

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 :
Belloum Rahma

Thème :

**Contribution à l'étude du comportement thermo-hydrigue dans
des enveloppes de bâtiments à fort hygroscopie**

Domaine : Sciences de la Matière
Filière : Physique
Spécialité : Physique énergétique appliquée

Soutenue le : 07/05/2023

Devant le jury :

Président :	Benmachiche Abdelmoumene Hakim	Pr	Université Batna 1
Rapporteur :	Agoudjil Boudjema	Pr	Université Batna 1
Co-rapporteur :	Boudenne Abderrahim	Pr	Université Paris-Est
Examineurs :	Bouras Fethi Haddadi Manel	Pr MCA	Université d'El-Oued Université Batna 1
Invitée	Nawal Chennouf	MCB	Université Batna 1

Remerciement

Ce travail de thèse a été mené dans l'annexe du laboratoire de physique énergétique appliquée LPEA à l'Université de Batna1.

A la fin de ce travail de recherche, je tiens à remercier en premier lieu DIEU miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour accomplir cette thèse.

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude pour mon encadreur **Pr. AGOUDJIL Boudjema** pour m'avoir encadré, guidé et encouragé tout au long mes années d'études, je le remercie également pour sa disponibilité et tout le temps qu'il m'a consacré, ainsi que pour ses précieux conseils qui m'ont été indispensables.*

*Je tiens à remercier très vivement **Pr. Abderrahim Boudenne** pour son encadrement, ses orientations ainsi que pour tout le temps qu'il m'a consacré. Un grand merci pour ça.*

*J'exprime toute ma gratitude à **Dr. CHENNOUF Nawel** pour l'excellence de ses conseils, ses orientations, sa générosité. Je tiens à la remercier sincèrement de de m'avoir guidé, Votre soutien et vos encouragements m'ont été indispensable. Un grand merci pour ça.*

Je souhaite aussi remercier ici ma mère, mon père, mon frères, mes sœurs et toute ma famille qui ont toujours cru en moi et m'ont toujours soutenu et poussé pour que j'arrive jusque-là.

Nomenclature

Symboles latins :

A	Surface	m²
A_c	Coefficient d'absorption d'eau liquide	kg.m⁻²S^{-0.5}
C₀	Capacité thermique massique du matériau sec	J.kg⁻¹.K⁻¹
C_l	Capacité thermique massique de l'eau liquide	J.kg⁻¹.K⁻¹
C_p	Chaleur spécifique de l'air intérieur	J.kg⁻¹.K⁻¹
D_l	Coefficient de diffusion liquide	kg.m⁻¹.s⁻¹
D_T	Coefficient de thermo-diffusion	kg.m⁻¹s⁻¹K⁻¹
D_{ws}	Coefficients de transport de liquide pour la succion	m².S⁻¹
D_{ww}	Coefficients de transport de liquide pour la redistribution	m².S⁻¹
D_x	Coefficient de diffusion de masse	kg.m⁻¹s⁻¹
g_v	Densité de flux de vapeur	Kg.m⁻².s⁻¹
g_l	Densité de flux d'eau liquide	Kg.m⁻².s⁻¹
g_{wi}	Flux d'humidité traversant la pièce par les surfaces	kg.s⁻¹m⁻²
h_t	Coefficients de transfert thermique	W.m⁻²K⁻¹
h_m	Coefficients de transfert massique	kg. m⁻²s⁻¹ Pa⁻¹
H	Enthalpie du matériau humide	J.m⁻³
H₀	Enthalpie du matériau sec	J.m⁻³
H_l	Enthalpie de l'eau liquide contenue dans le matériau	J.m⁻³
l_v	Chaleur latente de changement de phase	J.kg⁻¹
M_l	Masse molaire de la vapeur d'eau	kg.mol⁻¹

M_{prod}	Production d'humidité	kg.h⁻¹
M_{HVAC}	Gains ou pertes d'humidité dus au système HVAC	kg.h⁻¹
n	Taux d'infiltration d'air	h⁻¹
P	Porosité totale	--
P₀	Porosité ouverte	--
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	Pa
P_{vs}	Pression partielle de vapeur saturante	Pa
q	Densité de flux de chaleur	W.m⁻²
Q_{in}	Gains internes des occupants, de la lumière et des équipements	W
Q_{HVAC}	Flux de chaleur gagnés ou perdus grâce au système HVAC	W
R	Constante universelle des gaz parfaits	J.mol⁻¹.K⁻¹
S_c	Terme source de chaleur	W.m⁻³
s	Sensibilité relative	%
t	Temps	S
T	Température	K
u	Teneur en eau massique	Kg.kg⁻¹
v	Taux d'humidité absolue	kg.m⁻³
V_o	Volume des pores ouverts	m³
V_a	Volume apparent du matériau	m³
V	Volume total des pores	m³
W	Teneur en eau par unité de volume	Kg.m⁻³
W_f	Teneur en eau saturante	kg.m⁻³
X	: fraction massique de la vapeur dans l'air	--

Symboles grecques :

$\delta_{p,a}$	Perméabilité à la vapeur de l'air	$\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$
δ_p	Perméabilité à la vapeur du matériau humide	$\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$
φ	Humidité relative	--
ρ	Masse volumique apparente	Kg.m^{-3}
ρ_0	Masse volumique du matériau sec	Kg.m^{-3}
ρ_{air}	Masse volumique de l'air intérieur	kg.m^{-3}
θ	Teneur en eau volumique	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
λ	Conductivité thermique du matériau humide	$\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$
μ	Facteur de résistance à la diffusion a l'état sec	--
μ^*	Facteur de résistance à la diffusion a l'état humide	--
ζ_ϕ	Capacité hydrique	Kg.m^{-3}
ε	Rapport entre le flux diffusif de la vapeur d'eau et le flux de masse total	--
δ_s	Coefficient de thermo-diffusion	--
η	Déphasage	h
ξ	Taux d'amortissement	%

Symboles mathématiques :

\mathbf{d}	Opérateur pour dérivée total
∂	Opérateur pour dérivée partielle
Δ	Opérateur différentiel
∇	Opérateur Nabla

Listes des figures

Chapitre I : Etat de l'art

Figure I.1.	<i>Classification de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité, source Ministère des Energies et des Mines.</i>	5
Figure I.2.	<i>Consommation énergétique annuelle en KWh des équipements ménagés</i>	5
Figure I.3.	<i>Réparation des pertes thermiques dans un bâtiment non isolée</i>	6
Figure I.4.	<i>Cycle de vie d'un matériau ou d'une technologie</i>	7
Figure I.5	<i>Béton de chanvre</i>	8
Figure I.6	<i>Bâtiment construite en paille</i>	10
Figure I.7.	<i>Forêt de Palmier dattier</i>	11
Figure I.8.	<i>Représentation schématique d'une palme</i>	11
Figure I.9.	<i>Energie de refroidissement et de chauffage nécessaire pour climatiser une chambre (24 °C et 50% d'HR) pour un enveloppe hygroscopique et un autre non hygroscopique</i>	14
Figure I.10.	<i>Transfert hygrothermique couplé à travers la paroi hygroscopique</i>	15
Figure I.11.	<i>Etapas de préparation de différents composites à base des fibres de palmier dattier</i>	16
Figure I.12.	<i>Méthode de préparation du composite rempli de fibres de palmier dattier</i>	16
Figure I.13.	<i>Isotherme de sorption de DPC</i>	20
Figure I.14.	<i>Tampon hydrique (MBV) du DPC en comparaison avec des matériaux de construction usuelle</i>	20
Figure I.15.	<i>Procédé expérimental utilisé pour l'évaluation de la paroi en DPC</i>	22
Figure I.16.	<i>Variation de la température dans le mur en DPC</i>	23
Figure I.17.	<i>Validation des modèles de Kunzel et Mendes pour la prédiction de l'humidité (A) relative et de la température (B) dans le mur en DPC</i>	24

Figure I.18.	<i>Impact de l'hystérésis de la courbe de sorption sur la simulation de mur en</i>	24
Figure I.19.	<i>Schéma de l'environnement et les différents programmes associés à Energyplus</i>	26
Figure I.20.	<i>Schéma de la méthode de co-simulation instationnaire HAM-BES</i>	32
Figure I.21.	<i>Principe du couplage entre le modèle thermique du bâtiment de TRNSYS et le modèle de la paroi végétalisée</i>	33
Figure I.22.	<i>Schéma du couplage entre TRNSYS et modèle HAM</i>	33

Chapitre II : Choix de l'outil de simulation et validation du modèle de calcul

Figure II.1	<i>Schéma d'un matériau hygroscopique</i>	44
Figure II.2.	<i>Courbe de sorption du DPC dattier à 23°C</i>	46
Figure II.3.	<i>Conductivité thermique du DPC pour différentes température et dans l'état sec et humide</i>	48
Figure II.5.	<i>Schéma de modes de fixation d'humidité dans un pore</i>	50
Figure II.6.	<i>Interface EP-launch</i>	61
Figure II.7.	<i>Interface IDF Editor</i>	62
Figure II.8.	<i>Schéma du banc expérimental</i>	66
Figure II.9.	<i>Validation du modèle HAMT en utilisant données expérimentales : (a) humidité relative et (b) température</i>	67
Figure II.10.	<i>Comparaison entre les résultats expérimentaux (EXP) et numériques (SIM) de l'humidité relative intérieur</i>	68
Figure II.11.	<i>Géométrie du bâtiment</i>	69
Figure II.12.	<i>Confrontation de la solution analytique et de la simulation pour les deux Cas : Cas 0A et Cas 0B</i>	70
Figure II.13.	<i>Résidu de l'humidité relative intérieur</i>	71

Chapitre III : Evaluation des performances hygrothermiques d'un bâtiment en DPC sous différentes conditions climatiques

Figure III.1.	<i>Géométrie du bâtiment choisi pour l'étude</i>	76
Figures III.2.	<i>Conditions extérieures de la région de Batna en période d'hiver (Janvier du 1^{er} au 4) : (a) humidité relative et (b) température</i>	76
Figures III.3.	<i>Conditions extérieures de la région de Batna en période d'été (Juillet du 23 au 26): (a) humidité relative et (b) température</i>	77
Figure III.4.	<i>(a) Humidité relative intérieure et (b) température simulées du bâtiment non climatisée (du 1^{er} au 4 Janvier)</i>	79
Figure III.5.	<i>Humidité relative intérieure (a) et température (b) simulées du bâtiment non climatisée (du 23 au 26 Juillet)</i>	80
Figures III.6.	<i>Conditions climatiques de la région d'Alger en période d'été (Juillet du 23 au 26): (a) humidité relative et (b) température.</i>	83
Figures III.7.	<i>Conditions climatiques de la région de Ouargla en période d'été (Juillet du 23 au 26): (a) humidité relative et (b) température</i>	83
Figure III.8.	<i>Isotherme de sorption du AAC issue du logiciel WUFI</i>	84
Figure III. 9.	<i>Température calculée à l'intérieure des bâtiments en DPC en AAC (23-26 juillet) à : Alger (a), Batna (b) et Ouargla (c)</i>	86
Figure III.10.	<i>Humidité relative calculée à l'intérieure des bâtiments en DPC et AAC (23-26 juillet) à Alger (a), Batna (b) et Ouargla (c)</i>	88
Figure III.11.	<i>Energie requise pour le refroidissement des bâtiments en DPC et en AAC</i>	90
Figure III.12.	<i>Humidité relative de : (a) la surface intérieure et (b) la surface extérieure pour les deux configurations étudiées</i>	92
Figure III.13.	<i>Evaluation du risque de condensation sur la surface interne des bâtiments en DPC (a) et en AAC (b)</i>	93
Figure III.14.	<i>Conditions hygrothermiques sur la surface intérieure de l'enveloppe du bâtiment</i>	93

