eau dans le domaine hygroscopique de certains matériaux de construction. Les matériaux comparés sont complètement différents dans la nature de leur matrice, la composition du mélange, la méthode de fabrication ainsi que la nature des matériaux végétaux et leur concentration pour les biocomposites. Cependant, la comparaison des résultats de sorption hygroscopique est effectuée en tenant compte de l'influence de ces critères sur le comportement des matériaux (biocomposite et non biocomposite) destinés à la même fonction, c'est-à-dire, matériaux pour la construction. Les résultats montrent que ces matériaux sont hygroscopiques, mais avec des niveaux de sorption différents. Le béton cellulaire autoclavé (AAC) présente des faibles valeurs de la teneur en eau, tandis que le béton présente des valeurs élevées. En outre, dans ce domaine

d'hygrométrie, le niveau de sorption hygroscopique de DPC est très similaire à celui de LHM-wall.

Tableau III.8 : Résultats de sorption hygroscopique.

Matériau		50	80	90 – 93	Référence
		% HR	% HR	% HR	
AAC	kg.m ⁻³	4.2	9.8	22	[23]
DPC	kg.m ⁻³	19	32	42	Ce travail
LHM-wall	kg.m ⁻³	20	33	42	[7]
Béton	kg.m ⁻³	48	85	100	[23]

AAC avec 500 kg.m⁻³ de masse volumique.

Béton avec 2300 kg.m⁻³ de masse volumique et e/c = 0.5.

IX. Diffusivité hydrique

La diffusivité hydrique de DPC a été déterminée en utilisant la valeur expérimentale de la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité hydrique spécifique qui est dérivée de la courbe de modèle GAB. Ce paramètre est important et décrit le transport de l'humidité dans un matériau de construction sous un gradient de pression de la vapeur.

Quatre mécanismes de transport de l'humidité dans les pores peuvent être distinguées, elles sont présentées dans la Figure III.8 : (i) diffusion de la vapeur pure (en réalité, elle n'a lieu que dans l'espace poreux rempli d'air), (ii) transport en série de vapeur et de liquide, (iii) transport vapeur-liquide d'une part en série, et d'autre part en parallèle (aussi appelé diffusion surfacique) et finalement (iv) transport de la phase liquide dans un milieu saturé [17].

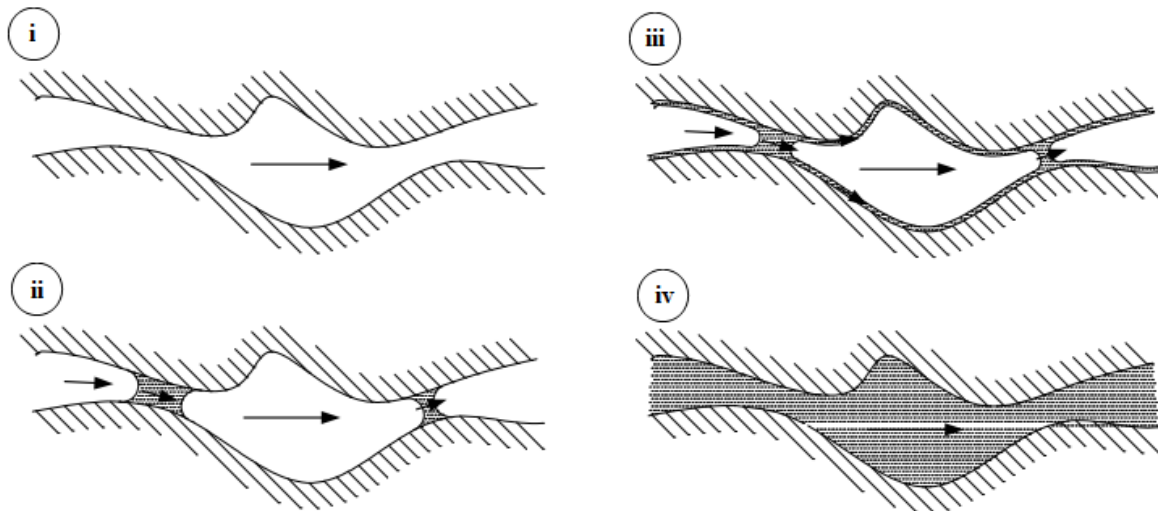


Figure III.8. Différents processus de transport de l'humidité [17].

Le transport en phase vapeur se produit par diffusion et effusion. L'effusion est un transport par collision de molécules d'eau avec les parois des pores [3], et il se produit généralement dans des capillaires très étroits [17], tandis que le transfert de vapeur par diffusion décrit le transport par collision de molécules d'eau les unes avec les autres [3]. La Figure III.9 illustre les mécanismes de transport de vapeur d'eau par diffusion et effusion.

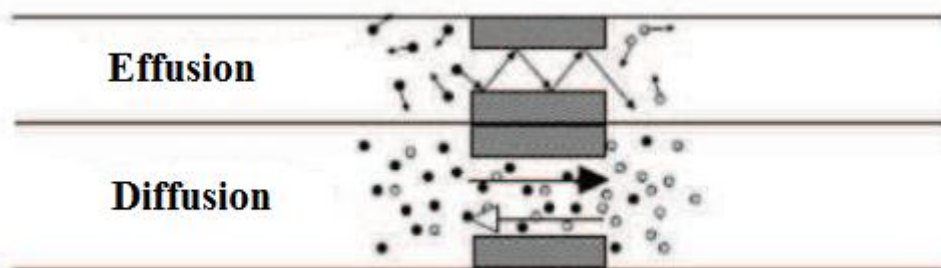


Figure III.9. Représentation schématique des mécanismes de transport de vapeur d'eau [19].

Pour un certain niveau d'humidité relative, les capillaires étroits sont remplis de liquide, tandis que les plus grandes cavités sont remplies d'air et de vapeur d'eau, comme indiqué dans la Figure III.10.

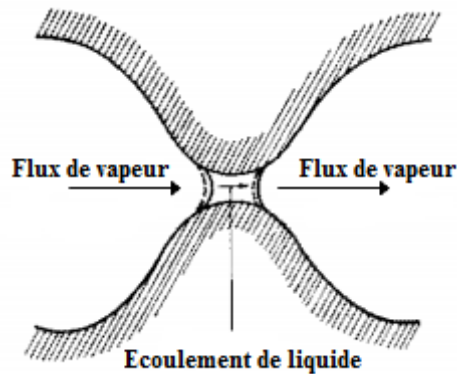


Figure III.10. Représentation schématique de transfert de vapeur-liquide par série d'évaporation-condensation à travers un îlot liquide [24].

La condensation se produit au début du capillaire et l'évaporation à la fin, ceci conduit à changer la courbure des ménisques comme illustré dans les lignes pointillées sur la Figure III.10. Dans les plus petits capillaires, l'écoulement de liquide se produit, tandis que le flux de vapeur se produit dans les grandes cavités.

L'évolution de la diffusivité hydrique de béton de palmier dattier dans le domaine hygroscopique est illustrée dans la Figure III.11. Les valeurs de la diffusivité hydrique calculées à chaque teneur en eau sont présentées dans le Tableau III.9. Deux (2) phases peuvent être distinguées : (i) une augmentation de la diffusivité hydrique avec la teneur en eau jusqu'à ce qu'elle atteigne un maximum (pic à $3.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ pour une teneur en eau d'environ $13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ensuite (ii) une diminution de la diffusivité hydrique jusqu'à une très faible valeur. Un comportement similaire peut être observé pour les matériaux HLC et FLC (Figure III.12). Ces matériaux composites à base de chaux sont composés de particules végétales (chanvre ; lin), et fabriqués avec un rapport volumique granulats/liant égal à 5.3 et 6.8, respectivement. Lorsque la teneur en eau est faible ($w < 6.84 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour HLC et $w < 10.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour FLC), le transfert d'humidité en phase vapeur est prédominant, et par conséquent la diffusivité hydrique augmente jusqu'à sa valeur maximale ; ensuite, la diffusivité hydrique diminue, car le transport d'humidité en phase liquide est plus important par rapport à la phase vapeur [4]. En outre, la différence d'évolution de la diffusivité hydrique entre ces deux (2) matériaux à base de chaux est probablement liée à la différence de la pente de l'isotherme de sorption calculée selon le modèle GAB [4].

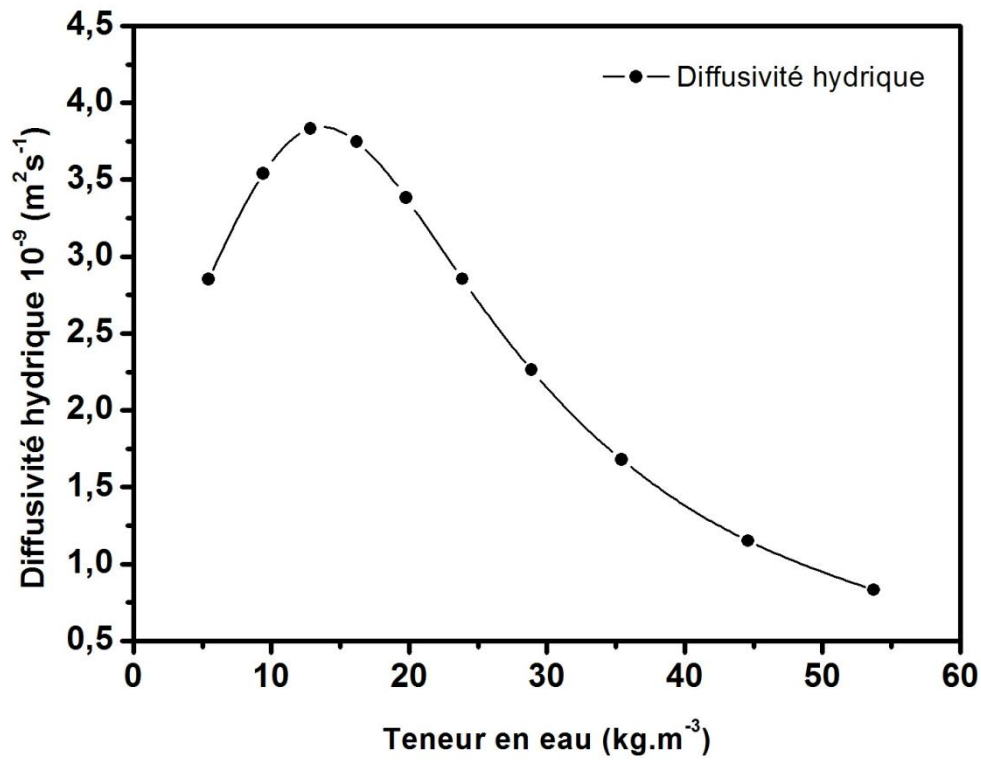


Figure III.11. Evolution de la diffusivité hydrique pour DPC.

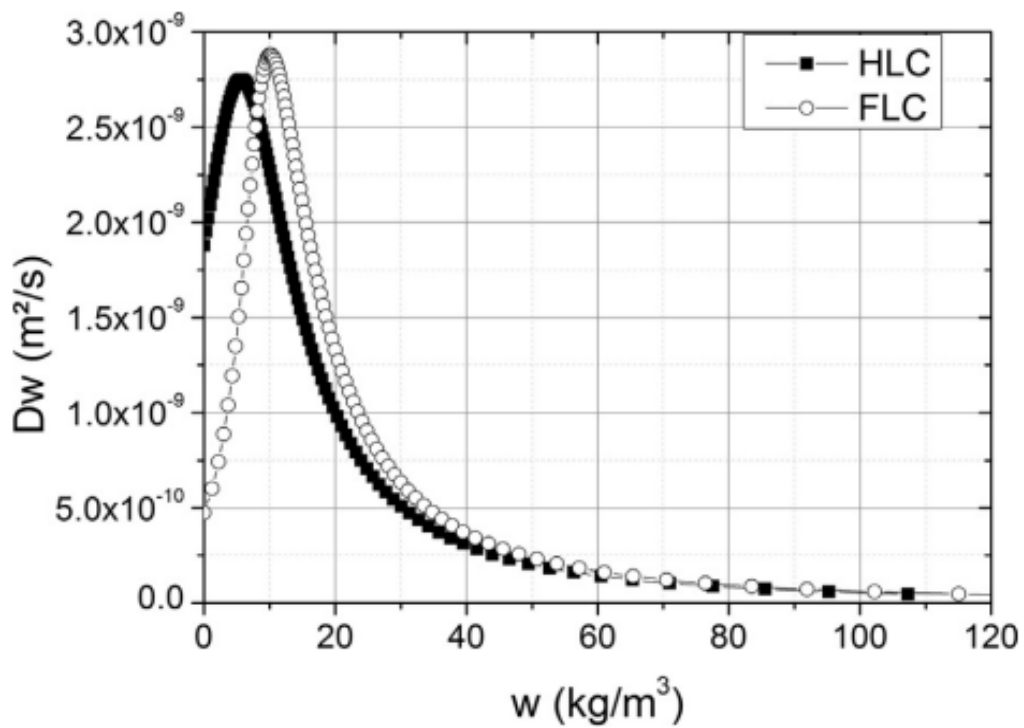


Figure III.12. Evolution de la diffusivité hydrique pour HLC et FLC [4].

L'allure de la courbe de diffusivité hydrique (Figure III.11) est en accord avec la théorie de De Vries [25]. Cette théorie affirme que la diffusivité hydrique évolue selon trois (3) phénomènes distincts [3] : (i) Pour une faible teneur en eau, le transfert d'humidité est essentiellement dû au transport de vapeur (diffusion et effusion), et la phase condensée existe sous la forme d'un film adsorbé ou dans de petites îles d'eau ; (ii) lorsque la teneur en eau augmente, les petites îles d'eau augmentent en nombre et en taille, ce qui entraîne une diminution de la section de passage du flux de vapeur et le transfert d'humidité se produit par des mécanismes de condensation et d'évaporation aux interfaces vapeur-liquide ; (iii) pour une teneur en eau plus élevée, le transfert en phase liquide devient nettement prédominant.

La diffusivité hydrique moyenne de DPC déterminée dans le domaine hygroscopique est indiquée dans le Tableau III.10. On peut constater que le coefficient de diffusion de DPC a le même ordre de grandeur avec HLC et FLC.

Tableau III.9 : Diffusivité hydrique en fonction de l'humidité.

Teneur en eau kg.m ⁻³	Diffusivité hydrique 10 ⁻⁹ m ² s ⁻¹
5.432	2.852
9.408	3.541
12.845	3.833
16.192	3.747
19.762	3.382
23.859	2.854
28.872	2.263
35.412	1.680
44.583	1.152
53.716	0.832

Tableau III.10 : Résultats de diffusivité hydrique.

	Diffusivité hydrique $10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$	Référence
DPC	2.6	Ce travail
HLC	1.5	[4]
FLC	1.4	[4]

X. Conductivité thermique

La conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) décrit le taux d'énergie thermique transférée d'une extrémité à l'autre, et en raison de la structure microscopique à l'échelle atomique, les matériaux qui présentent une forte organisation structurale se caractérisent généralement par une conductivité thermique élevée.

Pour étudier l'effet de l'humidité sur la conductivité thermique, un échantillon ($15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$) a été placé pendant un (1) mois dans une chambre climatique à 80% d'humidité relative. En revanche, l'état sec a été atteint après une semaine à 70°C . Les réponses thermiques des deux (2) états sont présentées dans la Figure III.13 et le Tableau III.11.

Nous avons clairement montré que l'augmentation de la température a un impact très significatif sur la conductivité thermique à l'état humide qu'à l'état sec en raison de la teneur en eau. Nous constatons une évolution linéaire en fonction de la température et une augmentation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité. Cette augmentation atteint 37% à 42°C lorsque le matériau est devenu humide. Ce phénomène a été également observé par de nombreux auteurs et il est lié à la présence d'eau qui modifie considérablement les caractéristiques thermiques du matériau [1, 26]. Vololonirina et al [26] ont révélé que pour trois (3) types de matériaux à base de bois, la conductivité thermique mesurée a augmenté linéairement avec la teneur en humidité et la température (Figure III.14). Cette étude a été effectuée pour une gamme limitée de température (10°C , 25°C et 40°C) et pour une teneur en humidité dans le domaine hygroscopique (de l'état sec à l'état humide où les échantillons étaient conditionnés à 90% HR). Les résultats de De Bruijn et al [14] ont montré qu'il existe

une différence de la conductivité thermique mesurée en fonctions des conditions d'humidité relative des échantillons (les échantillons ont été conditionnés à 15% et 65% HR). Cette différence était de 6% pour un mélange avec relativement plus de chanvre, et de 9% pour un mélange avec plus de liant à base de chaux. La faible conductivité thermique a été mesurée pour des échantillons conditionnés à 15% HR.

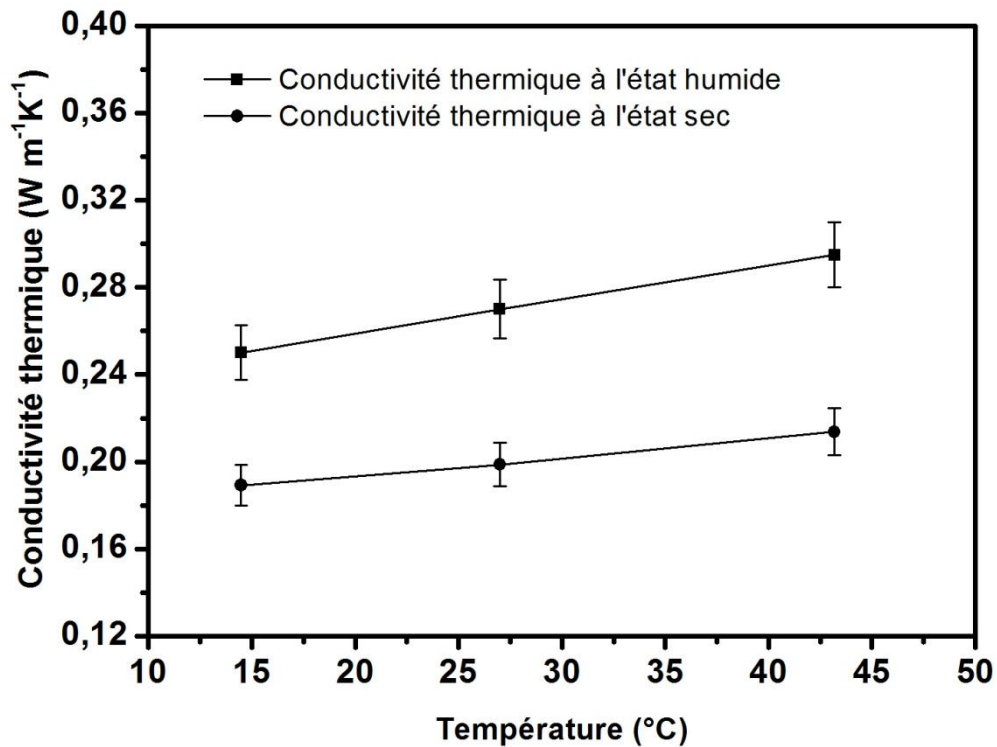


Figure III.13. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température à l'état sec et humide.

Tableau III.11 : Résultats de la conductivité thermique à l'état sec et humide et à différents niveaux de température.