Chapitre IV : Etude numérique paramétrique

Figure IV.1.	<i>Solution de référence de : (a) l'humidité relative et (b) la température</i>	100
Figure IV.2.	<i>Impact de la conductivité thermique sur la prédiction de : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.</i>	102

Figure IV.3.	<i>Impact de la chaleur spécifique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce</i>	103
Figure IV.4.	<i>Impact de la masse volumique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.</i>	104
Figure IV.5.	<i>Impact du facteur de résistance à la vapeur sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.</i>	105
Figure IV.6.	<i>Impact de l'isotherme de sorption sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.</i>	106
Figure IV.7.	<i>Impact de coefficient de convection thermique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.</i>	107
Figure IV.8.	<i>Impact de coefficient de convection massique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.</i>	107
Figure IV.9.	<i>Evolution de la sensibilité relative de : (a) la température et (b) l'humidité relative pour tous les paramètres étudiés</i>	109
Figure IV.10.	<i>Variation de l'humidité relative intérieure avec le taux de renouvellement d'air une l'enveloppe hygroscopique.</i>	111
Figure IV.11.	<i>Variation de l'humidité relative intérieure avec le taux de renouvellement d'air pour une l'enveloppe non-hygroscopique</i>	112
Figure IV.12.	<i>Effet de la teneur initiale en eau du DPC sur l'humidité relative intérieure</i>	113
Figure IV.13.	<i>Effet de la teneur initiale en eau du DPC sur la température intérieure</i>	114
Figure IV.14.	<i>Effet de la teneur initiale en humidité du DPC sur la consommation d'énergie.</i>	114
Figure IV.15.	<i>Effet de l'épaisseur de l'enveloppe sur :(a) l'humidité relative, (b) la température et (c) la consommation d'énergie du bâtiment.</i>	116
Figure IV.16.	<i>Effet de la thermo-dépendance de la conductivité thermique sur la prédiction de : (a) l'humidité relative, (b) la température et (c) le taux de climatisation.</i>	118
Figure IV.14.	<i>Effet de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique sur la prédiction de : (a) l'humidité relative et (b) la température.</i>	118

Listes des tableaux

Chapitre I : Etat de l'art

Tableau I.1	Propriétés du béton de chanvre	9
Tableau I.2	Résultats de caractérisation du DPC à l'échelle matériau	19
Tableau I.3	Classification des logiciels hygrothermiques	36

Chapitre II : Choix de l'outil de simulation et validation du modèle de calcul

Tableau II.1	Formules de la teneur en eau.	45
Tableau II.2	Valeurs de la perméabilité et de facteur de résistance de DPC	47
Tableau II.3	Coefficients de transport de liquide pour la succion D_{ws} et pour la redistribution D_{ww} du DPC	48
Tableau II.4	Propriétés hygrothermiques du béton cellulaire	69

Chapitre III : Evaluation des performances hygrothermiques d'un bâtiment en DPC sous différentes conditions climatiques

Tableau III.1	Description des cas de simulation	77
Tableau III.2	Besoins de chauffage et de climatisation pour les deux cas étudiés.	82
Tableau III.3	Propriétés hygrothermique du béton cellulaire autoclavé	83
Tableau III.4	Déphasage (h)	87
Tableau III.5	Amortissement (%)	87
Tableau III.7	Economie d'énergie (%)	90
Tableau III.8	Comparaison entre le béton de chanvre et le DPC en termes d'économie d'énergie	91

Chapitre IV : Etude numérique paramétrique

Tableau IV.1	Paramètres de simulation de référence.	100
---------------------	--	-----

Table IV.2	Impacts des paramètres hygrothermiques du DPC sur la consommation d'énergie	110
Tableau IV.3	Effet de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique sur le taux de climatisation	118

Tables des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art

I. Introduction.....	5
II. Contexte de l'étude.....	5
II.1. Principaux enjeux dans le secteur du bâtiment et de la construction en Algérie.....	5
II.2. Matériaux biosourcés : une meilleure solution pour le développement durable	7
II.2.1. Matériaux biosourcés les plus connus	9
II.3. Comportement hygrothermique des matériaux hygroscopiques biosourcés	13
II.3.1. Effets de l'humidité sur le bien-être des habitants et sur les besoins énergétiques du bâtiment.....	14
II.3.2. Rôle de l'enveloppe hygroscopique à base des matériaux biosourcés	15
III. Synthèse des recherches effectuées sur différents composites à base de bois de palmier dattier.....	16
III.1. Intégration des fibres de bois de palmier dattier dans différentes matrices	16
III.1.1. Composites à base de gypse.....	18
III.1.2. Composites à base de polymère	18
III.1.3. Composites à base de mortier.....	18
III.2. Comportement hygrothermique du béton de bois de palmier dattier (DPC)	19
III.2.1. Echelle matériau	19
III.2.2. Echelle paroi.....	22
IV. Logiciels et approches de modélisation du transfert hygrothermique des enveloppes hygroscopiques des bâtiments.....	26
IV.1. Energyplus	26
IV.2. WUFIPlus.....	28
IV.3. TRNSYS	28
IV.4. SPARK.....	29
IV.5. Matlab-Simulink	29
IV.6. Cast3M.....	30
IV.7. Logiciels de simulation thermique dynamique destinés aux bureaux d'études	31
IV.7.1. COMFIE-PLEIADES	31

IV.7.2. CoDyBa.....	31
IV.8. Autres approches.....	32
IV.8.1. Co-simulation.....	32
IV.8.2. Intégration directe du modèle hygrothermique dans un logiciel thermique dynamique	33
V. Annexe 41 de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie)	34
V.1. Simulation et tests de confrontation (Benchmarks de modélisation).....	35
V.2. Classement des modèles hygrothermiques.....	36
V.3. Validation des codes de simulation	37
VI. Conclusion.....	38

Chapitre II : Modélisation des transferts de masse et de chaleur dans les bâtiments et choix de l'outil de simulation

I. Introduction.....	43
II. Grandeurs caractéristiques d'une enveloppe hygroscopique.....	43
II.1. Composition structurelle d'un matériau hygroscopique.....	43
II.2. Humidité relative (ϕ)	44
II.3. Teneur en eau.....	45
II.3.1. Isotherme de sorption	45
II.4. Perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau	46
II.5. Coefficient de diffusion de liquide D_l	47
II.6. Conductivité thermique	48
III. Mécanismes de stockage et de transfert hygrothermique dans les milieux hygroscopiques	49
III.1. Stockage de masse.....	49
III.2. Transfert de l'humidité.....	51
III.2.1. Diffusion de la vapeur d'eau	51
III.2.2. Diffusion de l'eau liquide.....	52
III.3. Stockage de chaleur.....	52
III.4. Transfert de chaleur.....	53
IV. Modèles de transfert hygrothermique (HAMT) dans les parois des bâtiments	53
IV.1. Modèle de Kunzel	54
IV.1.1. Equation de conservation de masse	54

IV.1.2. Equation de conservation de chaleur	55
IV.2. Modèle de Philip et De Vries (Mends)	55
IV.3. Modèle de Luikov	57
V. Bilans massiques et thermiques de l’ambiance intérieure du bâtiment.....	58
V.1. Bilan thermique	58
V.2. Bilan massique	58
V.3. Interaction enveloppe –air intérieur : Conditions aux frontières.....	59
VI. Choix de logiciel de simulation	60
VI.1. Outil de simulation thermique dynamique EnergyPlus	60
VI.1.1. EP-Launch.....	60
VI.1.2. IDF Editor	61
VI.2. Méthode de discrétisation et de solution.....	62
VI.2.1. Bilans de chaleur et de masse de l’air intérieur	62
VI.2.2. Modèle hygrothermique pour les parois	63
VII. Validation du modèle HAMT pour des enveloppes hygroscopiques	64
VII.1. Validation expérimentale.....	65
VII.2. Validation analytique.....	68
VIII. Conclusion.....	71

**Chapitre III: Evaluation des performances hygrothermiques d’un bâtiment en DPC
sous différentes conditions climatique**

I. Introduction.....	75
II. Description du cas d’étude	75
III. Effet du transfert couplé de chaleur et de masse sur le comportement hygrothermique et la consommation énergétique d’un bâtiment en DPC.....	77
III.1. Bâtiment passif (non climatisé).....	78
III.1.1. Conditions hivernales	78
III.1.2. Conditions estivales.....	79
III.2. Bâtiment climatisée	80
IV. Comparaison des performances hygrothermiques du béton de bois de palmier dattier avec un matériau de construction conventionnel.....	82
IV.1. Inertie et confort thermique.....	84
IV.2. Régulation de l’humidité relative (tampon hydrique).....	87

IV.3. Consommation énergétique.....	89
IV.4. Evaluation du risque de condensation.....	91
V. Conclusion.....	94

Chapitre IV : Etude numérique paramétrique

I. Introduction.....	98
II. Etat de l'art	98
III. Cas de la référence	100
IV. Sensibilité du modèle HAMT envers la variation des propriétés hygrothermiques du DPC	101
IV.1. Conductivité thermique (λ)	101
IV.2. Capacité thermique (C_p).....	102
IV.3. Masse volumique (ρ).....	103
IV.4. Facteur de la résistance à la vapeur (μ).....	104
IV.5. Isotherme de sorption (W)	105
IV.6. Coefficient de convection thermique (h_t).....	106
IV.7. Coefficient de convections massique (h_m)	107
IV.8. Sensibilité relative de la température et de l'humidité relative	108
IV.9. Sensibilité de la consommation énergétique de la pièce.....	109
V. Etude paramétrique.....	110
V.1. Effet de la stratégie de ventilation	110
V.2. Effet des conditions initiales	112
V.3. Effet de l'épaisseur de l'enveloppe	114
V.4. Effet de la thermo-dépendance et de la dépendance à l'humidité des paramètres hygrothermiques.....	116
VI. Conclusion.....	119
Conclusion générale et perspectives.....	122

Introduction générale

Selon les statistiques récentes de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le secteur du bâtiment est le principal contributeur à la consommation énergétique et aux émissions des gaz à effet de serre. Il est responsable d'environ de 36 % de la demande totale d'énergie et de 37 % des émissions de CO₂ dans le monde [1]. La majorité de cette demande d'énergie est utilisée pour maintenir le confort hygrothermique intérieur via la climatisation de l'espace résidentiel. L'utilisation des matériaux isolants dans la construction, dont les performances (inertie thermique, tampon d'humidité, etc.) dépendent des conditions climatiques et de la saison, peuvent réduire considérablement cette consommation énergétique.