Température °C	Conductivité thermique à l'état sec W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Conductivité thermique à l'état humide W.m ⁻¹ .K ⁻¹
14	0.189	0.250
27	0.199	0.270
42	0.214	0.295

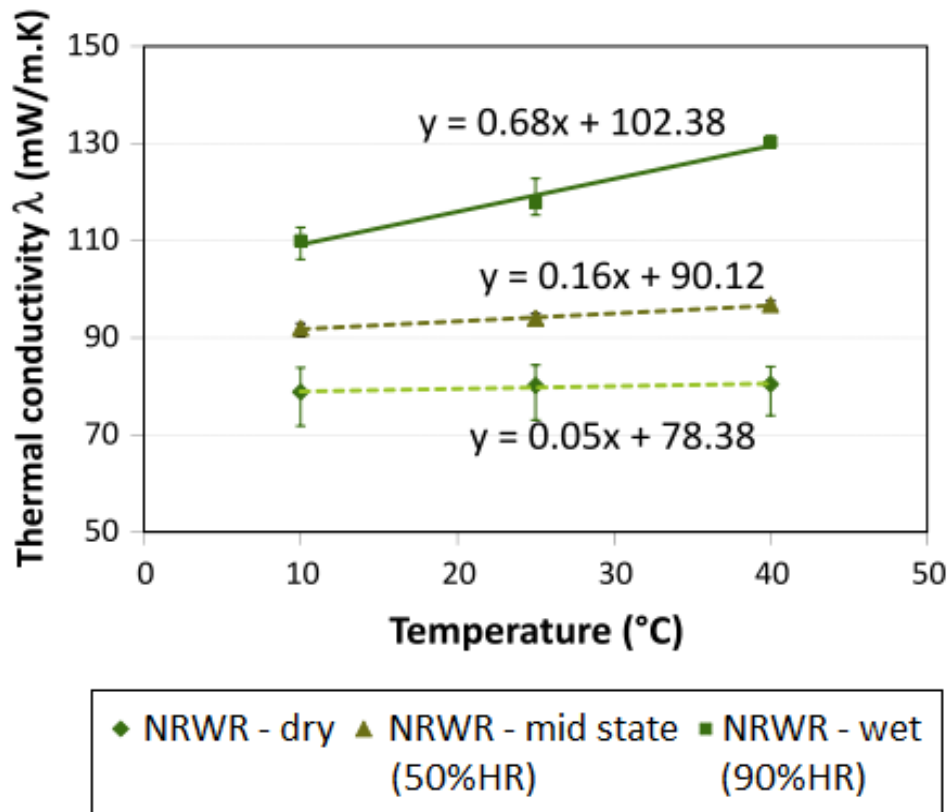


Figure III.14. Evolution de la conductivité thermique du bois solide en fonction de la température pour différentes conditions d'humidité [26].

Les résultats de la conductivité thermique obtenus par extrapolation linéaire à 10°C pour les matériaux biocomposites DPC et LHM-wall sont présentés dans le Tableau III.12. La comparaison est effectuée en tenant compte la différence entre ces matériaux biocomposites dédiés à la même fonction, c'est-à-dire des matériaux pour la construction.

Tableau III.12 : Conductivité thermique à 10°C.

	Conductivité thermique à l'état sec $W.m^{-1}K^{-1}$	Conductivité thermique à l'état humide $W.m^{-1}K^{-1}$	Référence
DPC	0.185	0.243	Ce travail
LHM-wall	0.107	0.122	[7]

Les résultats ont révélé que les deux (2) matériaux biocomposites ont une faible conductivité thermique à l'état sec ($< 0.3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$). En effet, selon la classification RILEM, le béton des granulats légers avec une conductivité thermique inférieure à $0.3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ peut satisfaire les exigences de l'isolation thermique [27]. En ce qui concerne l'influence de l'humidité (80%) sur la conductivité thermique, les résultats indiquent que le taux d'augmentation de la conductivité thermique a atteint 31% pour le DPC comparé à 14% pour LHM-wall. Cependant, la conductivité thermique reste dans la gamme qui peut satisfaire les exigences de l'isolation thermique.

XI. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale des propriétés hydriques et thermiques de béton de palmier dattier.

Dans une première partie, les propriétés hydriques montrent une grande sensibilité à l'eau, probablement en raison de la structure de la porosité ouverte. En outre, le béton de palmier dattier est un matériau perméable à la vapeur d'eau, en raison de sa microstructure. Le facteur de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau est très faible par rapport aux matériaux de construction traditionnels tels que le béton solide et le béton cellulaire autoclavé. La courbe d'isotherme de sorption est classée de type II qui est le plus familier. Dans le domaine d'hygrométrie étudiée, la sorption hygroscopique semble similaire à celle du biocomposite chaux-chanvre. Les matériaux hygroscopiques sont capables de modérer les variations de l'humidité relative à l'intérieur, d'assurer le confort des occupants et de réduire la consommation d'énergie. En outre, les modèles GAB offrent une bonne approximation de la courbe de l'isotherme de sorption.

Dans une deuxième partie, les résultats de la conductivité thermique montrent une importante capacité d'isolation thermique à l'état sec. De plus, sous des conditions sévères de température et d'humidité relative, le matériau semble être valable pour les applications d'isolation thermique.

Références

- [1] D. Taoukil, A. El Bouardi, F. Sick, A. Mimet, H. Ezbakhe, and T. Ajzoul, "Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite," *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 104-115, 2013.

- [2] H. Garbalinska and A. Wygocka, "Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance," *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 258-266, 2014.
- [3] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, and C. Lanos, "Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 294-303, 2013.
- [4] M.Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, and T. Langlet, "Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity," *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 91-99, 2015.
- [5] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, and A. Gherabli, "Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation," *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 267-273, 2013.
- [6] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building," *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 98-104, 2014.
- [7] A. Evrard, "Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials," Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2008.
- [8] B.R. Tournier, "Transferts par capillarité et évaporation dans des roches - Rôles des structures de porosité," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, France, 2001.
- [9] C. Zürcher and T. Frank, *Physique du Bâtiment - Construction et Energie: vdf Hochschulvlg*, Zürich, Suisse, 2014.
- [10] M. Arandigoyen and J.I. Alvarez, "Blended pastes of cement and lime : pore structure and capillary porosity," *Applied Surface Science*, vol. 252, pp. 8077-8085, 2006.
- [11] R. Walker and S. Pavia, "Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 64, pp. 270-276, 2014.
- [12] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, and A. Hammami, "Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: Fiber Characterization," *Polymer Composites*, vol. 26, pp. 486-497, 2005.

- [13] G.H.D. Tonoli, U.P. Rodrigues Filho, H. Savastano Jr, J. Bras, M.N. Belgacem, and F.A. Rocco Lahr, "Cellulose modified fibres in cement based composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, pp. 2046-2053, 2009.
- [14] P. De Bruijn and P. Johansson, "Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1235-1242, 2013.
- [15] W.K. Lewis, "The rate of drying of solid materials," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 13, pp. 427-432, 1921.
- [16] F. Collet and S. Pretot, "Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall," *Building and Environment*, vol. 82, pp. 459-466, 2014.
- [17] R. Peuhkuri, "Moisture Dynamics in Building Envelopes," Thèse de doctorat, Rapport R-071, Université Technique du Danemark, Danemark, 2003.
- [18] K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouquérol, and T. Siemieniewska, "Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 57, pp. 603-619, 1985.
- [19] J. Chamoin, "Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation," Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Rennes, France, 2013.
- [20] A.D. Tran Le, C. Maalouf, T. Mai, E. Wurtz, and F. Collet, "Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 1797-1806, 2010.
- [21] A. Shea, M. Lawrence, and P. Walker, "Hygrothermal performance of an experimental hemp lime building," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 270-275, 2012.
- [22] C. Rode, R. Peuhkuri, L.H. Lone, K.K. Hansen, B. Time, A. Gustavsen, T. Ojanen, J. Ahonen, K. Svennberg, L.E. Harderup, and J. Arfvidsson, "Moisture buffering of building materials," Département de Génie Civil, Université technique du Danemark, Danemark, 2005.

- [23] "WUFI® Pro Ver. 5.0," Software of hygrothermal design for Architects and Engineers, Database, Fraunhofer IBP.
- [24] J.V. Der Kooi, "Moisture transport in cellular concrete roofs," PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Waltman, Delft, 1971.
- [25] D.A. De Vries, "Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media," *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 39, pp. 909-916, 1958.
- [26] O. Vololonirina, M. Coutand, and B. Perrin, "Characterization of hygrothermal properties of wood-based products - Impact of moisture content and temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 223-233, 2014.
- [27] RILEM, "Functional classification of lightweight concretes," *Materials and Structures*, vol. 11, pp. 281-282, 1978.

**Chapitre IV : Etude
numérique de transfert
hygrothermique à l'échelle
mur**

IV. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la prédiction numérique du comportement hygrothermique de béton de palmier dattier à l'échelle mur. Cette étude repose principalement sur les résultats obtenus dans le chapitre précédent. Dans un premier temps, nous rappellerons le comportement hygrothermique à grande échelle, et en particulier à l'échelle composant ainsi que le dispositif expérimental habituellement utilisé pour cette étude. Le fonctionnement hygrothermique des matériaux biosourcés, et en particulier le béton de chanvre sera également mentionné. La deuxième partie traite les modèles numériques pour la prédiction du comportement hygrothermique des composants du bâtiment, et en particulier le modèle WUFI®. L'évaluation des risques majeurs liés à l'humidité sera également discutée. La dernière partie est dédiée à l'étude numérique du comportement hygrothermique de béton de palmier dattier à l'échelle mur sous des sollicitations estivales et hivernales. Les résultats seront comparés à un matériau de construction traditionnel.

V. Comportement hygrothermique à grande échelle

Le terme hygrothermique est composé de deux (2) mots : "hygro" qui signifie l'humidité et le mot "thermique". La recherche hygrothermique dans le contenu actuel est l'étude du transfert combiné d'air, de chaleur et d'humidité et leur impact sur l'enveloppe du bâtiment.

Les recherches hygrothermiques peuvent être classées en trois (3) aspects : (i) recherche fondamentale sur les propriétés intrinsèques des matériaux de construction, (ii) modélisation numérique du transfert simultané de chaleur et d'humidité à grande échelle (composant et bâtiment), (iii) travaux expérimentaux pour étudier et évaluer les processus numériques.

Dans la réalité, l'enveloppe du bâtiment est exposée aux conditions climatiques variables de température et d'hygrométrie ce qui conduit à l'apparition de plusieurs phénomènes : migrations de vapeur d'eau (dépend de la porosité du matériau), changements de phase, humidification et séchage [1]. Cependant, l'enveloppe du bâtiment doit être en mesure d'assurer, de façon durable les fonctions pour lesquelles il a été mis en œuvre (thermique, mécanique, etc.) [2].

V.1. Echelle composant ou système

Le comportement hygrothermique des matériaux de construction est largement étudié à grande échelle.

L'échelle composant concerne les enveloppes d'un bâtiment : les systèmes de murs, les toits, etc. A cette échelle, les chercheurs sont intéressés à étudier la variation de température et d'humidité à la surface ou au sein du composant lors de la variation hygrothermique de l'environnement extérieur. Les mesures in-situ et la prédiction numérique sont menées à cette échelle. Les mesures in-situ sont effectuées à l'aide d'une chambre climatique.

V.1.1. Système de mur

Le système de mur peut être construit à l'intérieur d'une chambre climatique, et des effets climatiques réalistes, y compris diverses conditions météorologiques, peuvent être exposés à un côté du mur, tandis que l'autre côté du mur est en contact direct avec l'ambiance du laboratoire où la température et l'humidité relative sont relativement constantes (Figure IV.1).

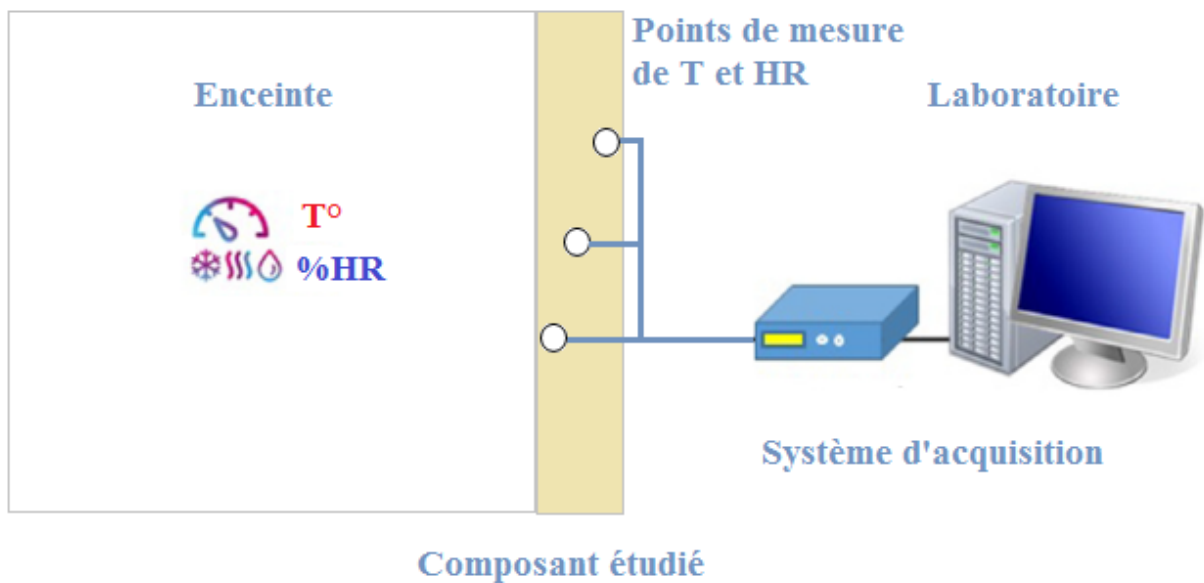


Figure IV.1. Représentation schématique du dispositif expérimental d'étude du comportement hygrothermique d'un composant (système de mur).

V.2. Fonctionnement hygrothermique des matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés ont un fonctionnement hygrothermique particulier qui représente une rupture technologique de la filière de génie civil. Ce fonctionnement particulier joue un rôle important dans le confort intérieur et la performance énergétique des bâtiments [2]. Les échanges hygrothermiques au sein d'une paroi intégrant des matériaux biosourcés présentent des phénomènes de transfert de vapeur et de changement de phase qui peuvent jouer un rôle non négligeable dans la performance thermique de la paroi.

En effet, l'accumulation de l'humidité en saison froide dans les murs est une réaction exothermique qui dégage des calories par le changement d'état de vapeur d'eau sous forme de gaz en liquide, et par conséquent la température du mur aura tendance à s'élever. Par contre, en été, l'humidité est restituée à l'intérieur du bâtiment sous l'effet du soleil et de la chaleur qui résulte une sensation de fraîcheur à l'intérieur et la température du mur tend à baisser (réaction endothermique). Les niveaux d'énergie dégagée ou absorbée lors de ces phénomènes sont très importants.

Les parois en matériaux biosourcés peuvent être considérées comme perspirantes en raison des caractéristiques hygroscopiques des matériaux biosourcés. Les parois perspirantes ont la capacité d'adsorber et restituer la vapeur d'eau ce qui peut permet de modérer les variations de l'humidité relative à l'intérieur, d'assurer le confort des occupants et de réduire la consommation d'énergie.

Le béton de chanvre est notamment un matériau très documenté concernant la recherche sur le comportement hygrothermique. Les résultats du comportement hygrothermique à l'échelle mur présentent un fort couplage entre le transfert de chaleur et d'humidité, où le béton de chanvre se comporte comme un matériau de changement de phase naturel, réduisant ainsi considérablement les variations de température dans le mur [3].

Collet et *al* [4] ont étudié expérimentalement le comportement hygrothermique d'un mur en béton de chanvre dans des conditions proposées qui sont simulées en utilisant une chambre bi-climatique. La Figure IV.2 présente la paroi d'essai ainsi que le dispositif expérimental.



Figure IV.2. Paroi pour le test (A), et une chambre bi-climatique (B) [4].

Le mur d'essai avec 0.3 m d'épaisseur a été construit avec des blocs de béton de chanvre et un cadre en bois (Figure IV.3).

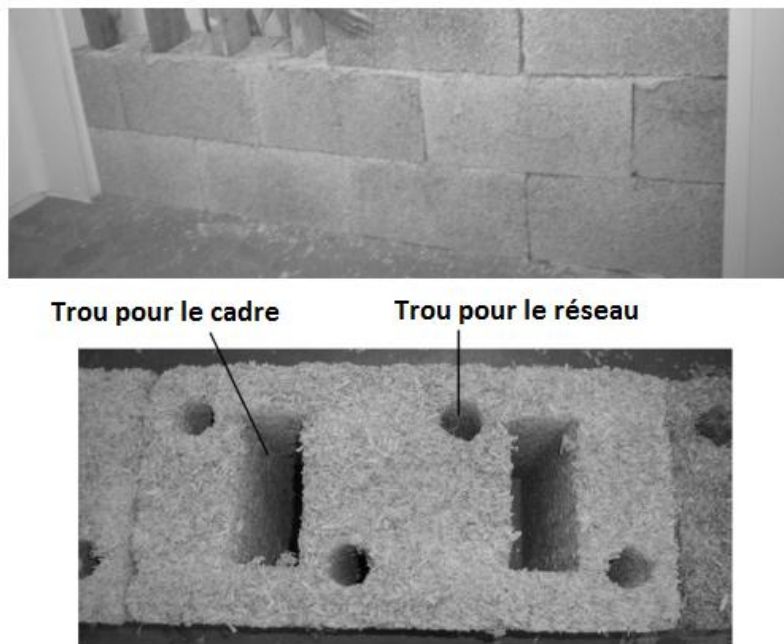


Figure IV.3. Construction d'un mur en béton de chanvre pour l'étude hygrothermique [4].

Les réponses hygrothermiques ont été étudiées sous trois (3) niveaux : (i) sous gradient de pression de vapeur d'eau seulement, (ii) sous gradient de température seulement, (iii) sous gradients de température et de pression de vapeur d'eau. Les résultats soulignent que le temps

de réponse de la paroi non revêtue est court aussi bien que pour la température comme pour l'humidité, tandis que la paroi revêtue présente une résistance supplémentaire à l'humidité. De plus, de nombreux phénomènes sont mis en évidence : (i) diffusion homogène de vapeur d'eau, (ii) variations énormes de pression de vapeur d'eau dans le mur. Cela souligne les phénomènes de sorption – désorption et/ou évaporation – condensation. Ces phénomènes peuvent influencer directement la balance thermique en corrélation avec la chaleur latente de changement de phase ou de la chaleur de sorption.

VI. Prédiction numérique du comportement hygrothermique

VI.1. Modèles numériques

De nombreux modèles numériques pour le stockage et le transfert de chaleur et d'humidité dans les composants du bâtiment ont été discutés et adaptés. Les dispositifs expérimentaux et le processus de mesure sont assez coûteux et longs à mettre en œuvre ; les outils numériques sont vraiment bienvenus pour prédire le comportement hygrothermique des composants du bâtiment. Des mesures et des expériences de laboratoire sont encore nécessaires pour vérifier et valider le modèle dans des conditions spécifiques.

Dans la littérature, il existe de nombreux outils numériques pour la prédiction de la performance hygrothermique des bâtiments. Parmi eux, on peut distinguer DELPHIN, MATCH, HAM etc. mais c'est WUFI[®] le logiciel le plus populaire dans le domaine hygrothermique (logiciel dynamique pour simuler le transfert de chaleur et de masse dans les composants du bâtiment). Le modèle WUFI[®] a été validé à plusieurs reprises par comparaison avec les résultats expérimentaux.

Hall et *al* [5] ont analysé le comportement hygrothermique des murs en pisé (matériau à base de terre) (0.3 m d'épaisseur) numériquement en utilisant WUFI[®]Pro Ver 4.1 et expérimentalement en utilisant une chambre de simulation bi-climatique. Les murs en pisé ont été fabriqués à partir de la terre humide mélangée avec du ciment et compactés dans un coffrage [6]. L'objectif de cette étude était d'étudier la réponse des murs en pisé aux changements des conditions environnantes adjacentes et de valider les prédictions numériques de la température et de l'humidité. La performance du mur en pisé a été enregistrée par des capteurs placés à plusieurs profondeurs dans le mur. Les résultats montrent que WUFI[®]Pro Ver 4.1 présente une bonne précision par rapport aux données expérimentales de la chambre

climatique. Les auteurs révèlent que les propriétés hygrothermiques déterminées expérimentalement à l'échelle matériau peuvent être introduites dans le logiciel WUFI®Pro et utilisées pour simuler avec précision le comportement transitoire des murs d'essai de taille réelle en réponse aux changements des conditions climatiques en fonction du temps. Avec l'étude numérique, la performance des composants du bâtiment peut être rapidement testée par simulation et les risques peuvent être mis en évidence.

VI.1.1. Modèle WUFI®

Comme mentionné au chapitre II, le terme hygrothermique décrit le transfert et stockage interdépendant (simultané) de chaleur et d'humidité (vapeur et liquide) entre un matériau et son environnement.

Le diagramme dans la Figure IV.4 illustre les échanges hygrothermiques entre une paroi et ses environnements intérieur et extérieur. On peut constater que les murs extérieurs interagissent de manière significative avec les conditions climatiques extérieures telles que le rayonnement solaire, la pluie battante, la température et l'humidité relative.

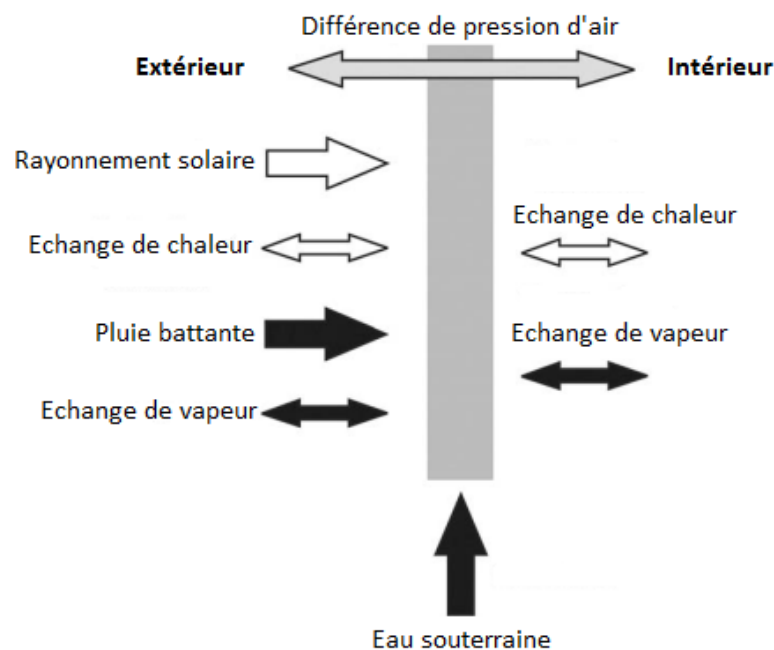


Figure IV.4. Comportement hygrothermique illustrant les flux échangés entre un mur et ses environnements [5].

Dans le modèle WUFI[®], la température et l'humidité relative ont été choisies comme des forces motrices, car elles permettent l'utilisation des coefficients de transport et de stockage simples et facilement compréhensibles.

Le modèle WUFI[®] repose sur deux (2) équations couplées (comme mentionné au chapitre II) : l'un pour le transfert d'humidité et l'autre pour le transfert de chaleur.

$$(\partial w / \partial \varphi)(\partial \varphi / \partial t) = \nabla \cdot (D_{\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi P_s)) \quad (1)$$

$$(\partial H / \partial T)(\partial T / \partial t) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi P_s)) \quad (2)$$

Plusieurs phénomènes de transport ont été négligés, par exemple le flux d'air dans le composant ainsi que l'absorption d'eau souterraine ne peuvent pas être calculées.

Dans l'équation (1), le terme du côté gauche représente le stockage de l'humidité qui est proportionnel à la dérivée de l'isotherme de sorption, tandis que le terme du côté droite représente la divergence de flux d'humidité (liquide et vapeur), (terme de transport) ; dans l'équation (2), le terme de la chaleur sensible est représenté par la divergence de la conduction thermique (la première partie du côté droite), tandis que le terme de la chaleur latente est représenté par la divergence de flux de vapeur multipliée par l'enthalpie de vaporisation ; dans le côté gauche de l'équation (2), la dérivée de l'enthalpie totale représente le terme de stockage d'énergie et contient la capacité thermique du matériau sec plus l'enthalpie de l'humidité dans le matériau [5].

Le modèle WUFI[®] est conforme au test de référence de la norme Européenne EN 15026 [7]. Cette norme fournit des critères minimaux pour les logiciels de simulation utilisés pour prédire le comportement hygrothermique unidimensionnel des composants de construction multicouches exposés aux conditions climatiques transitoires sur deux (2) côtés. La norme EN 15026 définit un test de référence pour la validation du logiciel de simulation hygrothermique. L'exemple considère une absorption de chaleur et d'humidité d'une dalle semi-infinie qui est initialement en équilibre avec les conditions 20°C et 50% d'humidité relative, et ensuite est soumis à 30°C et 95% d'humidité relative. Les profils de la température et de la teneur en eau résultant après 7 jours, 30 jours et 365 jours doivent être calculés. Les résultats ne doivent pas s'écarter de plus de 2.5% de la solution de référence fournie par la norme. Les résultats du

modèle WUFI® pour le test de référence sont pratiquement identiques à la solution de référence fournie par la norme EN 15026 (Figure IV.5 et Figure IV.6) [7].

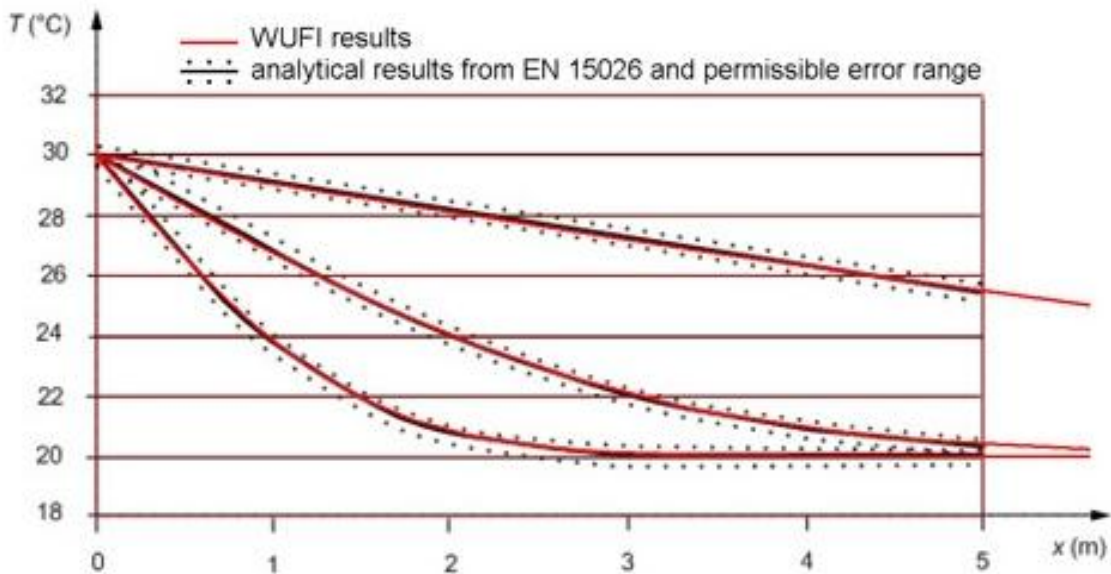


Figure IV.5. Distribution de température à 7 jours, 30 jours et 365 jours.

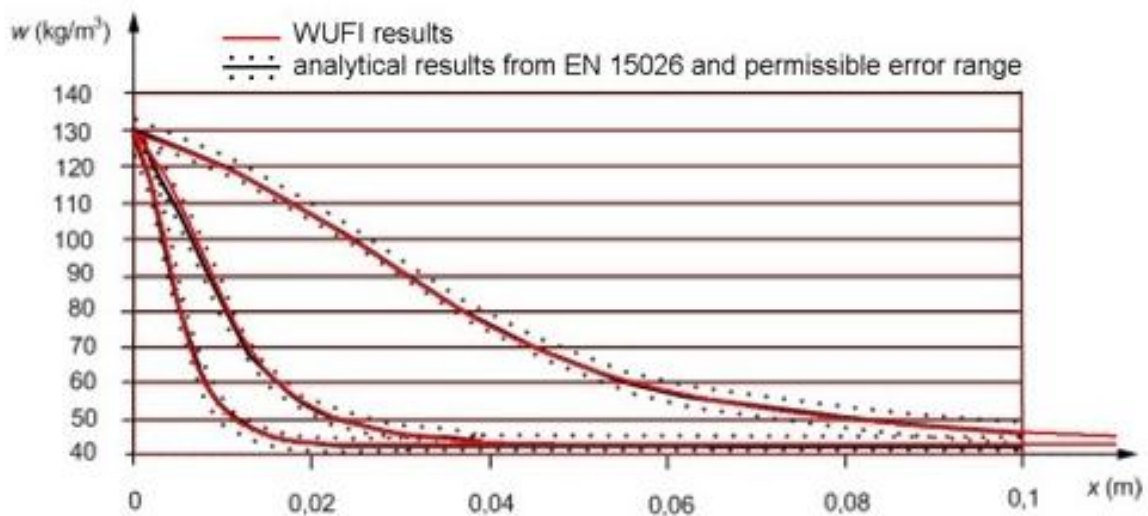


Figure IV.6. Distribution d'humidité à 7 jours, 30 jours et 365 jours.

Concernant le traitement numérique, les deux (2) équations de transfert de chaleur et d'humidité doivent être discrétisées pour réduire les équations différentielles à un système d'équations algébriques. Le modèle WUFI® utilise la méthode des volumes finis (MVF) [5]. Cette méthode ou encore méthode de volume de contrôle (V.C) divise le domaine en un

nombre fini des cellules ou (V.C) (Figure IV.7). Avec la formulation implicite (discrétisation dans le temps), les variables doivent être résolues simultanément au nouveau point du temps ($n+1$). Cette formulation conduit à une équation matricielle comme indiqué dans l'Equation 3.

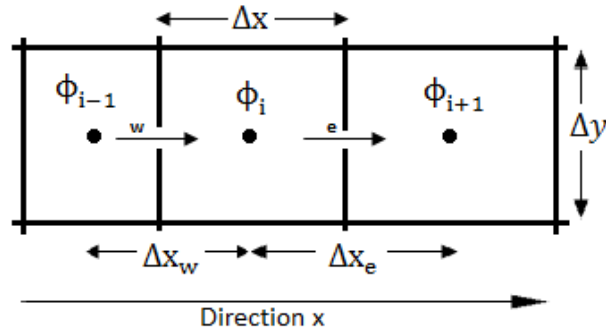


Figure IV.7. Représentation schématique de la technique du volume fini.

$$a_p \phi_i^{n+1} + a_e \phi_{i+1}^{n+1} + a_w \phi_{i-1}^{n+1} = b \quad (3)$$

Avec,

a_p : coefficient de la matrice de l'élément de volume en position i , a_e : coefficient de la matrice de l'élément adjacent à l'Est, a_w : coefficient de la matrice de l'élément adjacent à l'Ouest, n : incréments du temps, b : composante du vecteur de détermination, ϕ : quantité scalaire (température ou humidité relative).

Les composantes du vecteur de détermination contiennent les conditions aux limites et initiales ainsi que les termes sources [8].

Finalement, les équations matricielles pour le transfert de chaleur et d'humidité sont résolues au moyen d'algorithme de Thomas (algorithme de matrice tri-diagonale "TDMA").

La prédiction du comportement hygrothermique en utilisant le modèle WUFI[®] nécessite plusieurs données concernant la composition du composant du bâtiment, l'orientation du composant, les conditions climatiques, etc. (Figure IV.8). Les résultats peuvent être présentés sous forme d'un film contenant les profils de tous les pas de temps, ou sous forme de profils qui décrivent la distribution d'une quantité à travers le composant du bâtiment à un moment précis, et sous forme de courbes qui décrivent l'évolution temporelle des variables.

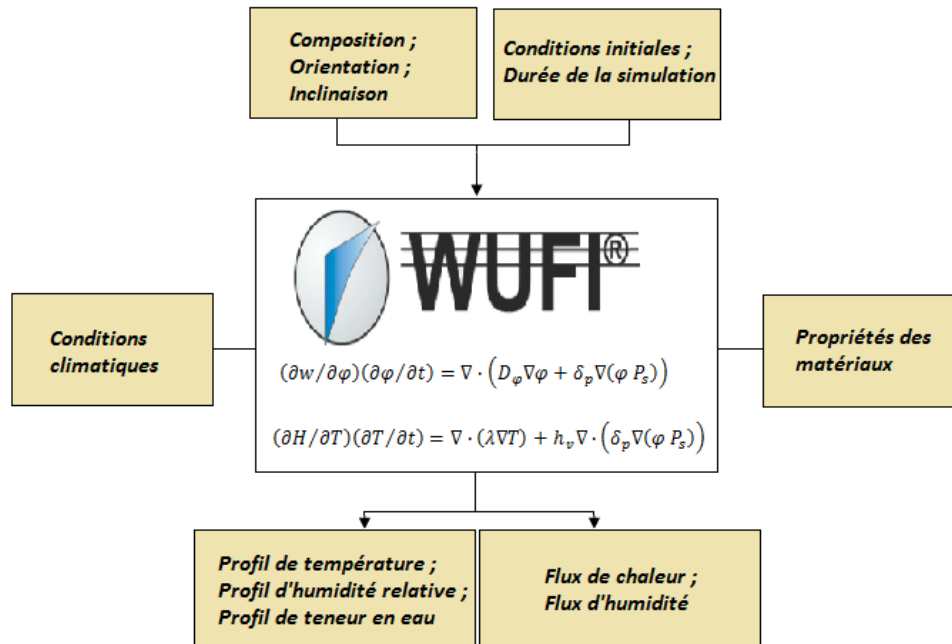


Figure IV.8. Diagramme représentant la technique de calcul du modèle WUFI®.

VI.2. Prédiction des risques majeurs liés à l'humidité

Des niveaux élevés d'humidité relative dans les parois peuvent endommager la construction et la santé des habitants, en particulier dans le cas de la condensation qui conduit au développement de moisissures et augmente les risques allergiques. Généralement, le risque de condensation augmente en saison hivernale car la température est relativement faible. Goto et al [9] ont souligné que les problèmes d'accumulation de l'humidité à l'intérieur de la paroi peuvent être évités lorsque l'humidité relative n'excède jamais 80% dans l'élément de la paroi. Ce seuil pour l'humidité relative (80%) soit plutôt faible par rapport à la condition que la croissance des moisissures est attendue, mais il permet une marge de sécurité.

VI.2.1. Condensations superficielles et moisissures

La condensation peut être produite sur les surfaces intérieures dès que leur température chute en dessous de la température du point de rosée de l'air du local.

La "température limite" à laquelle l'air devient saturé (la pression de vapeur dans l'air atteint la pression de saturation) dénommée température du point de rosée. La condensation peut apparaître par exemple lorsque la température diminue de 20°C à 10°C avec un niveau d'humidité relative égale à 50% (Figure IV.9).

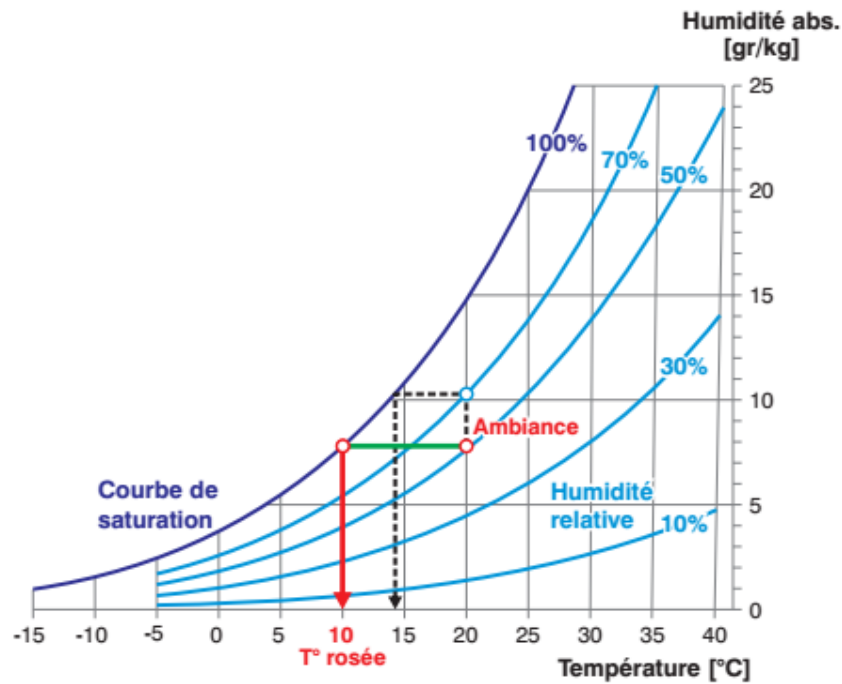


Figure IV.9. Evolution de l'état de l'air sur le diagramme de Mollier [10].

Par analogie au transfert de chaleur convectif, la quantité d'eau condensée sur la surface peut être déterminée comme suit [11] :

$$g_c = \beta (P_{v,i} - P_{sat,si}) \quad (4)$$

Avec,

g_c : quantité d'eau condensée sur la surface en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, β : coefficient de transfert de vapeur d'eau en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$, $P_{v,i}$: pression partielle de vapeur d'eau à (T_i et φ_i) en Pa, $P_{sat,si}$: pression de saturation à T_{si} (température de la surface) en Pa.

En raison de la similarité avec le transfert de chaleur convectif et le transfert de vapeur d'eau, le coefficient β peut être calculé à partir du coefficient de transfert thermique convectif [11].

La condensation superficielle se produit à la surface du matériau de construction, ce qui est facilement perceptible. L'accumulation de l'humidité combinée à d'autres conditions risque d'entraîner la formation de moisissures [10] ; parmi ces conditions, on peut distinguer : (i) quantité d'oxygène suffisante, (ii) conditions de température adéquates (entre 5 et 25°C pour un développement rapide).

Le système (LIM "Lowest Isoleth for Mold growth") du logiciel dynamique WUFI® est largement utilisé pour prédire le risque de croissance des moisissures.