Face à cette problématique énergétique, de nouveaux matériaux à base de fibres végétales ont été développées pour le secteur du bâtiment, comme le palmier dattier [2, 3], chanvre [4], paille [5]. Ces matériaux biosourcés de construction sont également appelés matériaux hygroscopiques en raison de leur perméabilité et de leur porosité élevée. Ces caractéristiques entraînent une réduction de la valeur de la conductivité thermique et de la densité et fournissent un tampon hydrique élevé, qui permet de réguler les conditions hygrothermiques intérieures et d'économiser la consommation énergétique [4]. Les matériaux biosourcés exhibent également de nombreux avantages par rapport aux matériaux classiques ; parmi eux leur faible impact environnemental, ressources premières renouvelables, et matériaux économiquement compétitifs. Dans ce travail de thèse, on s'intéresse au béton de bois de palmier dattier (DPC) vu qu'il s'agit d'un matériau respectueux de l'environnement qui convient pour son utilisation pour le développement durable de la société.

Les recherches sur ce matériau s'inscrivent dans le cadre d'un projet global nommé « Matériaux et Thermique de l'Habitat (MTH) ». La première partie de ce projet est une étude exploratoire et elle constitue une « étude de faisabilité » destinée à confirmer le potentiel du béton de bois de palmier dattier (DPC) pour l'isolation thermique des bâtiments. Le béton de bois de palmier dattier a fait l'objet de plusieurs travaux numériques et expérimentaux à l'échelle matériau et mur. Les travaux de Benensour *et al.* [2], Haba *et al.* [6] et Chennouf *et al.* [7] ont permis de mesurer les propriétés thermo-physiques, mécaniques et hygrothermiques de ce matériau. La caractérisation à l'échelle matériau n'était pas suffisante pour définir le comportement réel de DPC. Pour cette raison, l'étude du comportement hygrothermique a été récemment étendue à l'échelle paroi par Chennouf *et al.* [8]. Cette étude concentre sur l'étude de la capacité du mur en DPC à réguler les fluctuations dynamiques d'humidité et de la température, ainsi que l'effet de couplage chaleur-humidité sur la paroi en DPC. D'autre part, la validation de deux modèles mathématiques (modèles de Kunzel et Mends) pour l'étude de DPC a été réalisée par Alioua *et*

al. [9] et complétée par une analyse de sensibilité du modèle de Kunzel [10]. Au niveau du bâtiment, et à notre connaissance, il n'existe pas d'études dans la littérature sur les performances hygrothermiques d'une enveloppe de bâtiment à base de DPC.

Dans ce contexte, cette thèse propose une étude numérique de comportement thermo-hydrigue d'un bâtiment en DPC sous des conditions climatiques réelles, avec le traitement de plusieurs aspects à l'échelle du bâtiment. Les recherches dans cette thèse se divisent en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présentons, une synthèse sur les enjeux énergétiques et environnementales dans le secteur de la construction, les recherches réalisées sur le bois de palmier dattier, ses différents composites et son comportement hygrothermique lorsqu'il est incorporé dans le béton au niveau du matériau et de mur. Dans la partie suivante, une étude bibliographique sur les logiciels et les approches de modélisation du transfert hygrothermique des enveloppes hygroscopiques des bâtiments sera présentée.

Le deuxième chapitre porte sur la présentation des paramètres et des modèles de transfert hygrothermique à l'échelle du bâtiment suivie par la méthode de discrétisation des équations hygrothermiques. Par la suite, la validation du modèle présenté sera réalisée en utilisant des résultats expérimentaux et analytiques, dans le but de vérifier sa précision.

Le troisième chapitre porte sur une évaluation du comportement hygrothermique d'un local conçu en DPC. Dans un premier temps, le modèle hygrothermique sera utilisé pour étudier l'influence du transfert massique sur l'humidité de l'air ambiant, la température et les besoins énergétiques d'une pièce en DPC en périodes d'hiver et d'été. Par la suite, le bâtiment en DPC sera comparé à un bâtiment réalisé avec un matériau conventionnel (béton cellulaire autoclavé ; AAC) sous différentes conditions climatiques en Algérie. Cette comparaison sera effectuée en termes d'inertie thermique et du confort, de régulation hydrique, d'économie d'énergie et de risque de condensation superficiel.

Le quatrième chapitre présente une étude numérique paramétrique réalisée avec le modèle HAMT de logiciel EnergyPlus. Les simulations effectuées portent sur une étude de sensibilité du modèle utilisé vis-à-vis les propriétés hygrothermiques du matériau hygroscopique. De plus, l'effet de différents paramètres de simulations sur le comportement thermo-hydrigue des parois hygroscopiques sera étudié. Ce chapitre simule, donc, les trois aspects des conditions intérieures : la température, l'humidité relative intérieure et la consommation d'énergie de la pièce pour de fournir une analyse théorique et des conseils techniques pour la recherche, l'ingénierie et la fabrication.

References

- [1] U. N. E. Programme, "2021 Global Status Report For Buildings And Construction," 2021, Available: <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>
- [2] 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.
- [3] S. Bamaga, "A Review on the Utilization of Date Palm Fibers as Inclusion in Concrete and Mortar," *Fibers*, vol. 10, no. 4, p. 35, 2022.
- [4] M. C. Tran Le A D, Mai T H , Wurtz E, Collet F, "Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope," *Energy and Building*, vol. 42, pp. 1797-1806, 2010.
- [5] R. Gallegos-Ortega, T. Magaña-Guzmán, J. A. Reyes-López, and M. S. Romero-Hernández, "Thermal behavior of a straw bale building from data obtained in situ. A case in Northwestern México," *Building and Environment*, vol. 124, pp. 336-341, 2017.
- [6] 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.
- [7] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 348-356, 2018.
- [8] N. Chennouf, B. Agoudjil, T. Alioua, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Experimental investigation on hygrothermal performance of a bio-based wall made of cement mortar filled with date palm fibers," *Energy and buildings*, vol. 202, p. 109413, 2019.
- [9] T. Alioua, B. Agoudjil, N. Chennouf, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect," *Building and Environment*, vol. 163, p. 106333, 2019.
- [10] T. Alioua, B. Agoudjil, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Sensitivity analysis of transient heat and moisture transfer in a bio-based date palm concrete wall," *Building and Environment*, p. 108019, 2021.

Chapitre I :

Etat de l'art

I. Introduction

Dans ce chapitre et après une présentation des enjeux environnementaux dans le secteur résidentiel, nous mettons en exergue la nécessité de l'utilisation des matériaux de construction à base végétale, en particulier, le béton à base des fibres de palmier dattier (DPC) afin d'assurer un confort hygrothermique et de diminuer la consommation et la perte énergétique à travers l'enveloppe de l'habitat. Nous présentons par ailleurs, une synthèse des recherches réalisées sur le bois de palmier dattier, ses différents composites et son comportement hygrothermique lorsqu'il est incorporé dans le béton à l'échelle du matériau et de mur. Enfin, étude bibliographique sur les logiciels et les approches de modélisation du transfert hygrothermique des enveloppes hygroscopiques des bâtiments sera présenté.

II. Contexte de l'étude

II.1. Principaux enjeux dans le secteur de la construction en Algérie

Face à la problématique climatique, énergétique et environnementale, tous les secteurs doivent se mettre en action pour répondre le plus activement possible à ces contraintes qui sont en même temps de formidables opportunités. Evidemment, les secteurs les plus concernés sont ceux qui dépendent le plus de l'énergie ou qui génèrent le plus d'impacts environnementaux, ce qui est particulièrement le cas du secteur du bâtiment.

Les dernières études, notamment celle de l'APRUE (Agence de la Promotion et de Rationalisation de l'utilisation de l'énergie), ont montré que le secteur résidentiel en Algérie consomment presque 40% de l'énergie total [1] (figure I.1). Ces données montrent que le secteur du bâtiment constitue un élément important pour réduire la consommation d'énergie et de limiter les impacts climatiques sans compromettre les exigences de confort, et de la qualité de l'air interne. Il s'agit d'un critère de construction important qui a conséquences significatives sur la santé.

Afin d'identifier les démarches nécessaires à mener pour diminuer la consommation d'énergie dans les locaux, il est primordial de poser cette question : comment les foyers utilisent-ils l'énergie ? pour répondre à cette interrogation, L'APRUE a donné les chiffres de la consommation énergétique en KWh /an des équipements couramment utilisés par les habitants (figure I.2) [1]. On remarque que les besoins électriques pour la climatisation sont les plus importants, ils représentent 43.18 % de la consommation totale l'énergie utilisé.

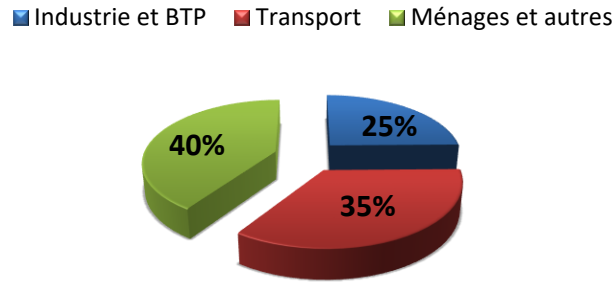


Figure I.1. Classification de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité, source Ministère des Energies et des Mines.

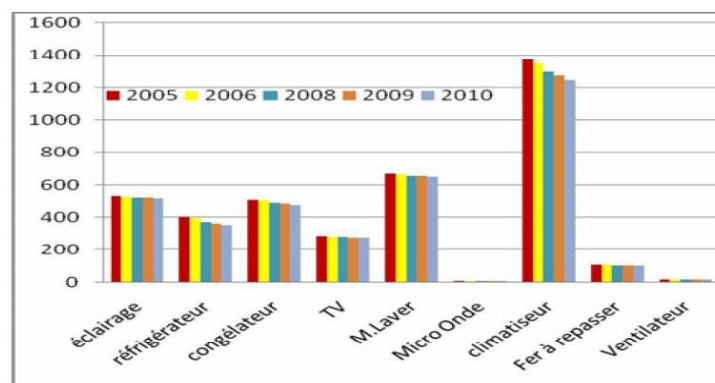


Figure I.2. Consommation énergétique annuelle en KWh des équipements ménagés [1].

De plus, 60 % à 80 % des besoins énergétique pour la climatisation des bâtiments se perd principalement par les toits, les murs et les planchers (figure I.3). Une meilleure isolation du bâtiment se traduira par des habitats à faible consommation d'énergie. Selon les experts, construire un bâtiment bien isolé ne coûte que 10 à 15 % de plus, mais permet d'économiser 40 % de consommation d'énergie [2]. Le principal enjeu est donc la diminution des consommations énergétiques, les productions de CO₂ et le réchauffement climatique qui se traduit par plusieurs cibles HQE (Haute qualité environnementale) tel que la réduction de la consommation d'énergie par certains démarches [3] :

- Le choix des matériaux utilisé (matériaux à faible impact environnemental)
- L'optimisation de la conception énergétique du bâtiment (élimination des ponts thermiques, isolation thermique de l'habitat, protection passive solaire, ventilation naturelle...)
- L'optimisation des équipements de chauffage et de climatisation (chaudière à haut rendement, emplacement judicieux de la chaufferie dans les bâtiments...) et le bon choix de la source d'énergie (bois, solaire, ...).