VI.2.2. Condensations interstitielles

La condensation interstitielle se produit dans la structure interne de la paroi. Lorsque la température du point de rosée en un point de la paroi est atteinte, l'air va se condenser et charger le mur en humidité [10]. Cependant, le contrôle de la condensation interstitielle est plus compliqué [12].

VII. Etude numérique de transfert hygrothermique à travers le béton de palmier dattier

La prédiction du comportement hygrothermique de DPC à l'échelle mur est effectuée en utilisant le modèle de simulation de la performance d'humidité WUFI®Pro Ver 5.0. Ce modèle peut être utilisé pour évaluer les distributions de chaleur et d'humidité pour une large gamme des matériaux de construction et de conditions climatiques [12].

Dans la littérature, l'épaisseur de la paroi non revêtu généralement utilisée pour l'étude hygrothermique est d'environ 0.3 m (Figure IV.10). En revanche, le point de vue économique souligne que la construction avec des composants plus épais peut affecter d'une part la consommation d'énergie du bâtiment, mais d'autre part conduire à un bâtiment coûteux [9]. Ainsi, le bâtiment optimal est celui qui utilise des matériaux de construction à haute performance et des composants avec des épaisseurs optimales.

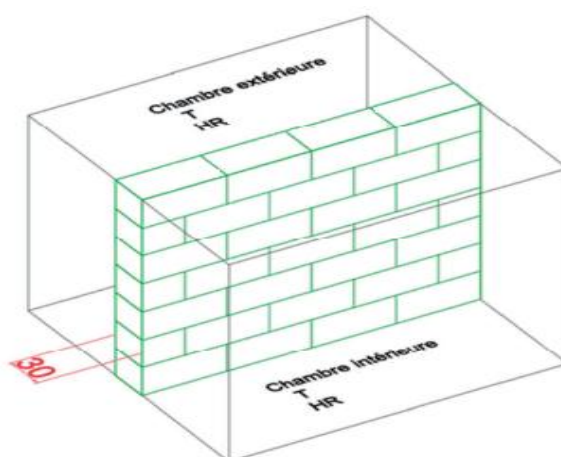


Figure IV.10. Représentation schématique d'une installation hygrothermique à l'échelle mur [13].

L'étude numérique de transfert hygrothermique à travers le béton de palmier dattier est effectuée sur une paroi avec 0.15 m d'épaisseur sous les conditions climatiques (température et humidité relative) de la région de Batna (Nord-est d'Algérie) durant les périodes hivernale et estivale de l'année 2017. Ces conditions climatiques sont collectées à partir de "Weather Underground" qui est une compagnie privée d'informations météorologiques sur internet.

La température et l'humidité relative sont des paramètres déterminant de la qualité de l'air intérieur et le confort humain [3]. Par conséquent, les conditions intérieures sont fixées à 23°C et 50% d'humidité relative.

La densité de flux de chaleur ($W.m^{-2}$) à travers une surface d'un composant du bâtiment peut être influencé par plusieurs mécanismes de transfert (conditions aux limites) : (i) transfert convectif et (ii) transfert par rayonnement entre la surface et les conditions ambiantes. En fait, la surface d'une paroi échange toujours des rayonnements thermiques à grande longueur d'onde avec d'autres surfaces dans son environnement, cependant, l'émission de rayonnement thermique de grande longueur d'onde n'est pas prise en considération dans cette étude. Concernant le transfert convectif, le flux de chaleur peut être réduit en raison de l'air adjacent de la surface du composant qui draine la chaleur par conduction (conduction thermique dans l'air adjacent à la surface) et par convection (transfert convectif par flux d'air). Généralement ces deux (2) mécanismes de transfert sont regroupés dans le terme de transfert de chaleur par convection. Dans cette étude, la résistance thermique de la surface extérieure est fixée à $1/17 m^2K.W^{-1}$, tandis que la résistance thermique de la surface intérieure est fixée à $1/8 m^2K.W^{-1}$.

En revanche, le transfert de vapeur d'eau peut être décrit par analogie avec le transfert de chaleur [8].

$$g_v = \beta (P_{v,i} - P_{v,si}) \quad (5)$$

Avec,

β : coefficient de transfert de vapeur d'eau en $kg.m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1}$, $P_{v,i}$: pression partielle de vapeur d'eau ambiante en Pa, $P_{v,si}$: pression partielle de vapeur d'eau à la surface en Pa.

En raison de la similarité entre le transfert de chaleur convectif et le transfert de vapeur d'eau, le coefficient β peut être dérivé à partir du coefficient de transfert thermique convectif.

VII.1. Propriétés intrinsèques des matériaux étudiés

La performance des systèmes de construction dépend de la composition du système et des caractéristiques thermiques et hydriques des éléments constitutifs [12].

Le béton de palmier dattier est un matériau de construction léger. Sa masse volumique atteint 954 kg.m^{-3} , la moitié de celle de mortier à base de ciment (1890 kg.m^{-3}). Ce biocomposite est un bon isolant thermique, mais pas exceptionnel. Sa conductivité thermique est estimée à $0.185 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 10°C . Comme les matériaux biocomposites, le béton de palmier dattier est un matériau hygroscopique avec la capacité d'adsorption de la vapeur d'eau au sein de leur système poreux. Les matériaux hygroscopiques sont capables de modérer les variations de l'humidité relative à l'intérieur, d'assurer le confort des occupants et de réduire la consommation d'énergie. La courbe de l'isotherme de sorption est classée de type II qui est le plus familier. La porosité ouverte des matériaux biocomposites leur confère une perméabilité à la vapeur d'eau élevée. Le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau de béton de palmier dattier est estimé à 4.4, plus faible que celui des matériaux de construction conventionnels.

En revanche, le béton est un matériau lourd avec une masse volumique sèche de 2300 kg.m^{-3} . Il est caractérisé par une faible capacité d'isolation thermique avec une conductivité thermique de $1.6 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 10°C . Sa perméabilité à la vapeur d'eau est très faible avec une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau égale à 180.

Le béton est choisi pour la comparaison en tant que matériau traditionnel en confrontation des matériaux biocomposites.

La prédiction numérique de comportement hygrothermique des matériaux de construction mentionnés ci-dessus en utilisant le modèle WUFI[®] repose sur une base de données concernant les propriétés de ces matériaux, comme le montre dans le Tableau IV.1. Dans certains cas où les données des matériaux de construction ne sont pas entièrement disponibles, le modèle WUFI[®] peut générer les données requises en utilisant des relations approximatives. Par exemple, le modèle WUFI[®] peut générer une courbe analytique de l'isotherme de sorption en fonction des teneurs en eau de 0%, 80% et 100% HR. La teneur en eau à 100% HR décrit l'état de saturation capillaire "libre". De plus, le coefficient de transport de la phase liquide peut être générer en utilisant la saturation d'eau capillaire et le coefficient d'absorption d'eau.

Tableau IV.1 : Caractéristiques intrinsèques des matériaux de construction.

Paramètre	Unité
Masse volumique	kg.m ⁻³
Porosité	m ³ m ⁻³
Chaleur spécifique, état sec	J.kg ⁻¹ K ⁻¹
Conductivité thermique, 10°C	W.m ⁻¹ K ⁻¹
Supplément hydrique de la conductivité thermique	%/(M.-%)
Teneur en eau "référence", 80% HR	kg.m ⁻³
Saturation eau capillaire "libre"	kg.m ⁻³
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-
Coefficient d'absorption d'eau	kg.m ⁻² s ^{-1/2}

VII.2. Sollicitations estivales

L'étude numérique est effectuée pendant cinq (5) jours de 1^{er} Août jusqu'à 6 Août. La méthode de calcul est choisie pour assurer d'abord un transfert de chaleur seulement, puis un transfert simultané de chaleur et d'humidité.

VII.2.1. Transfert de chaleur seulement

Le terme "surchauffe" désigne l'inconfort pour les occupants en raison de l'accumulation de la chaleur dans un bâtiment. En été, la température augmente fortement et peut atteindre 41°C dans la région de Batna. La surchauffe peut entraîner des problèmes de santé, en particulier chez les personnes âgées ou les jeunes enfants. Une bonne sensation thermique nécessite une bonne inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment, c'est-à-dire retarder et amortir les effets de la variation climatique extérieure.

Le déphasage et le taux d'amortissement peuvent être déterminés et l'inertie thermique peut être également évaluée. Le taux d'amortissement peut être calculé par la relation suivante :

$$\zeta = \Delta T_{in} / \Delta T_{out} \quad (6)$$

Avec,

ΔT_{in} : gradient de température superficielle interne en °C, ΔT_{out} : gradient de température superficielle externe en °C.

Le déphasage thermique est défini par le temps pendant lequel les températures de la surface intérieure et extérieure atteignent leurs maximums :

$$\eta = t(T_{in,max}) - t(T_{out,max}) \quad (7)$$

La Figure IV.11 présente l'évolution des températures de la surface intérieure et de la surface extérieure ainsi que au milieu de la paroi, en réponse au changement de la température de l'air extérieur. On peut constater que la température augmente depuis le matin et elle chute tard dans la soirée. La paroi en béton de palmier dattier peut retarder le pic de la température à l'intérieure d'environ 6 heures après le pic de la température à l'extérieur. En outre, le taux d'amortissement est estimé à 6%. En revanche, La paroi en béton traditionnel (E/C = 0.5) présente un déphasage thermique de 3 heures, ½ du déphasage thermique de la paroi en DPC.

La Figure IV.12 présente la variation de la température au milieu des murs. L'amplitude de la température au milieu de la paroi en DPC est très faible par rapport à celle en béton traditionnel. Le DPC a une faible diffusivité thermique (par rapport au béton traditionnel), ce qui peut conduire à amortir la diffusion de chaleur de l'ambiance extérieure.

Enfin, le DPC montre une inertie thermique non négligeable pendant la période estivale. L'inertie thermique rend les retards de pic de température intérieure jusqu'à la nuit pendant le jour d'été ainsi que l'amortissement de la température extérieure, ce qui limite le surchauffe en été et contribue à assurer le confort thermique.

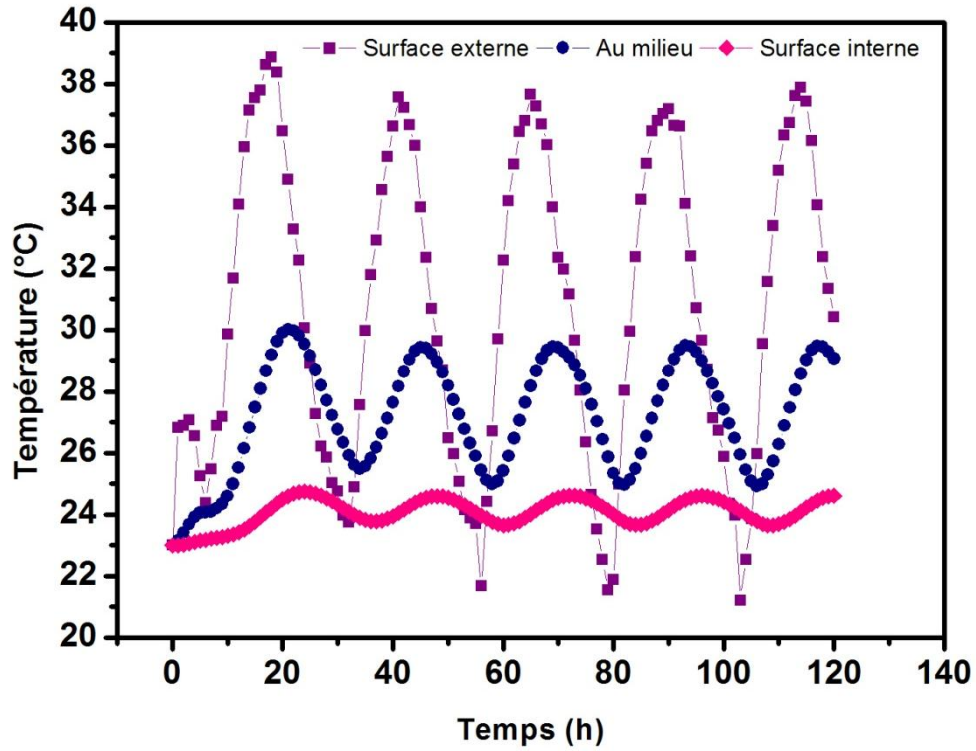


Figure IV.11. Evolution de la température à travers une paroi en béton de palmier dattier.

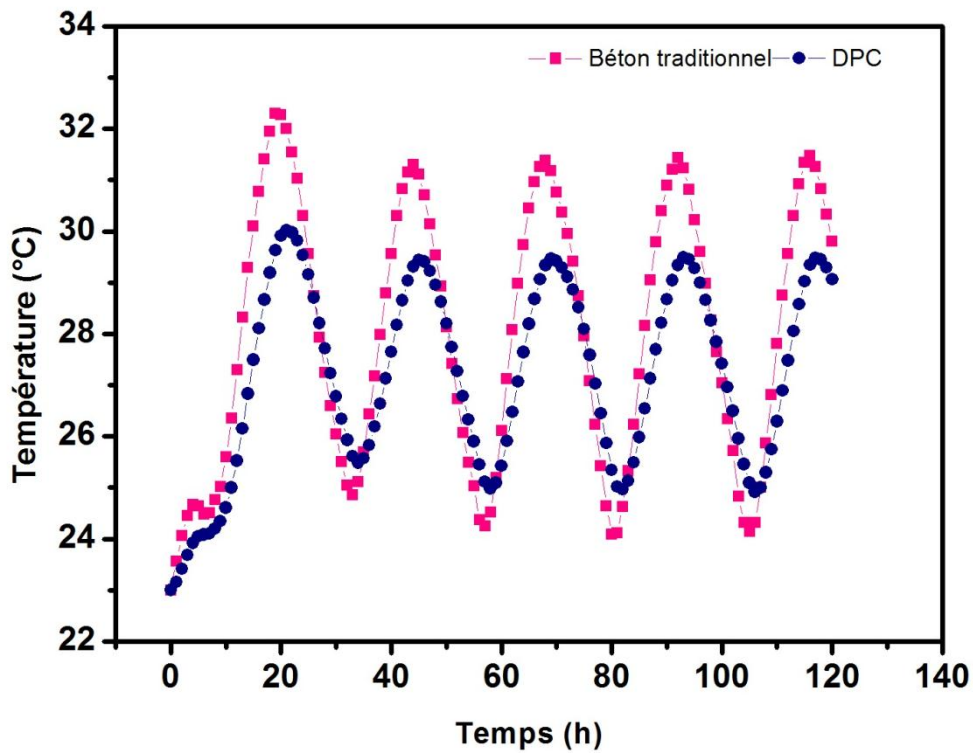


Figure IV.12. Variation de la température au milieu du mur.

VII.2.2. Transfert simultané de chaleur et d'humidité

Cette section se concentre sur l'étude de l'influence du transfert de l'humidité sur le transfert de chaleur. Les résultats montrent qu'il y a une légère diminution des pics de température lorsque la simulation est effectuée simultanément avec le transfert d'humidité (Figure IV.13). Physiquement, on peut expliquer ce phénomène par le couplage entre le transfert de chaleur et d'humidité, et la légère diminution de la température peut être attribuée à l'évaporation de l'humidité (phénomène endothermique) sous l'effet de l'augmentation de la température à l'extérieure.

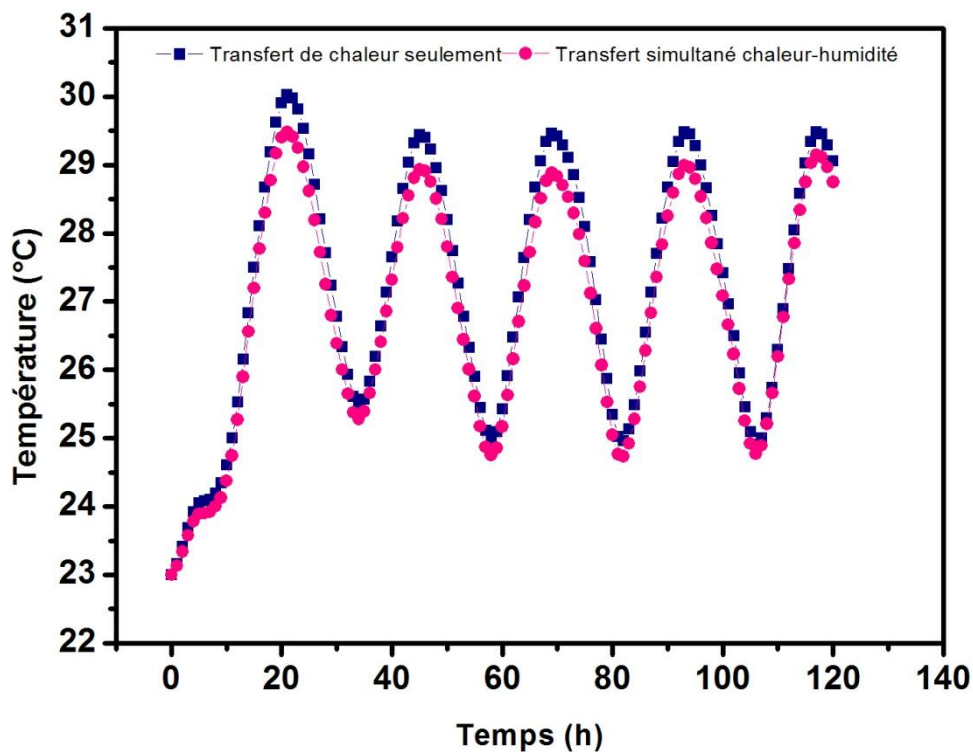


Figure IV.13. Evolution de la température au milieu d'une paroi en béton de palmier dattier.

VII.3. Sollicitations hivernales

Dans cette section, la simulation est effectuée pendant cinq (5) jours, du premier Janvier au 6 Janvier. L'étude est consacrée à l'évaluation des risques de l'humidité pendant cette période qui se caractérise par un niveau élevé d'hygrométrie ainsi qu'une chute de température.

VII.3.1. Condensations superficielles et moisissures

L'hiver est la période qui nécessite des précautions spéciales pour prévenir les dommages causés par le niveau élevé en humidité relative et le gel. Dans la région de Batna, l'humidité relative peut atteindre une valeur de 93% ou plus, tandis que la température chute jusqu'à moins de 0°C (elle peut atteindre jusqu'à - 4°C).

La condensation superficielle sur la surface intérieure de la paroi en béton de palmier dattier sous les conditions mentionnées ci-dessus ne peut pas avoir lieu comme montre dans la Figure IV.14. De plus, le système "LIM" de modèle WUFI® montre qu'il n'y a aucune possibilité de la croissance de moisissures sur la surface intérieure de la paroi en DPC (matériau qui peut être considéré partiellement biodégradable) durant la période du test (Figure IV.15).