En outre, les performances énergétique et l'influence des bâtiments sur l'environnement dépendent du choix des matériaux de construction. D'où, la transition vers des matériaux intégrant des fibres végétales (biosourcés) assurent de nombreux avantages (isolation hygrothermique, acoustique...). Dans ce contexte, le développement et la valorisation de nouveaux matériaux à faible impact environnemental peut être un bon compromis entre l'efficacité énergétique de l'immeuble et la diminution des émissions carboniques.



Figure I.3. Réparation des pertes thermiques dans un bâtiment non isolé [4].

II.2. Matériaux biosourcés : une meilleure solution pour le développement durable

Afin de remédier la problématique environnementale énergétique dans le domaine de la construction, l'utilisation de matériaux appropriés constitue une solution innovante afin de minimiser l'impact environnemental et de garantir un confort hygrothermique et une excellente qualité de l'air intérieur. Le choix des matériaux appropriés est basé sur plusieurs critères : énergie grise (coté énergétique et budgétaire), le design et l'impact sur l'environnement. Tous ces facteurs sont considérés lors de l'analyse de cycle de vie d'un produit qui tient en considération toute la procédure depuis l'extraction de la matière première jusqu'à son utilisation (figure I.4). Il s'agit d'avoir une idée complète en privilégiant les ressources locales. Pour cela, les matériaux « biosourcés » (bois, chanvre, lin, paille...) constituent une solution faisable à la réduction de l'empreinte climatique du secteur résidentiel en raison de leur qualité renouvelable [5].

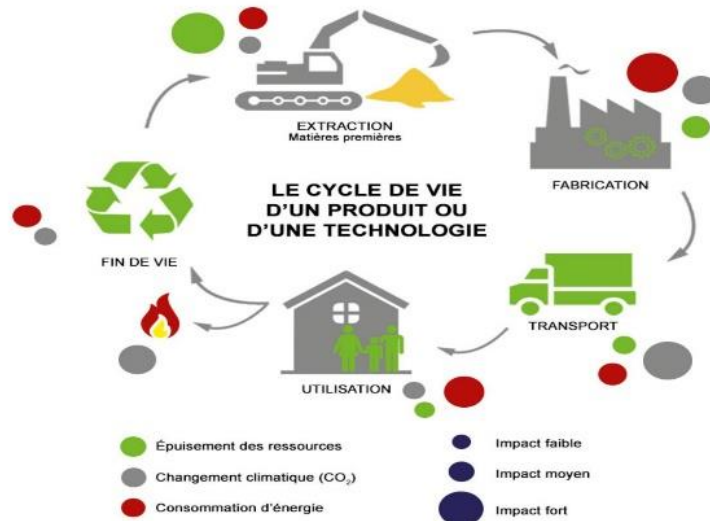


Figure I.4. Cycle de vie d'un matériau ou d'une technologie [6]

L'emploi des matériaux biosourcés a de nombreux avantages comme [7]:

- Des ressources disponibles et renouvelables : Les plantes se reproduisent selon la saison donc ils fournissent une ressource abondante contrairement aux ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) qui s'épuisent dans quelques années. Par conséquent, l'emploi matériaux biosourcés préviennent les problèmes d'épuisement des ressources premières.
- Faible énergie grise : qui désigne la somme des énergies utiles à la fabrication, aux livraisons, à l'emploi et enfin à la destruction du matériau ou à son élimination à la fin de son cycle de vie.
- Diminution des gaz à effet de serre.

Selon la littérature, l'énergie grise du béton de chanvre, qui représente l'énergie nécessaire pour extraire, produire, conditionner et transporter, est de 90 kWh.m^{-3} , alors que le béton cellulaire utilise 400 kWh.m^{-3} [8]. Par ailleurs, le potentiel de réchauffement global d'un mur en ballots de paille est négatif puisque la paille absorbe du CO_2 tout au long de sa vie, alors que le potentiel de réchauffement global d'un mur en briques et polystyrène est extrêmement élevé ($435.02 \text{ kg CO}_2.\text{m}^{-2}$) [9]. De même, les murs en briques remplies de styromousse produisent environ 7.5 fois plus d'énergie que les murs en balles de paille.

II.2.1. Matériaux biosourcés les plus connus

Béton à base de chanvre

Le béton à base de la plante de chanvre est parmi les matériaux à innovants qui occupe une place fondamentale surtout en France à cause de ses avantages importants : disponibilité, bilans énergétique et écologique très favorables. L'utilisation du chanvre est considérée comme un atout sur plusieurs plans [10]:

1. Un atout écologique : c'est une plante qui est non seulement renouvelable et recyclable, mais possède un système racinaire permettant de structurer le sol. En plus, le CO₂ absorbé par 1 hectare de chanvre est plus important qu'un hectare de forêt. Aussi, un mur de 1 m² construit en béton de chanvre stocke 48 kg d'équivalent CO₂ sur 100 ans.
2. Un atout agronomique comme le chanvre supporte la sécheresse et ne nécessite pas des travaux de culture et d'irrigation.
3. Un atout économique étant donné que les producteurs sont à proximité des industries de transformation ce qui réduit les prix de transportation et de fabrication.

En 2003, la France était la première en Europe avec 61% de la production totale de chanvre (8000 à 10 000 hectares de chanvre chaque année). Cette autorité résulte d'une grande tradition d'agriculture chanvrière dans la France. Jusqu'à maintenant, plusieurs composites à base de chanvre ont été étudiés pour différents utilisation. Un mur en béton de chanvre (figure I.5) est généralement réalisé en incorporant de la chènevotte dans un liant minéral de chaux et de l'eau de mélange. Le rapport massique des composants pour une construction d'une paroi est souvent proche de 1/3 de chènevotte et de 2/3 de chaux [11].



Figure I.5. *Béton de chanvre* [11].

Le béton à base de chanvre constitue le sujet de plusieurs recherches sur les plans numérique et expérimental multi échelle (matériau [12, 13], mur [11, 14] et bâtiment [7, 8, 10]) qui portent sur la caractérisation multi-disciplinaire de ce matériau : mécanique [15], thermique et

hydrique [13] et acoustique [16]. Dans le tableau I.1 un sommaire des valeurs des propriétés ordinaires du béton de chanvre qui montrent son attitude hygrothermique, mécanique et acoustique pour ses différents usages est présenté. Les usagers du béton de chanvre ont observé qu'une sensation de confort hygrothermique acceptable à des conditions environnantes extrêmes, ce qui emporte une réduction importante de la consommation énergétique. De plus, les études sur le béton de chanvre ont montré sa capacité de importante à la régulation hydrique ([17], [18], [19]). La capacité hydrique des matériaux biosourcés serait une solution importante pour assurer le confort comme ils aident à l'amélioration des condition hydriques intérieurs sans consommer autant d'énergie.

Tableau I.1 :Propriétés du béton de chanvre [11].

	Valeurs	Résultat comportemental
Densité	200 à 700 kg.m ⁻³	-
Porosité	0.5 à 0.85	-
Résistance mécanique	0.25 à 1 MPa	Faible
Conductivité thermique	0.1 à 0.3 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Isolant thermique
Perméabilité	10 ⁻¹¹ à 10 ⁻¹⁰ kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹	Fort échange de l'humidité
Facteur d'absorption acoustique	0.5 à 0.9	Isolant acoustique

Construction en paille

La construction en paille satisfait les exigences environnementales actuel : tout en assurant une isolation thermique et une sensation du confort, elle contribue sûrement au bien-être des habitants qui existent au sein de l'enveloppe. La paille est une substance saine qui ne disperse aucune substance qui cause des allergies ou du cancer. Sa production est régionale et n'implique que peu d'investissement et d'énergie [20]. La paille emmagasine le CO₂ plus qu'il libère. Le CO₂ dégagé lors de son cycle de vie est équivalent voir plus petit que celui absorbé par la photosynthèse. En comparaison, la production de bois pour le secteur du bâtiment consomme entre deux à dix fois plus d'énergie que la fabrication de bottes de paille [21].

Afin de définir le comportement de la paille, plusieurs travaux expérimentales (figure I.6) et numériques à plusieurs échelles ont été réalisés. Les résultats montrent que la construction en paille possède des performances très importantes, en particulier pour l'isolation de l'habitat, la diminution de la demande d'énergie et aussi pour la qualité de l'air intérieur perçue par les occupants [22, 23].



Figure I.6. *Bâtiment construite en paille [22].*

Bois de palmier dattier

A. Généralités sur les palmiers dattier

Les palmiers dattiers appelé "*date palm*" en anglais, "*Nakhla*" en arabe (figure I.7), sont localisés surtout dans l'hémisphère Nord particulièrement en Afrique du Nord, en Asie, en Amérique en particulier en Californie (La vallée du Coachella), ainsi qu'en Espagne, avec la fameuse oasis d'Elche. Le palmier dattier se trouve aussi au Mexique, en Argentine, et en Australie mais à plus faibles quantités [24].

Selon les dernières statistiques du Ministère de l'Agriculture en Algérie, une surface évaluée à 167.000 hectares est occupée par les palmiers dattiers. La culture du palmier dattier couvre une partie importante des zones situées sous l'Atlas saharien [25].



Figure I.7. Forêt de Palmier dattier[26].

La palme, "*Djérida*" en Arabe ou "*Palm*" en Anglais (figure I.8) est une feuille pennée remplie des folioles organisées sur la partie supérieure du rachis en position oblique. Les parties inférieures sont changé en coutres épines, plus ou moins nombreuses. Selon la méthode de culture, un seul palmier peut produire 20 palmes par an et contient de 0 et 150 palmes au total, arrangés en spirale avec longueur qui peut atteint 450 mm. Les palmes demeurent et restent vertes jusqu'à 7 ans avant qu'elles soient sèches et inclinées puis elles seraient retirées par taillage [27]. La foliole est la seule tranche essentiel de la palme sèche, tandis que les autres parties sont jetée comme déchet de culture sans aucun avantage [26].

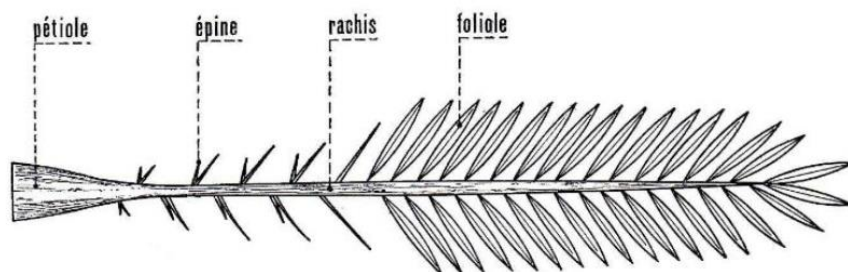


Figure I.8. Représentation schématique d'une palme [28].

B. Propriétés du bois de palmier dattier

Le bois de palmier dattier fait objet de nombreux travaux antérieurs dans l'objectif de définir son comportement thermo-physiques [29], mécaniques et chimiques [30, 31] et hydro-philiques [32]. Les images MEB (Image par microscopie électronique à balayage) de bois de palmier dattier montrent une structure poreuse qui constitue des vaisseaux perméables au liquides comme l'eau. Ce sont des tubes étendus, dont la surface interne possède des épaissements

qui provoquent la création des disques ou des rainures de différents ordres. Ces tubes sont prétendus être responsables de la capacité hydrophile des fibres végétales [29].

L'étude des propriétés chimiques de bois de palmier dattier montre que ces dernier possèdent des rapport massique de 18% d'hémicelluloses, 20% de lignine et de 46% de cellulose, ce qui donne une signe de la résistance importante de la fibre, en raison de quantité importante de cellulose par rapport à celle des fibres usuelles [30, 31].

En ce qui concerne l'attitude mécanique du bois de palmier dattier, les auteurs de la référence [26] montrent que les valeurs caractéristiques de la résistance à la traction de bois de palmier dattier se varient de 116 à 208 MPa, et les valeurs de module de Young se varient de 5 à 12 GPa. En plus, l'allongement à la rupture se varient de 5 à 10%. Ces résultats montrent que le bois de palmier dattier possède des faibles propriétés mécaniques en comparaison avec d'autres fibres naturelles, ce qui peuvent être interprétée par son grand diamètre qui se varient entre 100 et 1000 μm [30].

Dans un autre part , l'étude du comportement thermo-physiques des fibres bois de palmier dattier a été réalisée par Agoudjil *et al.*[29] a l'aide des échantillons parallélépipédiques. Les résultats de cette ont montrés que : leur conductivité thermique se situe dans l'intervalle de plusieurs matériaux naturels isolant ($0.083 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$). En outre, la densité du pétiole est un peu élevée à celle de liège et du chanvre (276 kg.m^{-3}).

La comparaison du comportement hydrophile de bois de palmier dattier à d'autres matériaux ordinaires a été également effectué [32]. Les résultats montrent une capacité d'absorption d'eau importante des fibres de bois de palmier dattier. La majorité de ces fibres ont la capacité d'absorber une quantité d'eau supérieure à leur masse à l'état sec. Cette capacité d'absorption d'eau des fibres de palmier dattier est plus grande que celle de fibres de chanvre et presque similaire à celle du sisal. Ce qui peut être due à la taille des fibres et au titres massique en cellulose.

II.3. Comportement hygrothermique des matériaux hygroscopiques biosourcés

L'humidité relative et la température intérieur de l'air des bâtiments sont les deux paramètres utilisés généralement pour parler de l'hygrothermie. C'est devenu une mesure essentielle dans l'habitat où l'on cherche un confort thermique optimale pour le bien être des occupants et la durabilité de l'enveloppe. C'est-à-dire, le comportement hygrothermique d'un matériau de

construction dessine son comportement dans une ambiance dans lequel l'humidité et la température varient d'une façon dynamique [33].

Pour définir l'attitude thermo-hydrigue d'une matière, il est primordiale de caractériser les changement des propriétés hygrothermique de cette matières qui se produisent en raison de stockage et du transport simultané de masse et de la chaleur (avec l'air environnant) à travers le matériau [34], [35]. Au sein des parois du bâtiment, l'attitude thermo-hydrigue d'un matériau est dû à sa perméabilité et à sa porosité. Par conséquent, les parois des locaux doivent posséder des propriétés thermo-hydrigue qui lui permettront de répondre d'une manière appropriée aux sollicitations climatiques distinctes : **C'est la particularité des matériaux biosourcés de construction.**

II.3.1. Effets de l'humidité sur le bien-être des habitants et sur les besoins énergétiques du bâtiment

Le degré de l'humidité intérieur est la conséquence de l'équilibre hydrigue entre le matériau et l'air intérieur. De nombreux facteurs comme les sources hydrigue (habitants, plantes), infiltration de l'air, l'humidité passant par les parois du bâtiment et les systèmes HVAC influence l'humidité relative intérieur. La norme 55-2004 a recommandé un intervalle de confort d'humidité relative qui varie entre 30 et 60 % pour une température allant de 20 à 26 °C [36]. Il a été trouvé dans la littérature que le niveau d'humidité, si il est important, influe sur le confort hygrothermique et respiratoire ressentie par les occupants [37] l'hydratation de la peau [38] et la qualité de l'air intérieure perçue [39]. De plus, l'humidité peut affectée les taux de chauffage et de climatisation sensibles et latentes et peut causer des dommages dans les bâtiments [40]. L'humidité relative excessive provoque la formation des moisissures sur la surface intérieure de l'enveloppe [41]. Selon Sedlbauer [42], les risques de croissance de moisissures augmente énormément lorsque l'humidité relative dans le bâtiment va au-dessus de 80%. D'autre part, des petites valeurs d'humidité relative peuvent causer la déshydratation de la peau et la brulure des yeux. Les tests cliniques et en pièce climatique montrent que 40% d'humidité relative est préférable pour les yeux et les organes respiratoires [43].

En outre, on peut travailler sur l'humidité pour réduire la consommation d'énergie en utilisant les matériaux biosourcée. Les résultats de la littérature montrent que ces matériaux permet de réduire la variation de l'humidité relative jusqu'à 40% [44, 45] donc assurer une bonne qualité de l'air intérieur des bâtiments tout en réduisant la consommation énergétique du bâtiment.

Ce tampon ou cet « effet régulateur » hydrique des matériaux poreux constitue l'objet de plusieurs recherches de la littérature. Simonson *et al.*[46] ont montré qu'il est faisable de diminuer les charges de chauffage et de refroidissement de 5% à 30%, respectivement, en employant des matériaux plus poreux. Les économies d'énergie les plus importantes se réalisent pour les milieux chauds et humides (figure I.9).

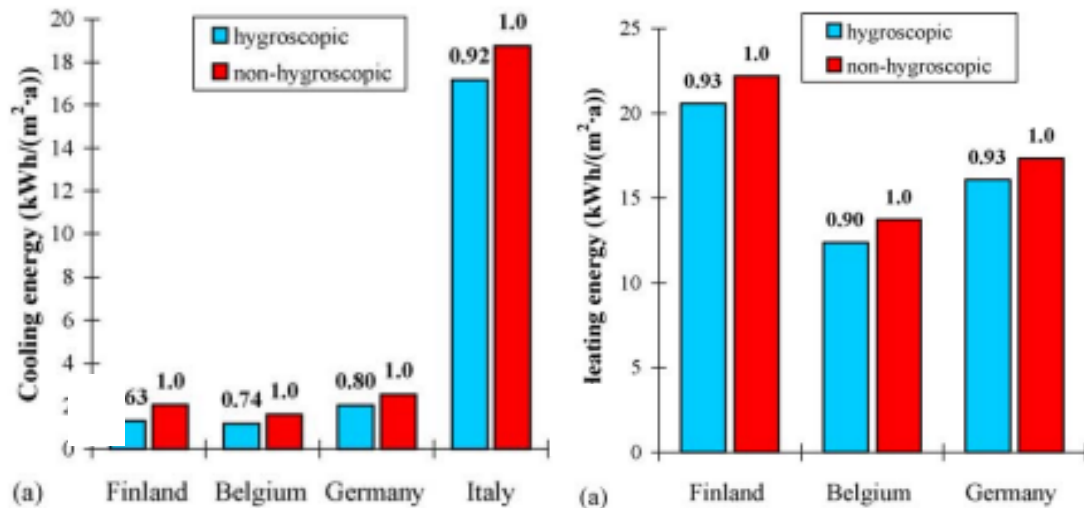


Figure I.9. Energie de refroidissement et de chauffage nécessaire pour climatiser une chambre (24 °C et 50% d'HR) pour un enveloppe hygroscopique et un autre non hygroscopique [46].

II.3.2. Rôle de l'enveloppe hygroscopique à base des matériaux biosourcés

L'enveloppe du bâtiment doit satisfaire des caractères thermo-hydriques qui lui permette de répondre de façon appropriée aux conditions climatiques. Ces conditions changent régulièrement en intensité et en durée qui entraînent des gradients thermique et hydrique. L'enveloppe poreuse fonctionne à cause d'une différence de pression partielle entre l'intérieur et l'extérieur qui permet la migration de la vapeur d'eau à travers les parois, de l'air exhibant la pression élevée à l'air dont la pression est basse avec lesquels elle échange simultanément de la chaleur. Les matériaux biosourcés comme le bois, le chanvre, la paille, possèdent des propriétés hygrothermiques immédiatement reconnues. Ils leur permettent d'absorber sans dommage les excès de l'humidité et de les libérer selon les conditions ambiantes (figure I.10). L'enjeu est donc de développer est de disposer des outils de recherche pour la prédiction des phénomènes complexes.

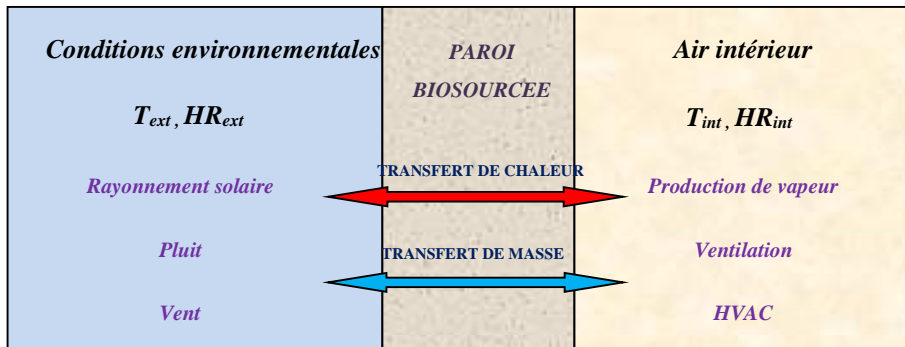


Figure I.10. Transfert hygrothermique couplé à travers la paroi hygroscopique.

III. Synthèse des recherches effectuées sur différents composites à base de bois de palmier dattier

III.1. Intégration des fibres de bois de palmier dattier dans différentes matrices

Le bois de palmier dattier constitue l'objet de plusieurs recherches multidisciplinaires [1, 29, 47-53] qui portent sur l'étude de sa faisabilité avec différentes matrices. Dans le but d'élaborer des nouveaux matériaux composites qui remplacent les matériaux ordinaires. Le bois de palmier dattier a été intégré dans des matrices à base de polymère [49], gypse [47] et de ciment [48]. La préparation des composites passe par différents processus comme montré dans la figure I.11:

1. Préparation des fibres

Pour préparer les fibres du bois de palmier dattier, on procède comme suit :

- Prélèvement des déchets de palmier dattier
- Broyage mécanique de bois par deux étapes : le concassage pour avoir des fibres de tailles de l'ordre de 1 cm et le broyage grossier pour avoir des fibres de tailles inférieures à 1 mm.
- Analyse granulométrique : dans cette étape le classement des fibres selon leurs tailles en deux catégories : (i) fibres fines de diamètre de l'ordre de 3 mm et de longueur comprise entre 2.5 et 3.2 mm, (ii) fibres grosses avec une longueur comprise entre 3.2 et 16 mm de diamètre moyen de 6 mm.