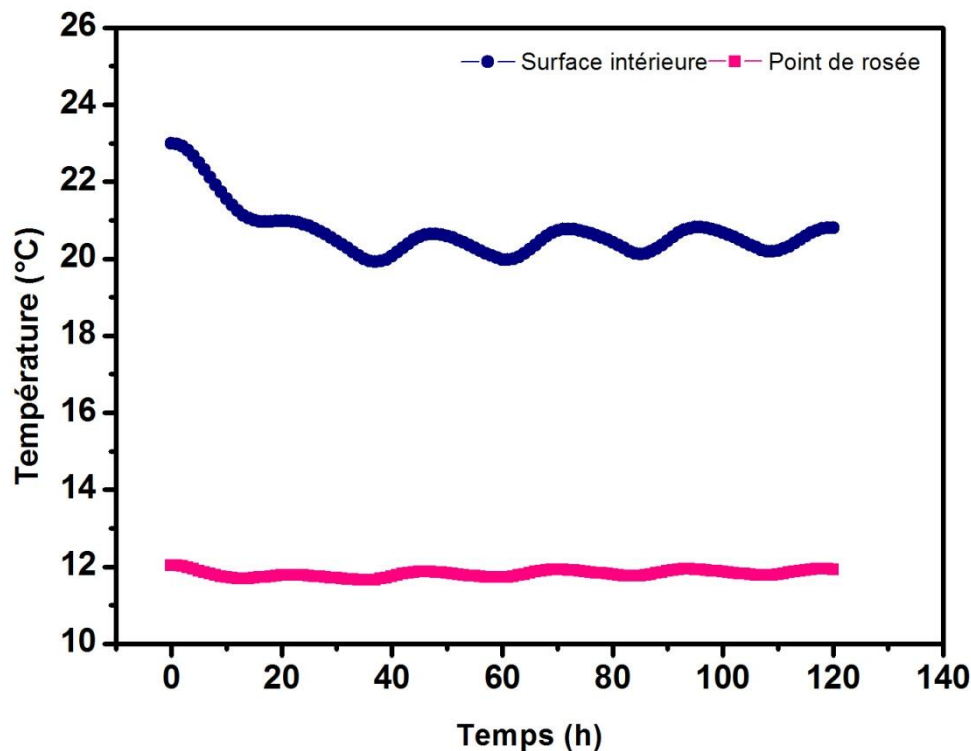


Figure IV.14. *Evaluation le risque de condensation superficielle sur la surface intérieure d'une paroi en béton palmier dattier.*

La limite "LIM BI" représente le cas des matériaux biodégradables tels que le papier peint, tandis que la limite "LIM BII" représente le cas des matériaux non biodégradables tels que les plâtres, les matériaux de construction minéraux, certains bois et matériaux isolants [10, 12]. Chaque point "d'isopleths" représente les conditions hygrothermiques à un certain moment.

Un matériau est dit biodégradable s'il est totalement décomposé par des micro-organismes tels que des bactéries ; le résultat de cette décomposition est la formation d'eau, de dioxyde de carbone et/ou de méthane et éventuellement de sous-produits non toxiques pour l'environnement [14].

En revanche, la condensation superficielle sur la surface intérieure de la paroi en béton traditionnel peut avoir lieu, car les conditions de température sont très proches de celles des points de rosées (Figure IV.16). Les conditions hygrothermiques sur la surface intérieure d'une paroi en béton traditionnel (Figure IV.17) révèlent que l'humidité relative sur la surface intérieure de la paroi est très proche de 100%.

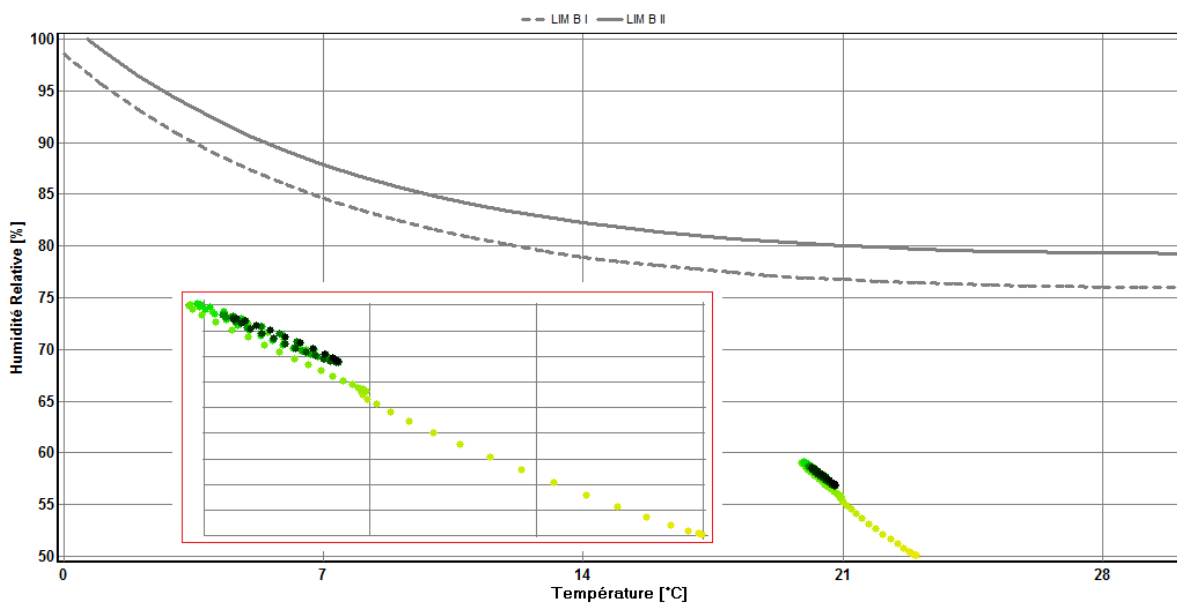


Figure IV.15. "Isopleths" sur la surface intérieure d'une paroi en béton de palmier dattier.

Le problème de la croissance de moisissures sur la surface intérieure de la paroi en béton traditionnel peut avoir lieu. Le système "LIM" présente un grand nombre des "isopleths" qui se situent au-dessus de la limite LIM BII (Figure IV.18), mais l'évaluation définitive nécessite des études détaillées pour de longues périodes du temps.

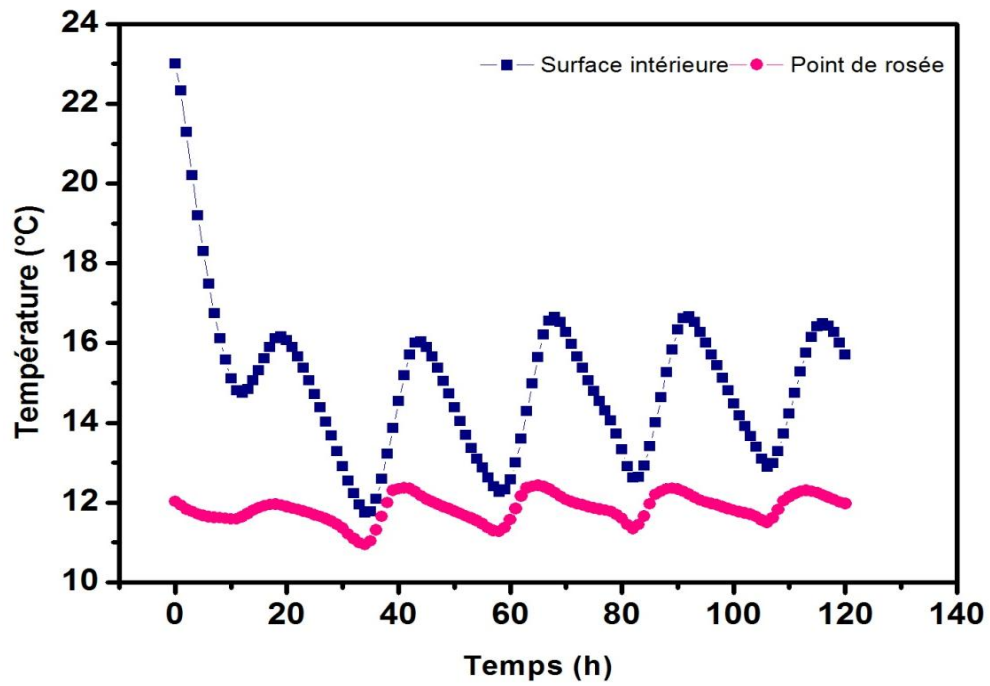


Figure IV.16. Evaluation le risque de condensation superficielle sur la surface intérieure d'une paroi en béton traditionnel.

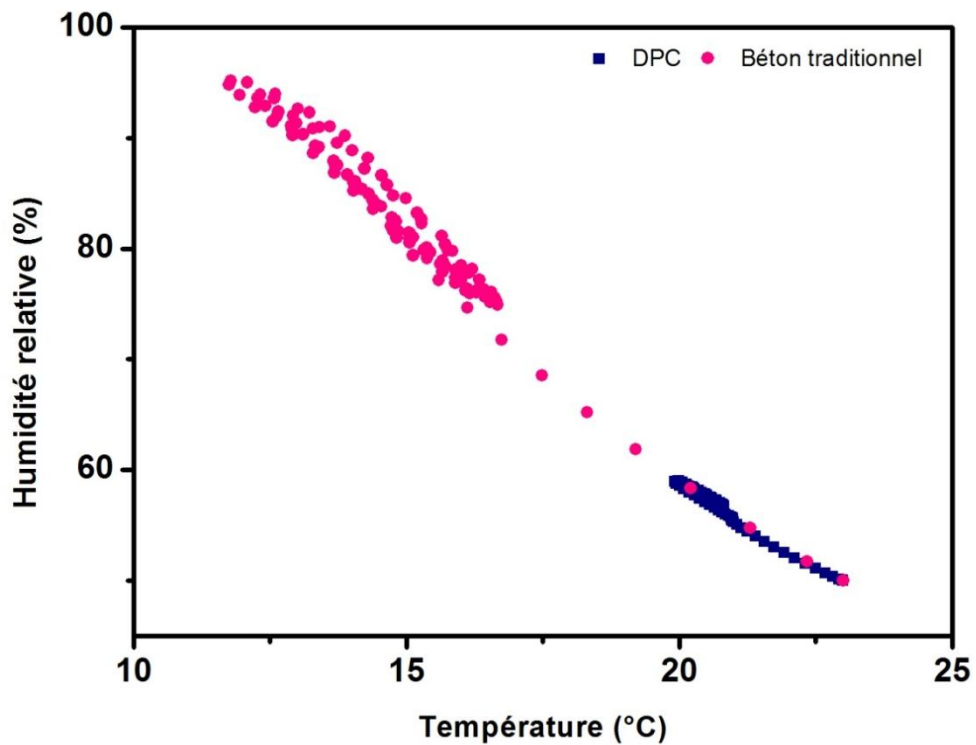


Figure IV.17. Conditions hygrothermiques sur la surface intérieure d'un mur.

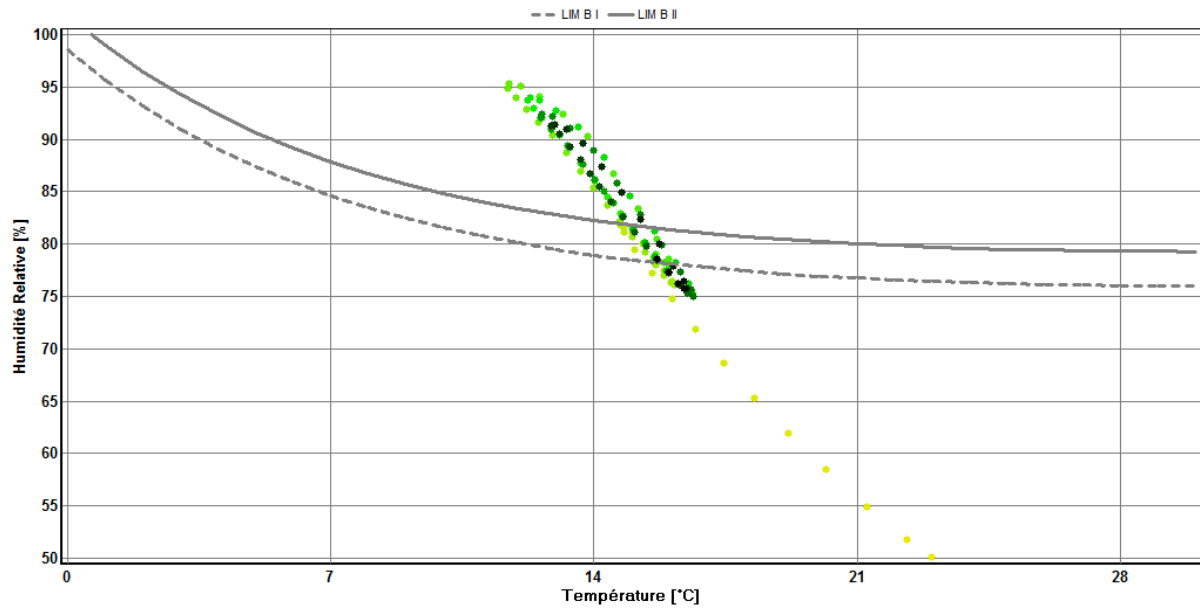


Figure IV.18. "Isopleths" sur la surface intérieure d'une paroi en béton traditionnel.

VII.3.2. Risque de gel

Le risque de gel peut avoir lieu dans le mur lorsque la température dans la paroi descend sous 0°C. Le gel peut causer des dégradations mécaniques importantes, avec détérioration des enduits extérieurs. Le risque de gel est influencé par de nombreux paramètres, tant au niveau des conditions climatiques (température, humidité relative, etc.) qu'au niveau du matériau (paramètres de transport de vapeur, porosité, etc.). Selon les évolutions de la température au milieu de chaque paroi (DPC et béton traditionnel) (Figure IV.19), il est très clair que le risque de gel ne peut pas avoir lieu sous les conditions climatiques hivernales étudiées.

La température peut diminuer jusqu'à autour de 11°C dans le cas de DPC, tandis qu'elle atteint autour de 8°C dans le cas de béton traditionnel.

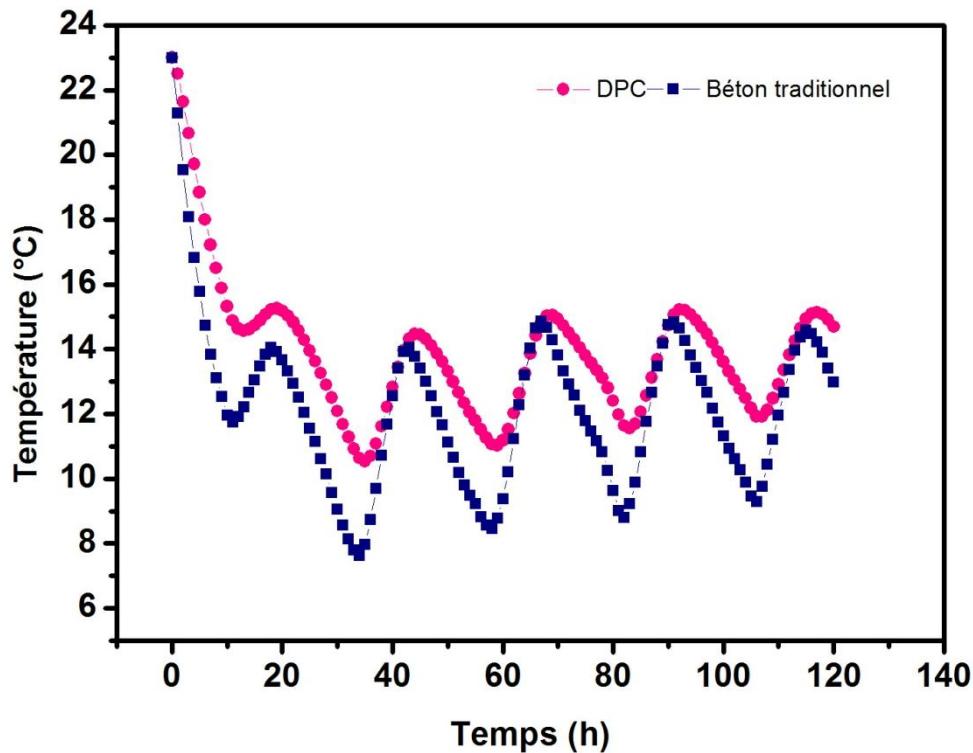


Figure IV.19. Evolution de la température au milieu du mur.

VII.3.3. Confort

Le corps humain ressent le confort thermique par la moyenne de la température de l'air et de la température des parois et des surfaces qui l'environnent. La température de confort peut être définie par la moyenne de la température des parois et de la température de l'ambiance intérieure [10]. Cette différence entre l'ambiance et la température de la surface intérieure devrait rester suffisamment faible.

La Figure IV.20 présente l'évolution de la température de la surface intérieure de chaque paroi sous les conditions hivernales étudiées. On peut remarquer que le mur en DPC peut assurer la sensation de confort thermique avec une température qui varie entre 20 et 21°C. La différence entre la température de la surface et la température de l'ambiance intérieure est autour de 2°C. Par contre, cette différence est comprise entre 6 et 10°C pour le cas du béton traditionnel, en dessous du niveau de confort.

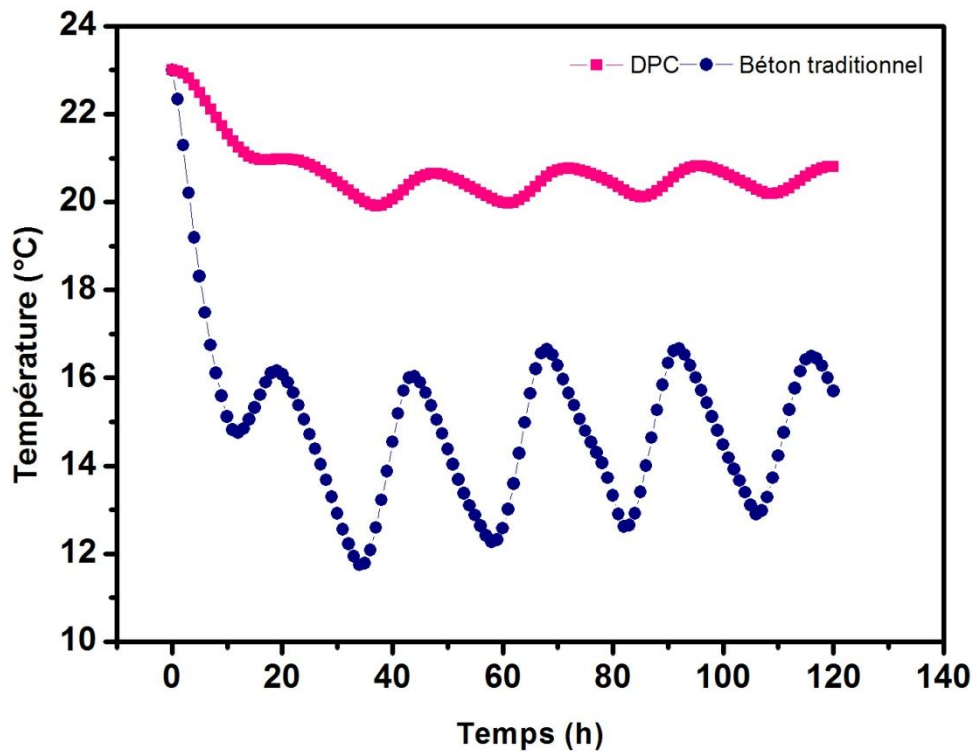


Figure IV.20. Evolution de la température de la surface intérieure du mur.

VIII. Conclusion

Ce chapitre porte sur l'étude numérique du comportement hygrothermique de béton de palmier dattier.