Figure I.11. Etapes de préparation de différents composites à base des fibres de palmier dattier.

1. Production des composites

Les différents composites (liant-fibres) ont été préparés au laboratoire selon les méthodes suivantes :

1. Composite gypse-fibres : (i) on mélange à l'aide d'un malaxeur automatique le gypse et de l'eau avec un titre massique eau/gypse égale à 0.6 qui permet de produire une bonne pâte à travailler, (ii) on introduit les fibres dans la pâte et on mélange le tous pendant 5 minutes, (iii) on verse rapidement la pâte dans les moules.
2. Composite polymère -fibres : ce composite a été préparé selon la méthode montré dans la figure I.12 :

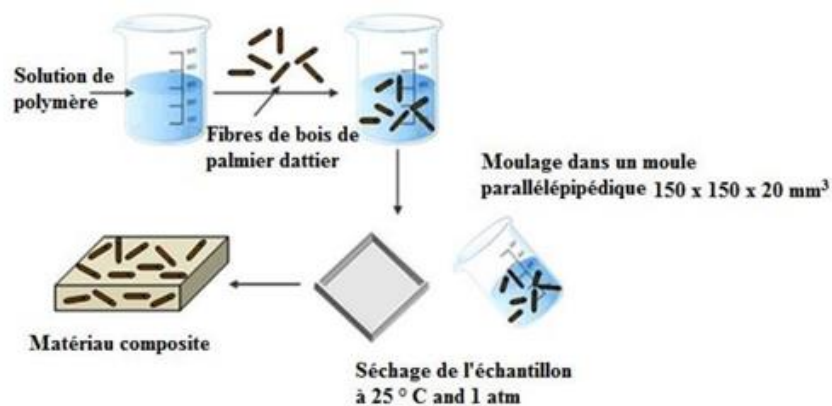


Figure I.12. Méthode de préparation du composite rempli de fibres de palmier dattier [49].

3. Composite ciment-fibres : ce composite a été préparé en incorporant les fibres dans une pâte du ciment et de sable. Puis, en mélangeant le tout pendant 3 minutes jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et malléable. Finalement, le versement rapide de mélange dans les moules.

III.1.1. Composites à base du gypse

L'étude des propriétés mécaniques et thermo-physiques de deux composites (FBDD₃ et FBPD₆) de bois de palmier dattier à base de gypse font l'objet du travaux de Chikhi *et al.*[47]. L'étude des propriétés mécaniques montre que l'augmentation de la concentration des fibres permet de diminuer la résistance à la flexion et à la compression des composites à base de gypse diminue avec. Les résultats de cette étude montrent aussi que les composites chargés avec des fibres fines possèdent une résistance à la flexion et à la compression aussi importante que les composites chargés avec des fibres grossières. Les résultats de l'étude des propriétés thermo-physiques de ce composite ont révélés que l'augmentation de la concentration des fibres entraîne une diminution importante de la conductivité thermique et de la densité contrairement à l'effet de la taille des fibres qui n'affecte pas significativement les propriétés thermo-physiques.

III.1.2. Composites à base de polymère

Ce composite a été préparé à l'aide de la colle de résine vinylique comme polymère, renforcée de FBPD. L'étude de ce matériau a fait l'objet des travaux de Haddadi *et al.*[49] qui a étudié sa conductivité thermique et son pouvoir d'absorption d'eau. Les auteurs ont révélé que l'augmentation de la charge des FBPD dans la matrice polymère permet de diminuer la conductivité thermique ainsi que d'augmenter l'aptitude d'absorption d'eau de ce composite.

III.1.3. Composites à base de mortier

L'objectif de l'étude de ce composite était d'étudier la faisabilité d'utiliser ce matériau comme étant matériau d'isolation thermique et de régulation hydrique dans la construction des bâtiments. L'évaluation des propriétés mécaniques et thermo-physiques de ce composite était l'objet des travaux de thèse de Benmansour *et al.* [48].

L'étude thermo-physique montre que l'ajout des FBPD dans le béton entraîne une diminution de la masse volumique. De plus, les résultats montrent que l'augmentation de pourcentage des FBPD dans le mortier réduit sa conductivité thermique. Par ailleurs, l'effet de la charge des

FBPD sur les propriétés thermiques est plus important que l'effet de leur taille. Les résultats de l'étude mécanique relèvent que l'augmentation de la teneur en fibres dans le mortier entraîne une diminution de la résistance à la compression.

Les auteurs de ce travail ont conclu que la concentration idéale des FBPD se varie entre 5-15%. Pour ces charges et selon la classification RILEM [54], la résistance mécanique et la conductivité thermique des matériaux mortier-fibres sont acceptables pour l'utilisation dans le secteur de la construction surtout pour l'isolation thermique des logements.

III.2. Comportement hygrothermique du béton de bois de palmier dattier (DPC)

Selon la littérature les études du comportement hygrothermique (ou thermo-hydrique) des matériaux de construction hygroscopiques se divise en trois échelles : échelle matériau, paroi ou composant ou système et l'échelle du bâtiment.

A l'échelle du matériau, la caractérisation ou la mesure des propriétés intrinsèques des échantillons (P , λ , $W(\text{hr})$, μ , MBV , etc.) s'effectue dans le but d'optimiser de son utilisation. A l'échelle de la paroi (mur, toits, plancher etc.), ce comportement est évalué par la mesure ou la simulation des variations de la température et de l'humidité au niveau des surfaces et à l'intérieur du mur pendant la variation dynamique des conditions climatique. Finalement, à l'échelle bâtiment, on travaille sur l'évaluation du confort et de la qualité de l'air intérieur ainsi que consommation d'énergie. Les recherches au niveau de cette échelle et à l'échelle mur sont exécutées à partir des modèles numériques réalisé à l'échelle matériau.

L'étude du comportement hygrothermique du béton renforcé avec 15% des FBPD ou le DPC (date palm concrete) a fait l'objet de nombreux études relativement récentes sur le plan expérimental est numérique et sur deux échelles : matériau et paroi [1, 26, 48, 50-52, 55].

III.2.1. Echelle matériau

La caractérisation hygrothermique du DPC a été initiée par les travaux de Haba *et al.*[1] et Benmansour *et al.*[48]. Dans un premier temps une partie importante des propriétés hygrothermiques du DPC ont été mesurées. Les résultats de la caractérisation montrent que la formulation du DPC avec 15% de FBPD pouvait être considéré comme un matériau de construction léger. La conductivité thermique λ dépend à la fois de sa formulation, de sa température et de sa teneur en eau. λ varie de 0.14 à l'état sec à 0.24 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) à l'état humide.

De plus, les résultats montrent que le DPC est fortement hygroscopique, où l'absorption d'eau est beaucoup plus élevée que dans le cas des matériaux de construction classiques. Ce matériau possède aussi une faible densité et une grande porosité, ce qui conduit à une excellente propriété hydrique et bon pouvoir isolant. Les propriétés hygrothermiques à l'échelle du matériau sont récapitulées dans le tableau I.2.

Par ailleurs, Chennouf et *al.*[56] ont montré que le DPC possède une capacité hydrique importante et ils ont mis en exergue son caractère hystérétique. Le comportement complexe du DPC est liée à sa structure hygroscopique. Ce comportement s'explique par l'effet « bouteille d'encre », le DPC n'absorbe pas l'eau de la même façon qu'il la restitue. L'isotherme de sorption du DPC à 23° (figure I.13), représente le changement de la teneur en eau en fonction de l'humidité de l'air environnant, il présente deux branches :

- Courbe d'adsorption obtenue à humidité progressive en commençant d'un état sec a un état de saturation.
- Courbe de désorption non confondue, obtenue à humidité décroissante à commençant d'un état de saturation a un état sec.

Tableau I.2 : Résultats de caractérisation du DPC à l'échelle matériau.

Propriété	Valeur	Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m ³)[1]	954	Chaleur spécifique (j/kg.k)[48]	1500
Conductivité thermique sec (W/m.k)[1]	0.185	Coefficient supplémentaire d'humidité de la conductivité thermique [1]	10.19
Masse volumique du solide (kg/m ³)[1]	2619	Poroqité totale vol %[1]	64
Porosité ouverte vol %[1]	58	Diffusivité hydrique 10 ⁻⁹ m ² s ⁻¹	2.6
		[1]	
Coefficient d'absorption d'eau (kg/m ² s ^{0.5})[1]	0.165	Teneur en eau de saturation libre (kg/m ³)[1]	429

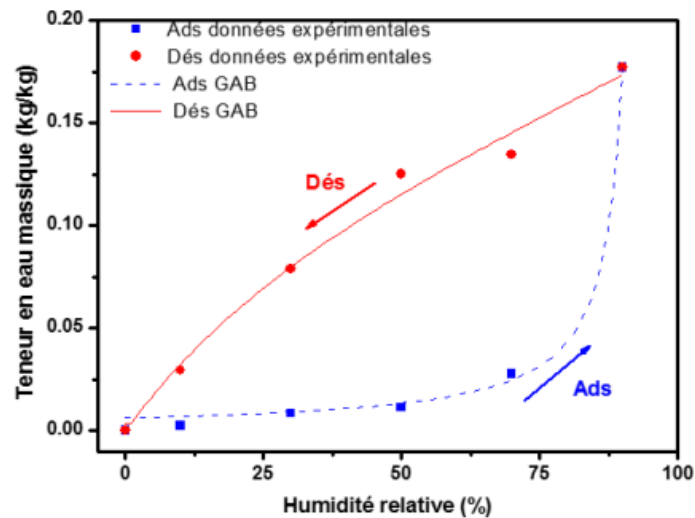


Figure I.13. Isotherme de sorption de DPC [50].

Dans une seconde étape des travaux de Chennouf *et al.*[50], des sollicitations dynamiques ont été appliquées sur un échantillon de DPC pour étudier la capacité du DPC à modérer l'effet des variations de l'humidité externe. A partir de la figure I.14 on peut constater que la valeur de la MBV (moisture buffer value) la plus élevée a été atteinte pour le composite du DPC (2.97 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$) suivi des autres matériaux biosourcés issus de la littérature, alors que les matériaux de construction conventionnelles tels que le béton et la brique présentent la MBV la plus basse. Ainsi, les auteurs ont conclu que le DPC est classé comme excellent régulateur d'humidité selon la classification Nordtest.