Sous les sollicitations estivales, le béton de palmier dattier présente une inertie thermique non négligeable avec 6 heures de déphasage et 6% de taux d'amortissement. L'inertie thermique de la paroi en béton de palmier dattier est très importante par rapport à celle en béton traditionnel. Une paroi avec une inertie thermique peut retarder le pic de température intérieure jusqu'à la nuit pendant le jour d'été ainsi que l'amortissement de la température extérieure, ce qui limite le surchauffe en été et contribue à assurer le confort thermique. Par ailleurs, le transfert de chaleur simultanément avec le transfert d'humidité a révélé une légère diminution de la température dans la paroi en DPC. Cette diminution peut être attribuée à l'évaporation de l'humidité sous l'effet de l'augmentation de la température à l'extérieur.

Sous les conditions hivernales, le climat se caractérise par un niveau élevé en humidité relative et une chute de température en dessous de 0°C. Le système "LIM" de modèle WUFI® montre que la paroi en béton de palmier dattier ne présente aucune possibilité de la croissance

de moisissures sur sa surface intérieure. En revanche, la condensation superficielle et la croissance de moisissures peuvent avoir lieu dans le cas de béton traditionnel, mais l'évaluation définitive nécessite des études détaillées pour de longues périodes du temps. L'analyse de la température révèle que cette dernière ne peut pas descendre en dessous de 0°C, et par conséquent les risques de gel sont négligeables. Dans les conditions sévères étudiées, notre composant peut assurer la sensation de confort thermique avec une différence de température entre la surface et l'ambiance intérieure est autour de 2°C, contrairement au béton traditionnel, où la différence de température est comprise entre 6 et 10°C, en dessous du niveau de confort.

Références

- [1] D. Samri, "Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique," Thèse de doctorat, Ecole nationale des travaux publics de l'état, 2008.
- [2] "Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés," Document Technique, C&B Constructions et Bioressources, 2012.
- [3] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, and T. Langlet, "Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes," *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 608-615, 2017.
- [4] F. Collet and S. Pretot, "Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall," *Building and Environment*, vol. 82, pp. 459-466, 2014.
- [5] M. Hall and D. Allinson, "Transient numerical and physical modelling of temperature profile evolution in stabilised rammed earth walls," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 433-441, 2010.
- [6] D. Allinson and M. Hall, "Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 845-852, 2010.
- [7] "WUFI passes Benchmark Test of EN 15026," Fraunhofer Institut de physique des bâtiments, Allemagne.

- [8] H.M. Kunzel, "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and Two-dimensional Calculation Using Simple Parameters," Rapport, Institut Fraunhofer de physique des bâtiments, Allemagne, 1995.
- [9] Y. Goto, Y. Ostermeyer, K. Ghazi Wakili, and H. Wallbaum, "Economic, ecological and thermo-hygric optimization of a vapor-open envelope for subtropical climates," *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 799-809, 2012.
- [10] A. Branders and A. Evrard, "Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines," Guide d'aide de la conception, Cellule de recherche Architecture et Climat, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2010.
- [11] C. Zürcher and T. Frank, *Physique du Bâtiment - Construction et Energie*: vdf Hochschulvlg, Zürich, Suisse, 2014.
- [12] S. Jin Chang and S. Kim, "Hygrothermal performance of exterior wall structures using a heat, air and moisture modeling," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3434-3439, 2015.
- [13] Y. Ait Ouméziane, "Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre," Thèse de doctorat, INSA Renne, France, 2013.
- [14] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite," Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 2007.

Conclusion générale et perspectives

I. Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans une problématique générale de développement de matériaux biocomposites innovants dédiés à la construction avec un impact significatif sur l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment.

Dans ce cadre, nous nous proposons de caractériser un nouveau béton formulé à partir d'une matrice à base de ciment au sein de laquelle les granulats conventionnels (gravillons traditionnels) seraient substitués par des ressources naturelles et renouvelables : fibres de palmier dattier.

La ressource végétale de notre matériau est considérée comme des déchets, et la valorisation de cette matière première gratuite en Algérie aurait un impact significatif sur notre environnement et contribuerait à réduire la consommation de matières premières non renouvelable.

Ce travail a été porté d'une part sur l'étude expérimentale des propriétés hydriques et de la conductivité thermique de béton de palmier dattier et, d'autre part, sur la prédiction de son comportement hygrothermique à l'échelle mur sous conditions climatiques réelles.

L'étude expérimentale a révélée que le béton de palmier dattier est un matériau perméable à la vapeur d'eau en raison de sa microstructure. Sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau a été estimée à 4.4, nettement inférieure aux matériaux de construction traditionnels tels que le béton solide et le béton cellulaire autoclavé qui ont des valeurs élevées de 130 et 10, respectivement. Par contre, cette résistance est très proche de celle de béton de chanvre "LHM-wall" (4.8).

Le béton de palmier dattier est un matériau hygroscopique qui peut adsorber et stocker la vapeur d'eau au sein de leur système poreux. Sa courbe de sorption à l'état isotherme a révélée une évolution de type II qui est le plus familier. Le modèle GAB a présenté une bonne approximation de la courbe de l'isotherme de sorption. Dans le domaine de l'hygrométrie étudié, le niveau de sorption hygroscopique de béton de palmier dattier est très similaire à celui de béton de chanvre "LHM-wall". L'avantage de choisir les matériaux hygroscopiques pour la construction est basé sur leur capacité de modérer les variations de l'humidité relative à l'intérieur, d'assurer le confort des occupants et de réduire la consommation d'énergie.

La diffusivité hydrique de béton de palmier dattier a été estimée en fonction de la perméabilité à la vapeur d'eau et l'isotherme de sorption. L'allure de cette courbe est en accord avec la théorie de De Vries. La valeur moyenne déterminée dans le domaine hygroscopique présentait une forte diffusion hydrique de béton de palmier dattier. Cette valeur a le même ordre de grandeur avec celle de béton de chanvre (HLC).

La conductivité thermique sèche de béton de palmier dattier est inférieure à $0.3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, et la même chose pour le béton de chanvre "LHM-wall". Selon la classification RILEM, le béton des granulats légers avec une conductivité thermique inférieure à $0.3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ peut satisfaire les exigences de l'isolation thermique. En revanche, l'influence de l'humidité (80% HR) sur la conductivité thermique était limitée et les résultats restent dans la gamme qui peut satisfaire les exigences de l'isolation thermique.

La succion capillaire est le point noir de béton de palmier dattier. Le contact direct avec l'eau a conduit à absorber l'eau très rapidement que les bétons de chanvres et le mortier. Son coefficient d'absorption d'eau a été estimé à environ $10 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1/2}$. L'effet du type de liant utilisé sur le coefficient d'absorption d'eau n'est pas évident. En effet, la rugosité ou la douceur de la peau de la fibre peut probablement influencer la liaison interfaciale fibre-matrice, et par conséquent la résistance mécanique et le comportement d'absorption d'eau.

La dernière partie de cette thèse a été consacrée à la prédiction numérique du comportement hygrothermique de béton de palmier dattier à l'échelle mur sous les conditions climatiques de la région de Batna (Nord-est d'Algérie). Les résultats ont révélé que ce biocomposite présentait une inertie thermique non négligeable sous conditions estivales. Les résultats de déphasage et de taux d'amortissement ont été estimés à 6 heures et 6%, respectivement. Ces résultats ont été comparés à ceux du béton traditionnel. Une paroi avec une bonne inertie thermique peut retarder le pic de température intérieure jusqu'à la nuit pendant le jour d'été ainsi que l'amortissement de la température extérieure, ce qui limite le surchauffe en été et contribuer à assurer le confort thermique. Des phénomènes d'évaporation de l'humidité peuvent probablement se produire dans la paroi en béton de palmier dattier sous l'effet de l'augmentation de la température à l'extérieur. En revanche, les conditions hivernales se caractérisent par un haut niveau d'humidité relative, cependant, aucun risque d'humidité ne peut être observé dans le mur en béton de palmier dattier pendant la période d'étude en ce qui concerne la croissance de moisissures. Par contre, la condensation superficielle et la

croissance des moisissures sur la surface intérieure de la paroi en béton traditionnel peuvent avoir lieu, mais l'évaluation définitive nécessite des études détaillées pour de longues périodes du temps. Durant les conditions sévères de température en hiver, la paroi en béton de palmier dattier peut assurer la sensation de confort thermique, contrairement à celle en béton traditionnel.

II. Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses et pourront faire l'objet d'études complémentaires :

- Diminuer la teneur en ciment dans le béton de palmier dattier en utilisant la pouzzolane (par exemple, le métakaolin). La pouzzolane a de nombreux avantages, on peut citer : (i) la légèreté, (ii) l'isolation thermique et phonique, (iii) un bon accrochement de liant grâce à sa rugosité, (iv) matériau écologique (la réaction pouzzolanique avec l'eau ne dégage pas CO_2) et (v) ce mélange permettra d'obtenir des bétons de très haute performance.
- Les principaux inconvénients de l'utilisation des fibres naturelles dans des composites sont la mauvaise compatibilité entre la fibre et la matrice. Par conséquent, la modification de la surface des fibres naturelles par des traitements chimiques (par exemple l'acétylation) ou physiques (par exemple le plasma) est l'un des plus importants domaines de recherche en cours, avec l'étude de l'effet de traitement sur la compatibilité et la liaison entre fibre-matrice.
- L'hystérésis entre la courbe d'adsorption de l'humidité et de désorption est recommandée pour être analysée expérimentalement et classée. Ce phénomène n'est pas entièrement compris, mais il est généralement associé à la condensation capillaire dans de petits pores.
- La méthode de la coupelle humide permet d'évaluer la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction à différents couples d'humidité relative : (0/50), (0/23), (43/50), (58/81) comme exemple. Les résultats expérimentaux peuvent être utilisés pour le lissage mathématique de la perméabilité à la vapeur en fonction de l'humidité relative et par conséquent en fonction de la teneur en eau.

- Les mesures expérimentales du coefficient de transport de l'eau liquide sont très recommandées, car les relations approximatives ne peuvent pas toujours estimer les valeurs réelles.
- La recherche du comportement hygrothermique de béton de palmier dattier peut être effectuée à grande échelle (mur ou bâtiment) expérimentalement. L'objectif de cette étude sera d'étudier le comportement de béton de palmier dattier, en réponse aux changements dans les conditions environnementales adjacentes.
- Parallèlement avec le point précédent, un modèle numérique peut être développé et les prédictions numériques peuvent être validées avec les résultats expérimentaux.

Annexes

Tableau 1 : Analogie entre le transfert de chaleur et le transport d'humidité (diffusion de vapeur d'eau à travers un élément de construction).

Transfert de chaleur			Transfert d'humidité (diffusion)		
Symbole	Description	Unité	Symbole	Description	Unité
T	Température	°C resp K	P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	Pa
λ	Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$	δ_p	Perméabilité à la vapeur	$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$
H	Enthalpie	J.m^{-3}	w	Teneur en eau	kg.m^{-3}
q	Densité de flux thermique	W.m^{-2}	g_v	Densité du flux de vapeur	$\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Φ	Flux thermique	W	G	Flux de vapeur d'eau	kg.s^{-1}
h	Coefficient de transfert de chaleur surfacique	$\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$	β	Coefficient de transfert de vapeur d'eau	$\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$
R $= \sum e/\lambda$	Résistance thermique	$\text{m}^2\text{K.W}^{-1}$	Z $= \sum e/\delta_p$ $= \sum s_d/\delta_a$	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	$\text{m}^2\text{sPa.kg}^{-1}$

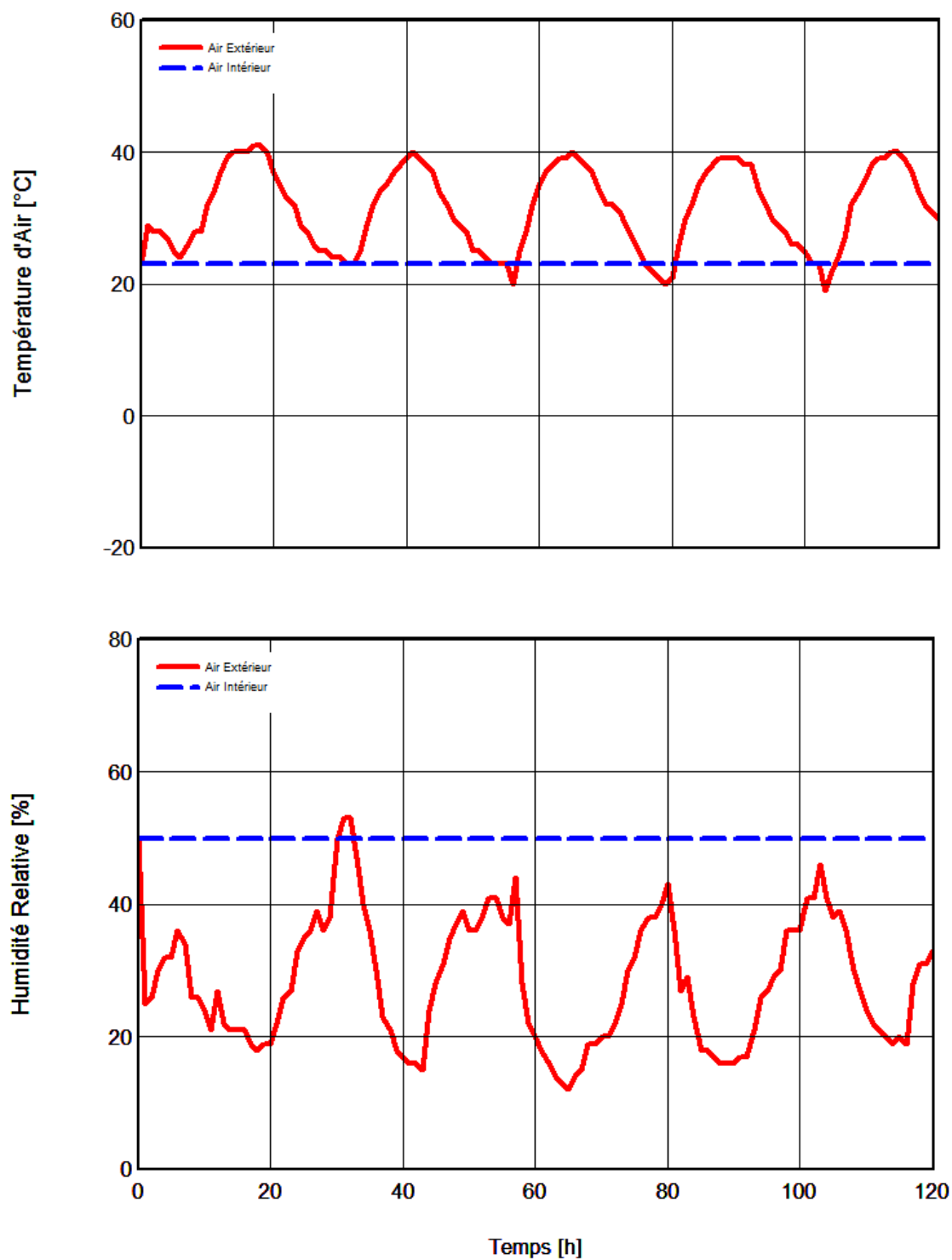


Figure 1 : Sollicitations estivales pendant les cinq (5) premiers jours d’Août 2017.

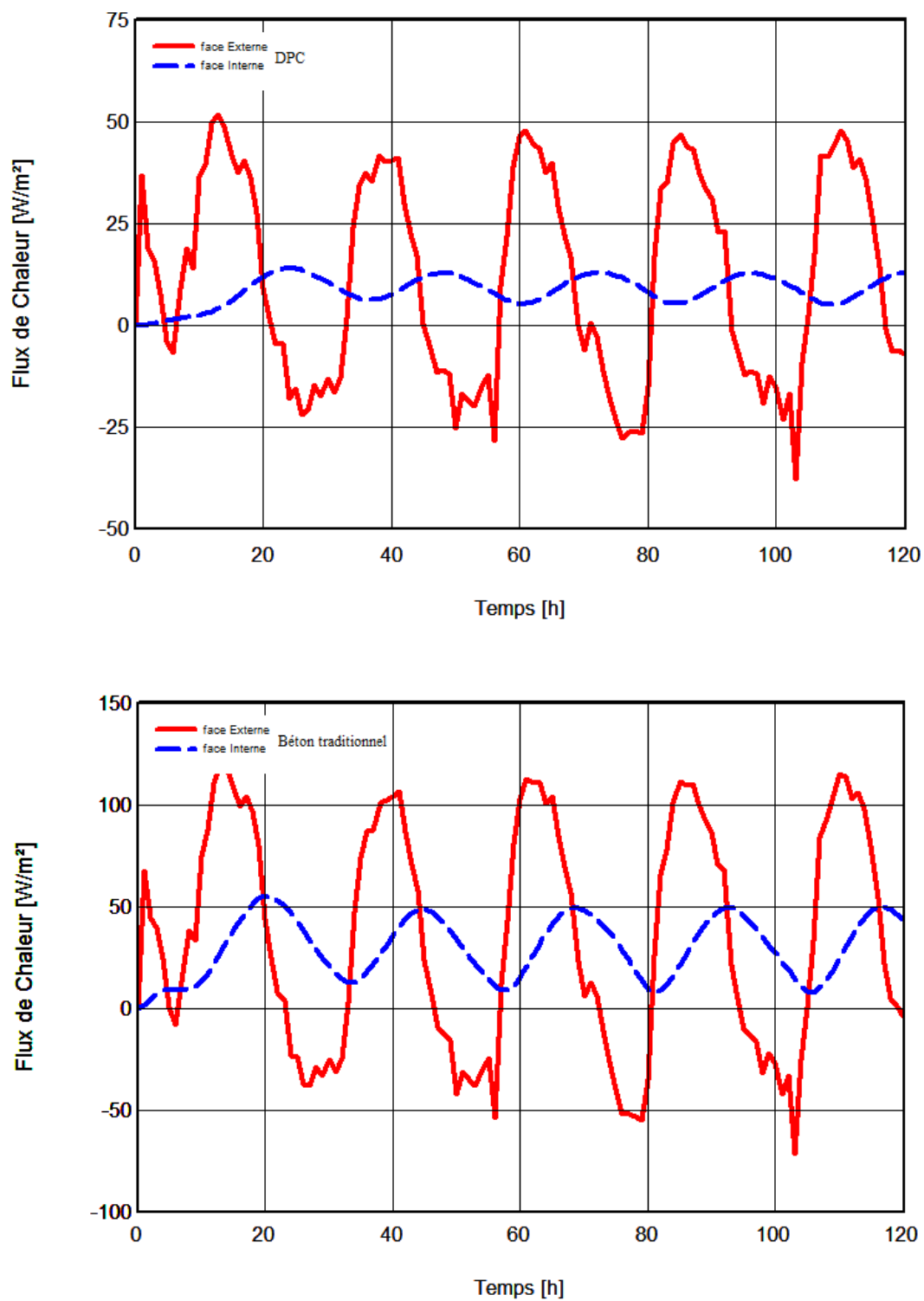


Figure 2 : Flux de chaleur à travers les faces externe et interne de la paroi – Cas de transfert de chaleur seulement.

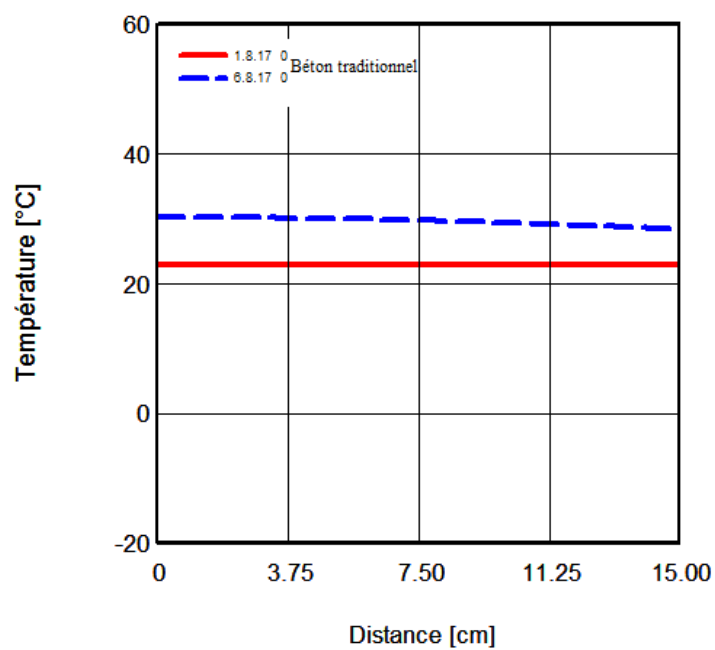
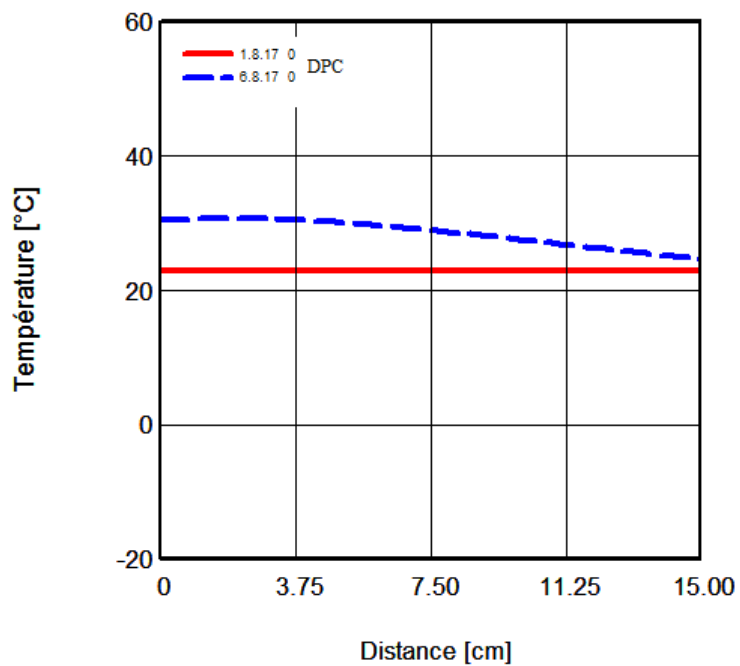


Figure 3 : Profils de température à travers le mur – Cas de transfert de chaleur seulement.

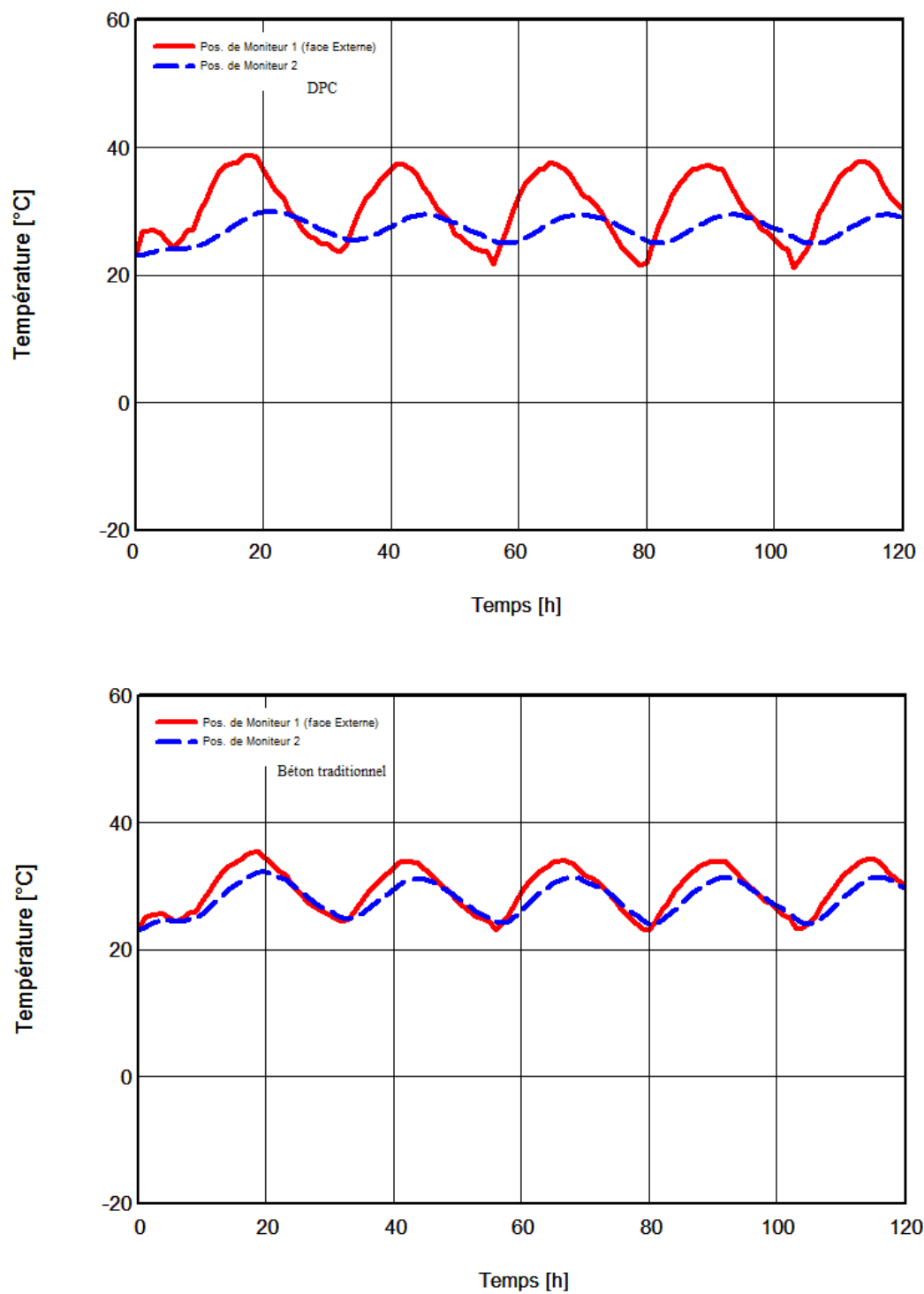


Figure 4 : Evolution de la température aux positions du moniteur 1 (face externe) et 2 (au milieu de la paroi) – Cas de transfert de chaleur seulement.

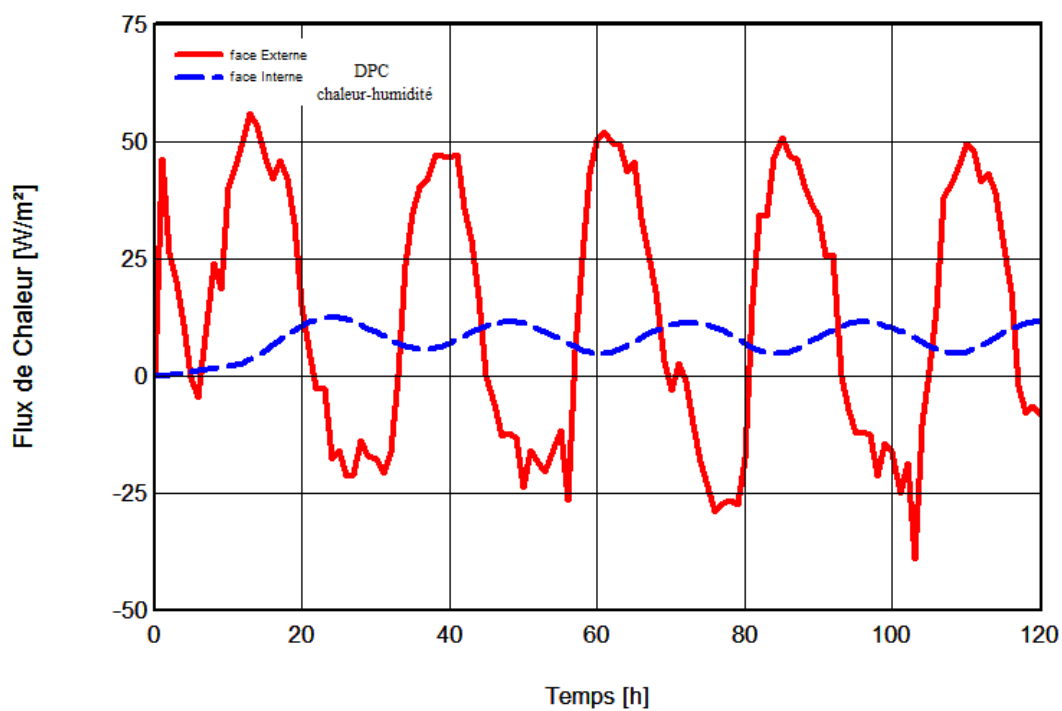
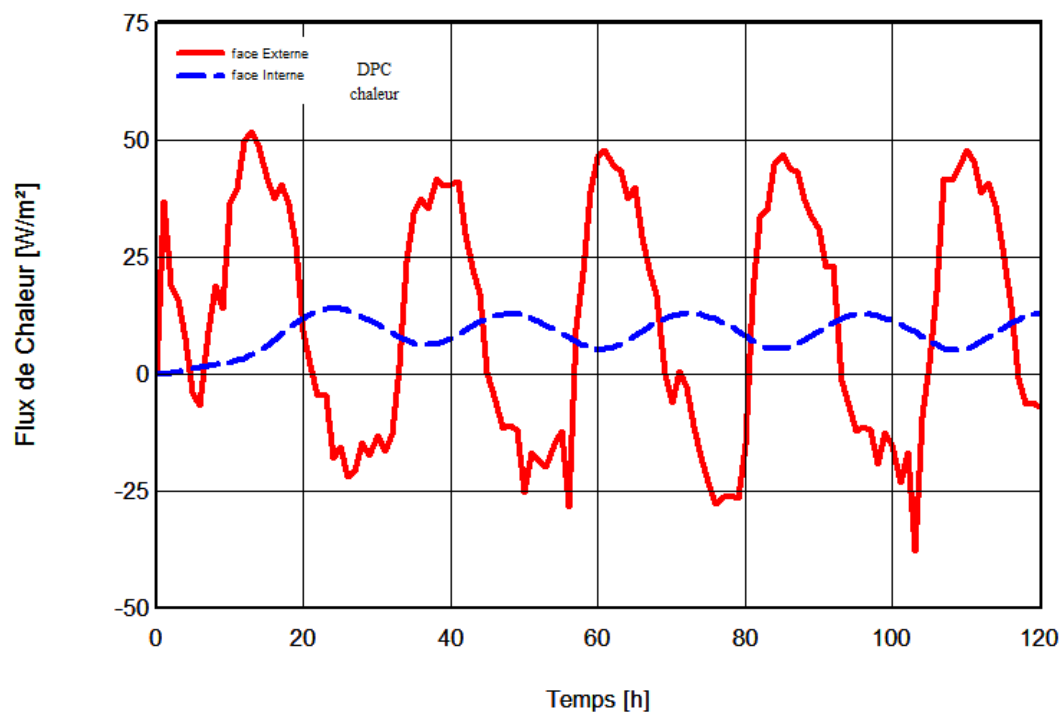


Figure 5 : Flux de chaleur à travers les faces externe et interne de la paroi – Cas de transfert simultané de chaleur-humidité.

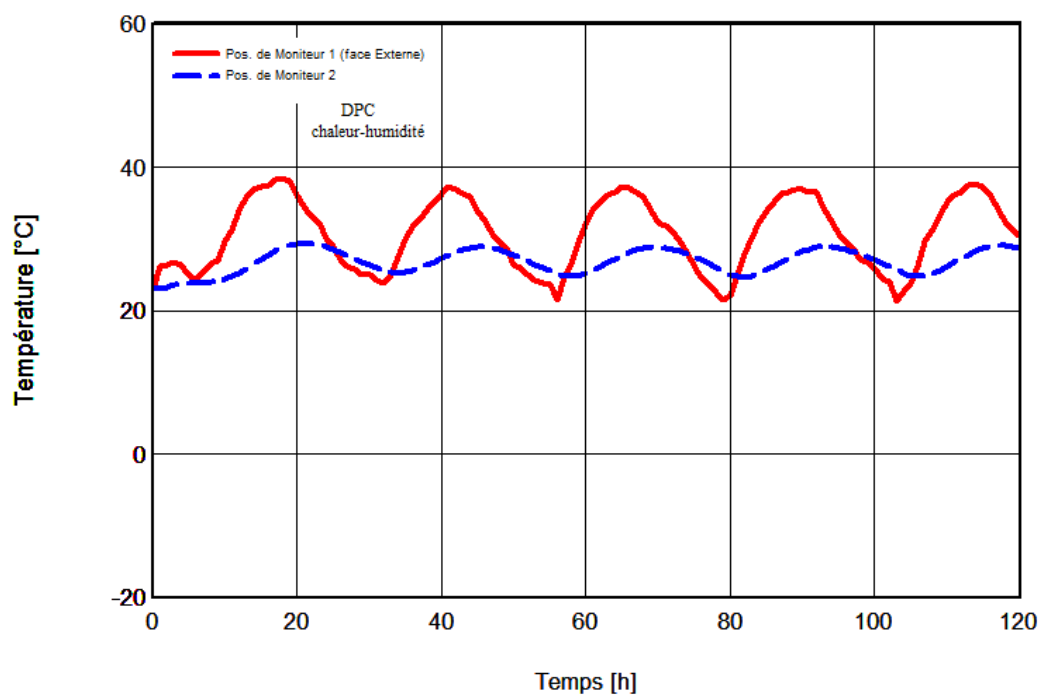
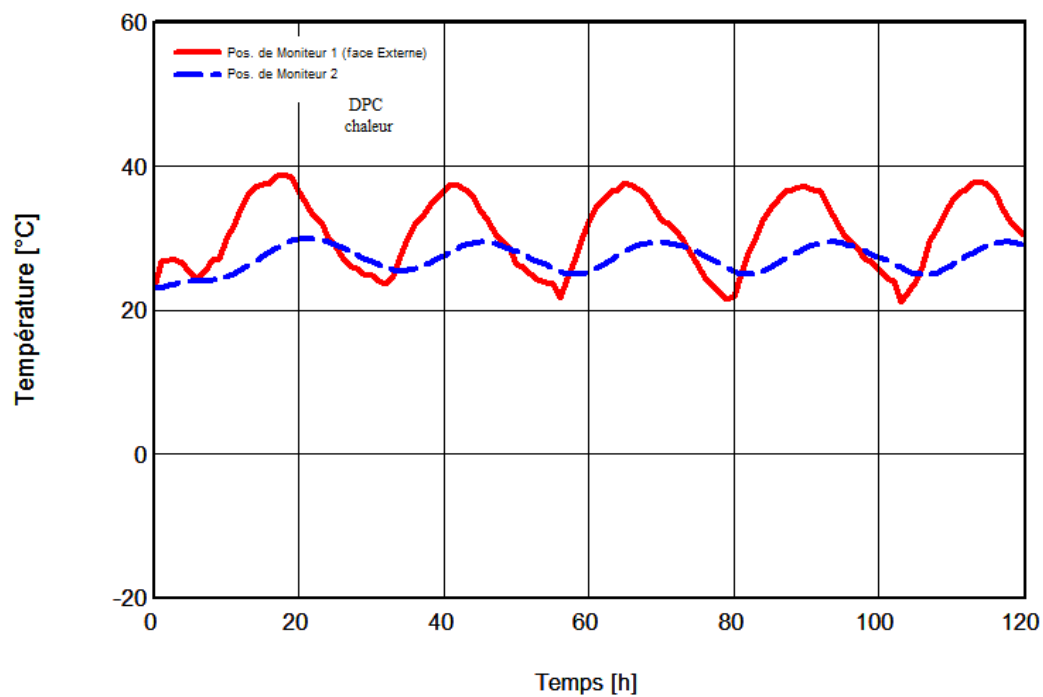


Figure 6 : Evolution de la température aux positions du moniteur 1 (face externe) et 2 (au milieu de la paroi en DPC).

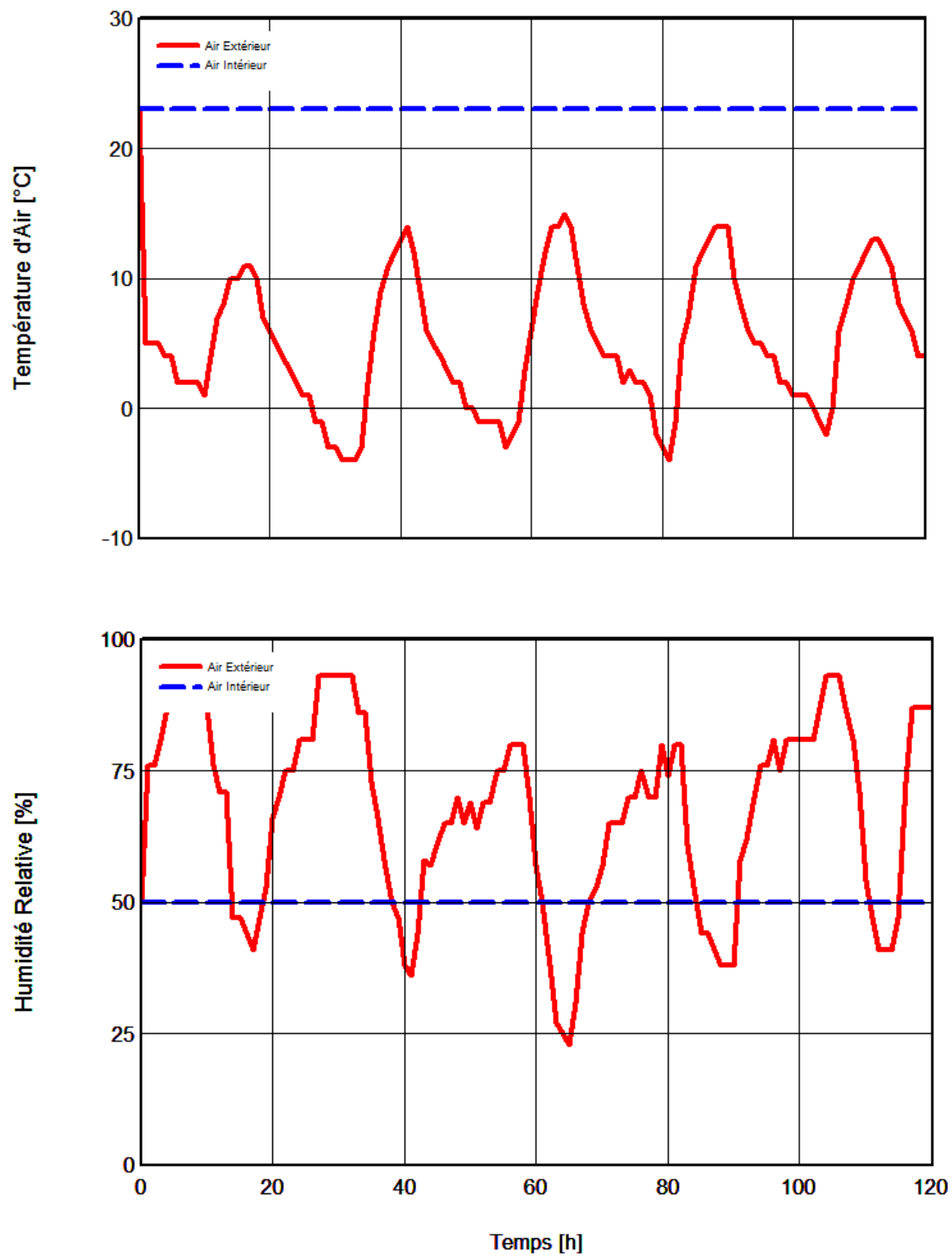


Figure 7 : Sollicitations hivernales pendant les cinq (5) premiers jours de Janvier 2017.