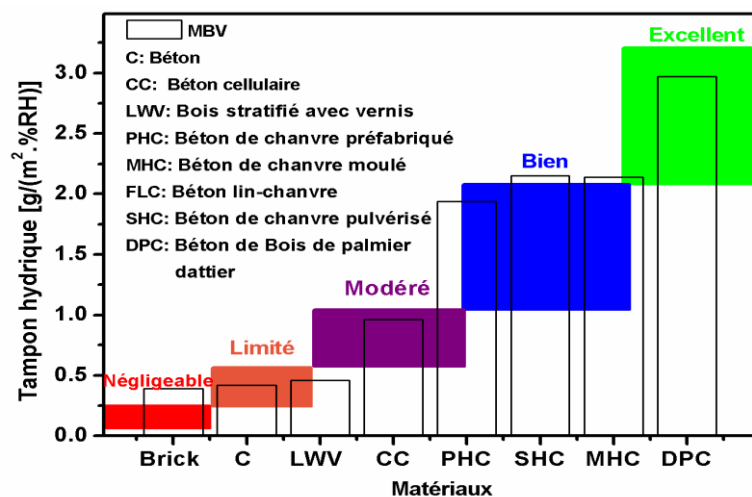


Figure I.14. Tampon hydrique (MBV) du DPC en comparaison avec des matériaux de construction usuelle [50].

III.2.2. Echelle paroi

La caractérisation des grandeurs hygrothermiques des matériaux de construction définies dans les normes donne des informations sur leur comportement et leurs performances dans des conditions d'équilibre et ne fournisse que des informations partielles du comportement d'un matériau. Cependant, en réalité les conditions hygrothermiques aux limites sont dynamiques. Cela peut influencer le comportement hygrothermique du béton de bois de palmier dans ces conditions. Par conséquent, son comportement hygrothermique hystérétique doit être étudié sous des conditions réelles à l'échelle de la paroi et du bâtiment.

A l'échelle mur, le comportement hygrothermique du DPC a été traité par deux approches : expérimentale [52] et numérique [26, 51, 55]. D'une part, des travaux expérimentaux ont été effectués par Chennouf *et al.*[52], dans le but d'étudier la capacité de DPC à modérer les variations dynamiques de l'humidité et de la température ainsi que l'effet du couplage chaleur/humidité. Pour cela, un dispositif expérimental a été utilisé. Ce dispositif est constitué d'une cellule climatique contrôlée en température et en humidité dans laquelle est placé une cellule test construit avec un mur en DPC. Les évolutions de la température et de l'humidité sont mesurées à trois profondeurs différentes de mur et à l'air intérieur comme montré dans la figure I.15. Plusieurs tests avec des scénarios dynamiques et statiques ont été effectués pour étudier le comportement hygrothermique de la paroi en DPC. L'étude a particulièrement permis de mettre en exergue la capacité du mur en DPC à modérer les évolutions de l'humidité relative extérieure. De plus, le mur en DPC peut également contribuer à atténuer et à amortir les variations de température extérieure, notamment en été, pour éviter la surchauffe de l'habitat ce qui le rend idéal pour l'isolation et la régulation des conditions hygrothermique à l'intérieur des bâtiments.

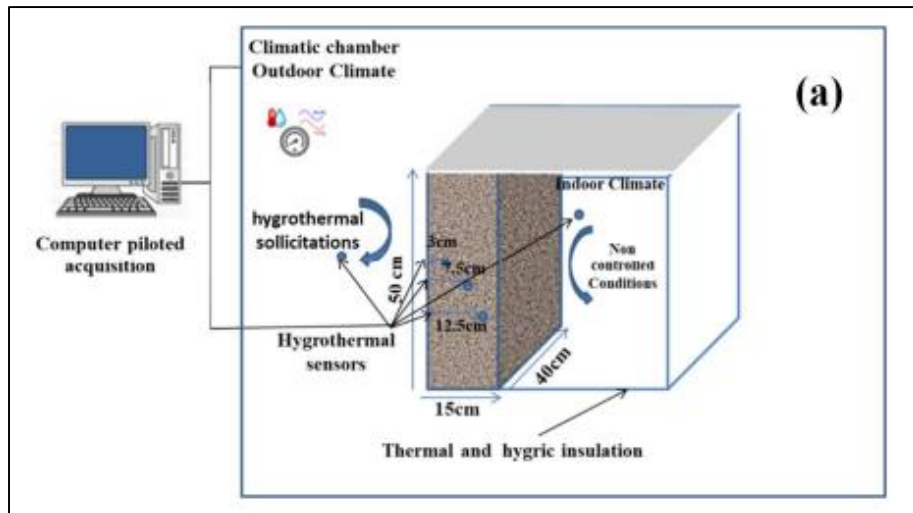


Figure I.15. Procédé expérimental utilisé pour l'évaluation de la paroi en DPC [52].

En outre, la simulation numérique du comportement hygrothermique d'un mur en DPC fait partie des travaux de thèse de Haba [26]. Le logiciel Wufi a été utilisé dans les simulations sous des conditions météorologiques réelles de la région de Batna (Nord-est d'Algérie). Les résultats ont montré que ce biomatériau montrait une inertie thermique importante en été (figure I.16). Les résultats de déphasage et de taux d'amortissement de mur en DPC ont été appréciés à 6 heures et 6%, respectivement. En revanche, la paroi en béton traditionnel exhibe un déphasage thermique de 3 heures, la moitié du déphasage thermique de mur en DPC. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que le DPC possède une faible diffusivité hydrique qui retarde et amortit les pics de la température interne jusqu'à la nuit, ce qui permet de limiter la surchauffe en période estivale et participe à assurer le confort thermique dans l'habitat.

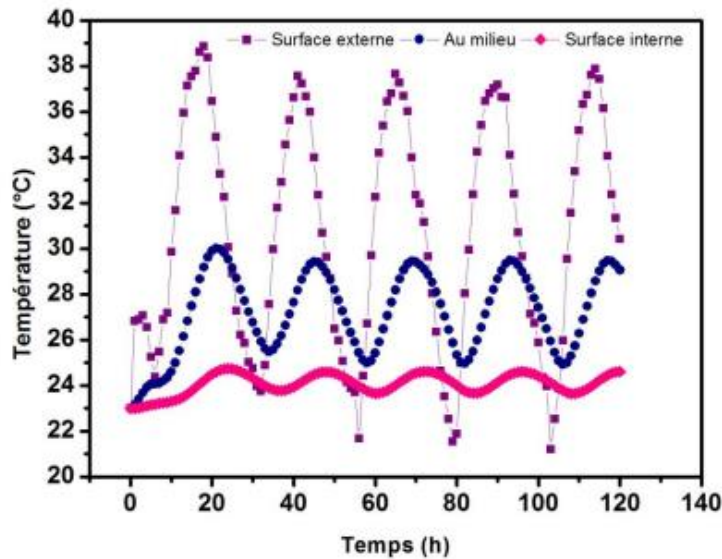


Figure I.16. Variation de la température dans le mur en DPC [26].

Récemment, la modélisation des transferts hygrothermiques d'un mur en béton de bois de palmier dattier a été réalisée par Alioua *et al.* [51]. Deux modèles mathématiques (modèle de Kunzel [34] et de Mends [57]) décrivant le transport hygrothermique dans les matériaux hygroscopique ont été implémentés dans COMSOL Multiphysics. La méthode des éléments finis a été utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Les résultats numériques ont été comparés aux données expérimentales obtenues dans le cadre des travaux de Chennouf *et al.* [52].

La Comparaison des données numériques et expérimentales a révélé des performances acceptables des deux modèles pour la simulation du comportement hygrothermique de mur en DPC, notamment pour la simulation des évolutions de la température (figure I.17). En outre, en prenant en considération l'effet d'hystérésis lors de modélisation permis de mieux prédire le transfert hydrique à travers la paroi en DPC (figure I.18). Ces résultats démontrent la pertinence des modèles sélectionnés pour des études complémentaires sur la DPC à grande échelle, surtout lorsque l'effet d'hystérésis est envisagé.

Une étude de sensibilité a été également effectuée par Alioua *et al.* [55]. Cette étude a prouvé la variation de la capacité thermique et de la masse volumique ont un impact significatif sur que le transfert thermique. Également, le transfert massique est sensible à la variation de l'isotherme de sorption et des facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Selon ces auteurs, une

attention particulière doit être portée à ces propriétés lors de la mesure expérimentale et lors de leurs utilisations aux échelles de mur et de bâtiment.

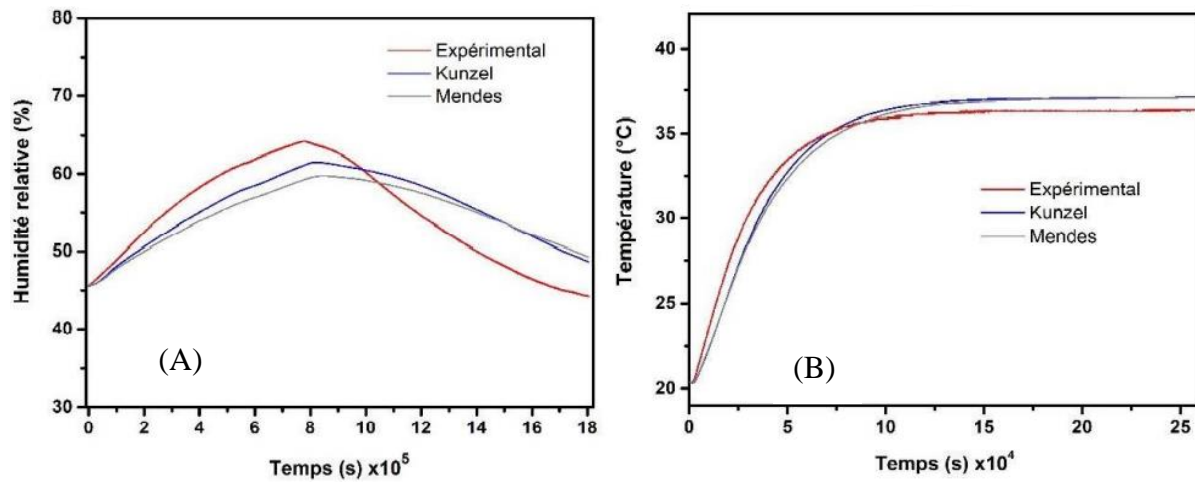


Figure I.17. Validation des modèles de Kunzel et Mendes pour la prédiction de l'humidité (A) relative et de la température (B) dans le mur en DPC [51].