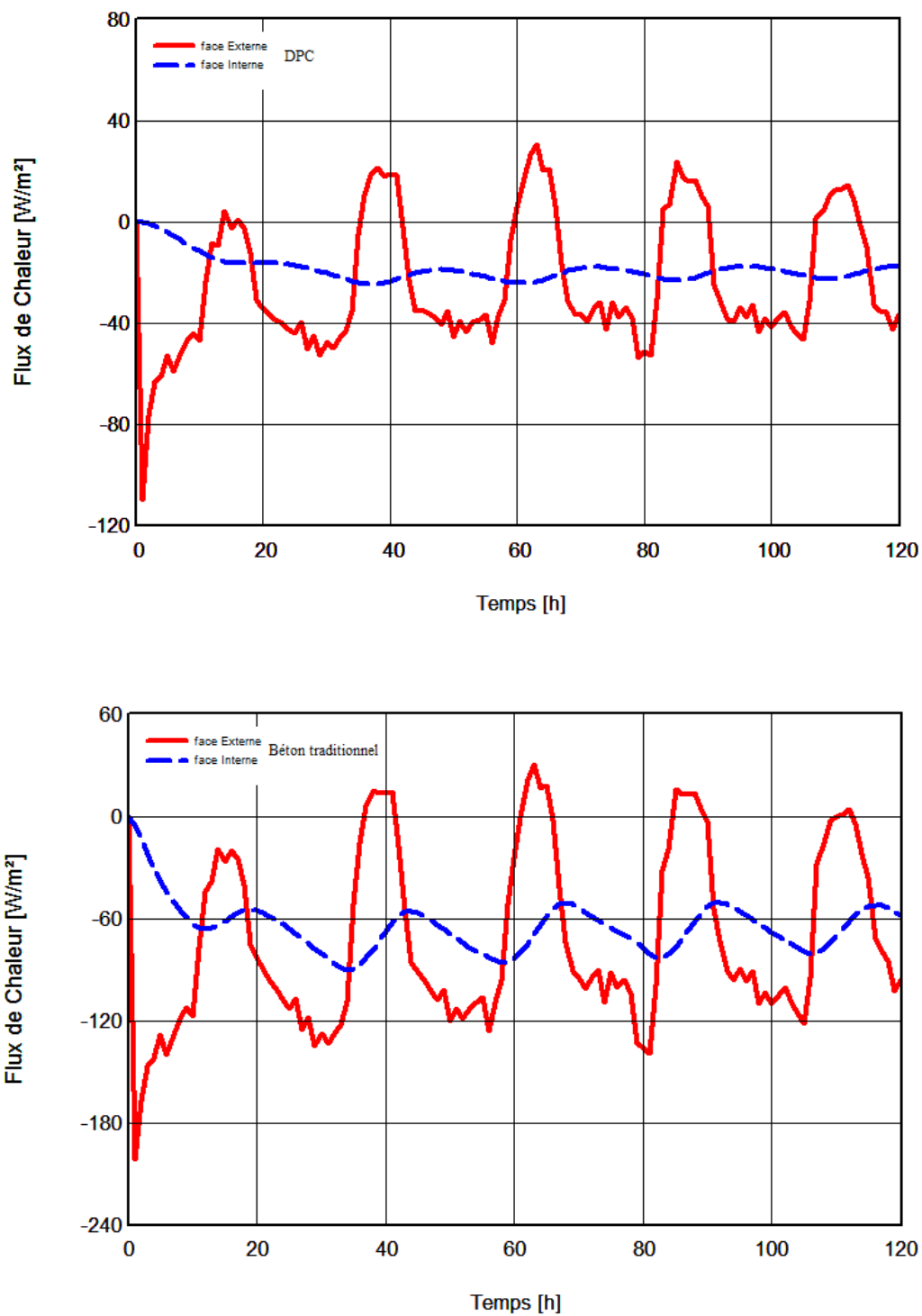


Figure 8 : Flux de chaleur à travers les faces externe et interne de la paroi.

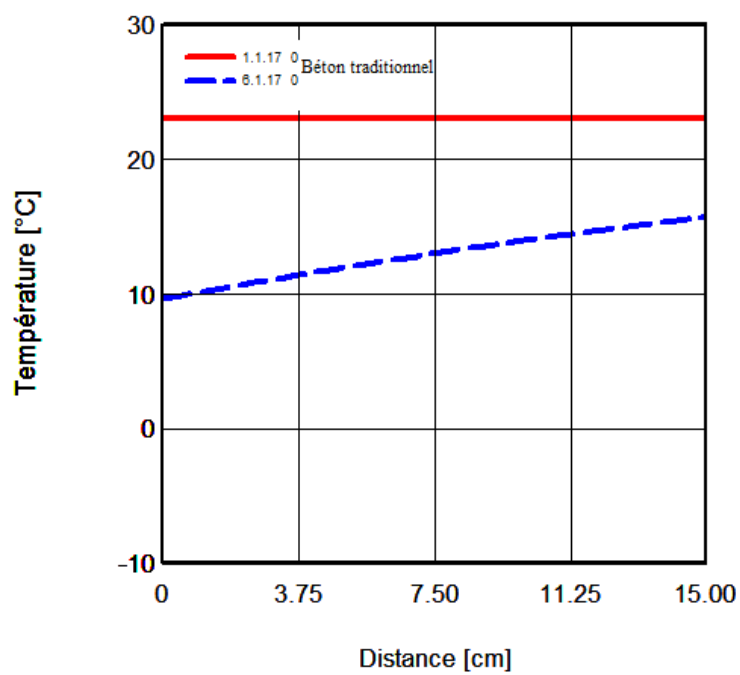
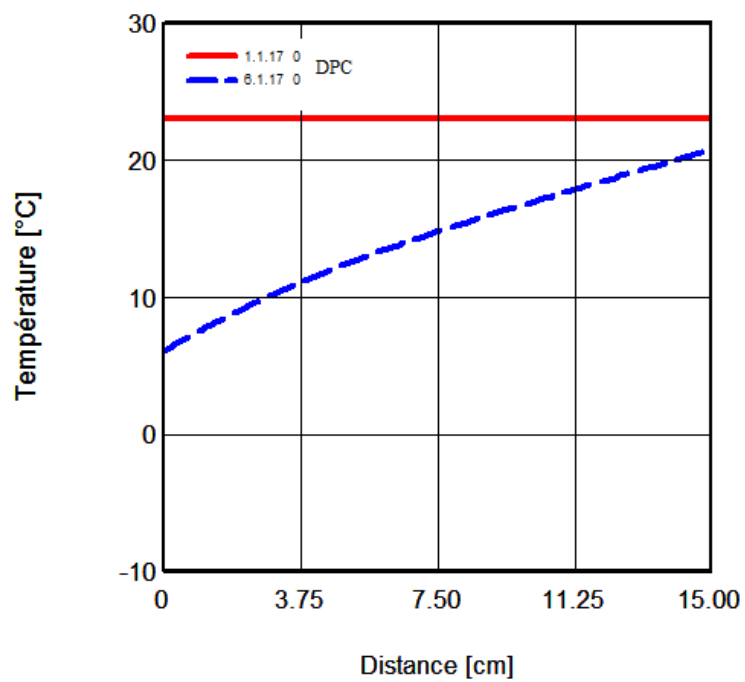


Figure 9 : Profils de température à travers le mur.

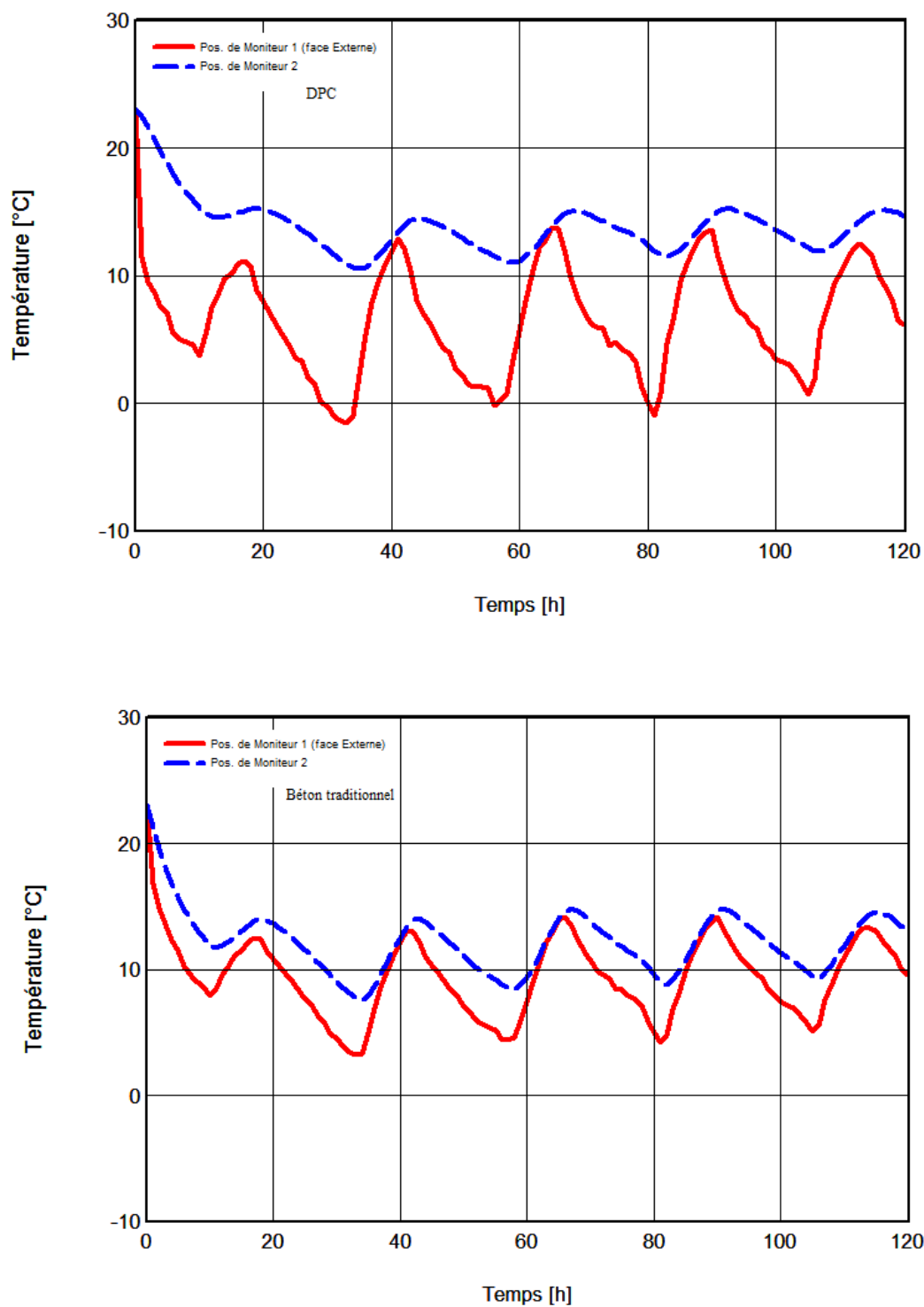


Figure 10 : Evolution de la température aux positions du moniteur 1 (face externe) et 2 (au milieu de la paroi).

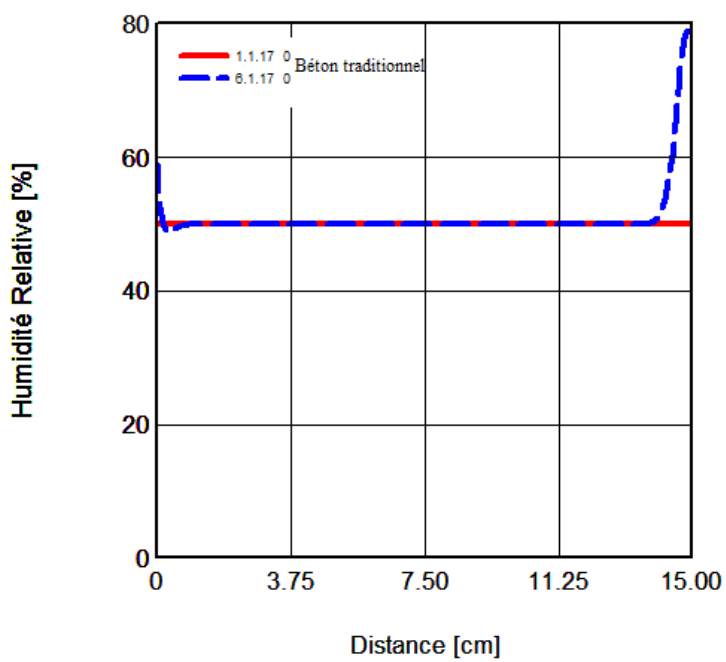
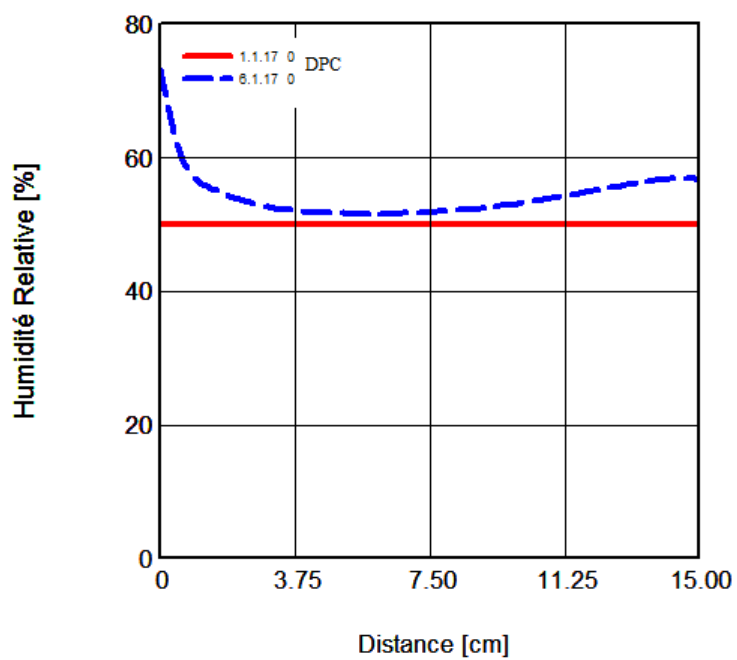


Figure 11 : Profils d'humidité relative à travers le mur.

Titre du mémoire : ETUDE IN-SITU DES PERFORMANCES ENERGETIQUES ET MECANIQUES DES MATERIAUX BIOSOURCES ET LOCAUX.

Option : Physique Energétique.

Auteur : HABA Bourhaneddine.

Mots clés : Propriétés hydriques, Matériau de construction biocomposite, Béton de palmier-dattier, Conductivité thermique.

Adresse : Laboratoire LPEA, Université Batna 1, 1, rue Boukhrouf Med El Hadi, 05000 Batna, Algérie.

Résumé :

Cette thèse est consacrée d'une part à l'étude expérimentale des propriétés hydriques et de la conductivité thermique d'un nouveau matériau isolant dédié à la construction dénommé le béton de palmier dattier, constitué de fibres naturelles dispersées dans une matrice à base de ciment et, d'autre part, à la prédiction du comportement hygrothermique à l'échelle mur sous les conditions climatiques de la région de Batna (Nord-est d'Algérie) en utilisant un logiciel numérique bien connu. Les résultats expérimentaux révèlent que le béton de palmier dattier est un bon candidat pour les applications d'isolation thermique. Ce biocomposite présente un comportement hygroscopique et une faible résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. En outre, sa diffusivité hydrique a le même ordre de grandeur avec des matériaux similaires. D'autre part, la prédiction numérique de comportement hygrothermique révèle que le béton de palmier dattier à l'échelle mur a une inertie thermique non négligeable sous conditions estivales. En revanche, les risques liés à l'humidité ne peuvent être attendus pendant la période étudiée en hiver. Concernant le confort thermique pendant les conditions sévères de la température extérieure en hiver, le bio composite semble capable d'assurer la sensation de confort thermique à l'intérieur du bâtiment.

عنوان الأطروحة : دراسة في الموقع للأداء الطاقوي والميكانيكي للمواد المحلية ذات المصدر الطبيعي

الكلمات المفتاحية : الخصائص المتعلقة بالرطوبة، مادة بناء مركبة تحتوي على عناصر طبيعية، خرسانة نخيل التمر، الناقلية الحرارية

الملخص :

الأطروحة مخصصة من جهة للدراسة التجريبية للخصائص المتعلقة بالرطوبة والناقلية الحرارية لمادة عزل جديدة مخصصة للبناء تدعى خرسانة نخيل التمر مكونة من ألياف طبيعية موزعة في مصفوفة قائمة على الإسمنت ومن جهة أخرى، التنبؤ بالسلوك الناجم عن الانتقال المتزامن للحرارة والرطوبة على مستوى الجدار في ظل الظروف المناخية لمنطقة باتنة (شمال شرق الجزائر) وهذا باستخدام برنامج رقمي معروف جدا في هذا المجال. وهكذا، تكشف النتائج التجريبية أن خرسانة نخيل التمر تعتبر مرشح جيد لتطبيقات العزل الحراري. هذه المادة المركبة ذات الألياف الطبيعية تظهر قدرة على تخزين الرطوبة وكذا مستوى منخفض في مقاومة إنتشار بخار الماء. علاوة على ذلك، فإن معامل إنتشار الرطوبة لهذه المادة أظهر ذات القيمة الأسية التي لدى معاملات مواد أخرى مماثلة. من ناحية أخرى، يكشف التنبؤ الرقمي للسلوك الناجم عن الانتقال المتزامن للحرارة و الرطوبة أن جدارا من خرسانة نخيل التمر يمتلك مقاومة حرارية غير قابلة للإهمال في ظل الظروف الصيفية. في المقابل، لا يمكن توقع حدوث مخاطر ناجمة عن الرطوبة خلال الفترة التي شملتها الدراسة في فصل الشتاء. أما فيما يتعلق بالراحة الحرارية في ظل الشروط القاسية في درجة الحرارة الخارجية لفصل الشتاء، يبدو أن هذه المادة المركبة ذات الألياف الطبيعية قادرة على ضمان الشعور بالراحة الحرارية داخل المبنى.