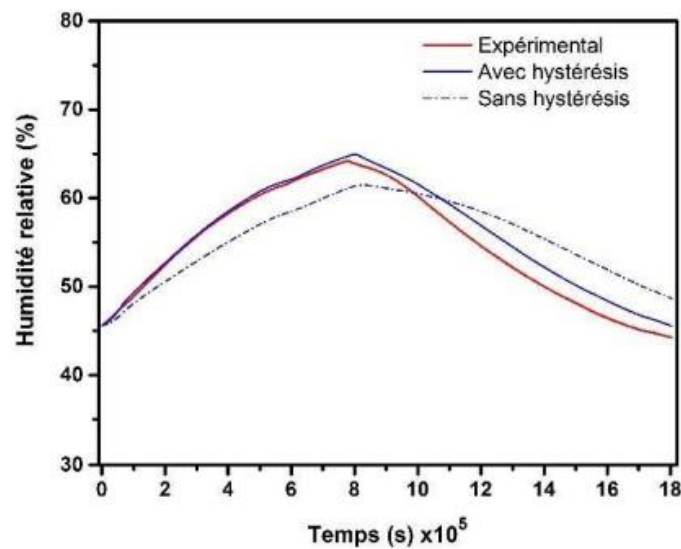


Figure I.18. Impact de l'hystérésis de la courbe de sorption sur la simulation de mur en DPC [51].

En récapitulant, les travaux effectués jusqu'à maintenant se concentrent soit pour la caractérisation mécaniques et hygrothermiques soit pour l'estimation des performances hygrothermiques de mur. Ces travaux sont insuffisants pour l'estimation correcte du confort ressenti et la qualité de l'air intérieur du bâtiment qui englobe certains éléments et facteurs à examiner : l'enveloppe, les systèmes HVAC, les fenêtres, etc. De ce fait, une étude du

comportement hygrothermique d'un bâtiment en béton de bois de palmier dattier sera réalisée dans ce travail de thèse avec le traitement de différents aspects à l'échelle du bâtiment.

IV. Logiciels et approches de modélisation du transfert hygrothermique des enveloppes hygroscopiques des bâtiments

La recherche bibliographique effectuée auparavant sur les matériaux biosourcés, particulièrement sur le DPC, a prouvé que plusieurs processus de transfert thermique et hydrique se déroulent au sein de l'enveloppe. La bonne prédiction des conditions hygrothermiques demande un modèle précis pour les transports simultanés de masse et chaleur. Cette simulation est essentielle pour l'estimation des performances énergétiques des matériaux utilisés dans la construction à l'échelle de local ainsi que pour l'évaluation de niveau de confort ressentie par les habitants.

La simulation des transferts hygrothermiques à travers les parois de bâtiment est une approche de recherche très intéressante dans le domaine des bâtiments. Dans cette optique, des outils de simulation agréés pour l'évaluation thermique et hydrique du bâtiment comme : Wufi, TRNSYS, Energie plus... ont été développés. Dans la partie qui suit, une synthèse bibliographique sur les logiciels de simulation de transfert hygrothermique dans les bâtiments ainsi que les approches innovées pour une meilleure estimation du comportement hygrothermique d'un bâtiment sera présentée.

IV.1. Energyplus

Energyplus est un outil de simulation thermique dynamique, financé par le département de l'énergie des États-Unis. Cet outil permet de prédire le comportement énergétique des locaux, il se repose sur les outils BLAST (Building Loads Analyse and System Thermodynamics) et DOE de langage de programmation FORTRAN. Il a été développé dans les années 80 et reste en développement avec une nouvelle version libre tous les 6 mois. Ce logiciel est disponible librement pour l'utilisation dans l'ingénierie, l'architecture et la recherche. La figure I.19 présente un schéma de l'environnement et les différents programmes associés à Energyplus.

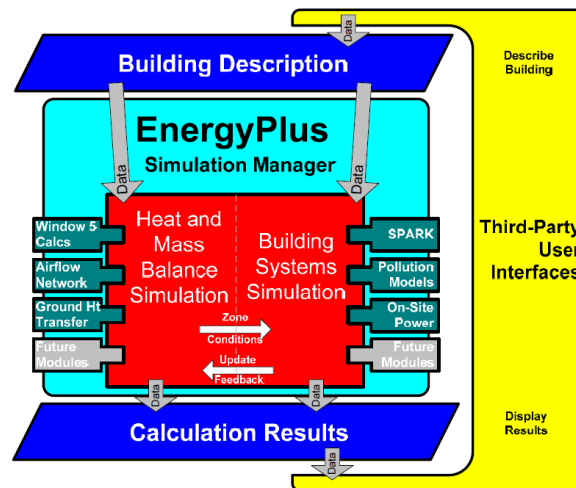


Figure I.19. Schéma de l'environnement et les différents programmes associés à Energyplus [58].

Energyplus (i) simule le comportement et le confort thermique d'un bâtiment, (ii) dimensionne les systèmes d'éclairage ainsi que les systèmes HVAC en tenant compte les conditions extérieurs et opérationnelles, les sources internes, l'éclairage solaire ainsi que les propriétés du matériau. La composition modulaire du logiciel permet aux usagers de vérifier les entrées et programmer les sorties à des pas de temps voulus (en-dessous du pas de temps horaire). Une variété des modèles hygrothermiques a été développés dans EP pour simuler les variations de l'humidité relative et de température dans l'enveloppe en tenant compte les échanges de masse et de chaleur entre l'enveloppe et l'air intérieur du bâtiment. Parmi ces modèles, on trouve :

- Modèle du transfert conductif (conduction Transfer Function, CTF) : dans ce modèle le calcul du transfert thermique à travers les murs néglige le transport et le stockage de l'humidité à travers l'enveloppe. Le modèle (CTF) résout l'équation de conduction thermique transitoire dans les parois multicouches.
- Modèle de la pénétration effective de l'humidité (effective Moisture Penetration Depth, EMPD) : le modèle EMPD est une approche simplifiée pour modéliser l'adsorption et la désorption d'humidité de surface d'une façon découplée à celle de chaleur. Pour le transfert hydrique, il suppose une couche mince proche de la surface du mur qui se comporte de manière dynamique et échange l'humidité avec l'air. Cependant, pour le transfert thermique il résout le modèle CTF.
- Modèle du transfert couplé de chaleur et d'humidité (Combined Heat and Moisture Transfer, HAMT). Ce modèle est entièrement couplé (couplage existant entre le

transfert thermique et massique), unidimensionnel basé sur la méthode des différences finis pour la résolution qui exige les propriétés standards du matériau hygroscopique en fonction de l'humidité. Le modèle HAMT est également capable de simuler les profils de température et d'humidité au sein de l'enveloppe.

Parmi les travaux de recherche effectués par le biais du logiciel ENERGYPLUS on peut citer le travail de Spitz *et al.*[59]. Dans leur travail, les résultats de simulation du modèle HAMT pour la température et pour l'humidité relative ont été comparés aux mesures expérimentales d'une maison à ossature bois située dans le sud-est de la France (Grenoble). En outre, dans les travaux de Qin *et al.*[60] une étude de l'applicabilité des modèles thermiques d'Energyplus (CTF, HAMT et EMPD) pour le calcul de l'effet d'humidité sur la consommation énergétique de l'habitat a été réalisée. Les résultats de ces travaux montrent que le modèle HAMT donne des meilleurs résultats de l'humidité relative, de température et de la consommation énergétique par rapport aux résultats expérimentales.

IV.2. WUFIPlus

WUFIPlus est l'outil de simulation de chaleur et d'humidité le plus complet de la famille des logiciels « WUFI » développés par l'institut « Raunhofer » de physique du bâtiment à Holzkirchen en Allemagne. En plus de simuler les conditions hygrothermiques dans l'enveloppe du bâtiment par le biais du modèle de Kunzel [34], WUFI Plus simule les conditions internes en termes de confort hygrothermique et de consommation d'énergie. En outre, WUFI Plus peut également être utilisé pour la conception et la certification de maisons passives et pour vérifier l'isolation thermique d'été selon la norme allemande DIN 4108-2. Une validation expérimentale de cet outil a été réalisée par Allison *et al.*[61]. Les auteurs ont réalisé une étude sur un bâtiment en terre crue pour étudier sa capacité à améliorer les conditions internes et à diminuer la consommation énergétique. Le principe consiste à comparer les mesures expérimentales et numériques, une bonne concordance entre les deux résultats a été obtenue.

IV.3. TRNSYS

TRNSYS est un outil de simulation thermique dynamique des bâtiments programmé par le «Solar Energy Laboratory» de l'Université de Wisconsin [62]. Il facilite l'ajout de nouveaux modèles de calcul grâce à son environnement de simulation modulaire de systèmes dynamiques. En outre, TRNSYS permet d'incorporer immédiatement des modèles établis à l'aide des autres logiciels (e.g. Matlab/Simulink). Il permet de simuler des systèmes

compliqués composés de bâtiments avec leurs équipements ainsi que le comportement des habitants. Pour le calcul de l'humidité, TRNSYS comporte deux modèles simplifiés. Le premier modèle possède un seul paramètre qui simule le comportement d'une couche supplémentaire imaginaire représente les matériaux de l'enveloppe réagissant avec de l'air intérieur. Le deuxième modèle étudie le comportement de l'enveloppe, il est présenté en deux couches ; la première couche réagisse avec l'humidité de la pièce et la deuxième « couche de stockage profonde » échangeant la masse d'eau avec la première couche (modèle EMPD). C'est le TYPE 56 multizone de TRNSYS qui possède cet effet hygroscopique.

IV.4. SPARK

SPARK est l'outil de modélisation qui permet de résoudre efficacement les équations différentielles aux dérivés partiels. Il a été développé par le groupe de recherche sur la simulation au laboratoire national de Lawrence Berkeley (Californie, USA) [8]. La résolution d'un problème sous SPARK commence par le décomposer de façon orientée objet. Cela désigne qu'il faudrait modéliser le problème par des éléments. Chaque élément est décrit par un objet SPARK qui comporte le modèle mathématique de cet élément et il peut y avoir nombreux composants du même type. Dans les travaux de Tran Le *et al.*[18], l'implémentation du modèle de transfert couplé de chaleur et de masse dans l'enveloppe poreuse basé sur les travaux de Mendes (1997) a été réalisée. Le modèle de transfert couplé thermo-hygro-aérauliques dans le bâtiment ainsi implémenté dans SPARK est validé en comparant les résultats de simulation avec des données expérimentales réalisés dans le cadre de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)[63]. Le modèle numérique implémenté sous SPARK a été validé aussi dans les travaux de thèse de Costantine [10] en comparant ses sorties avec celles données par le logiciel CoDyBa, Code de simulation Dynamique des Bâtiments développé par le laboratoire de recherche CETHIL à Lyon [64].

IV.5. Matlab-Simulink

Qin M *et al.*[65] ont proposé un modèle pour la simulation des transferts de masse et de chaleur au sein de l'enveloppe, ce dernier est basé sur les travaux de Luikov [66] et permet de prévoir les profils spatiaux et temporels de la température et de la teneur en eau au sein du matériau poreux et un modèle pour l'ambiance intérieure. Le modèle a été implémenté sous "Matlab-Simulink". Simulink est un outil intégré à Matlab pour la modélisation, la simulation, et l'analyse des systèmes dynamiques. C'est un outil open source flexible, qui peut être librement

modifié pour des problèmes particuliers. Les résultats de simulation sont validés avec ceux de l'expérimental de l'exercice CE3 réalisés dans le cadre de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). Un bon accord entre les résultats de la simulation et les données expérimentales a été observé. Par conséquent, le modèle proposé par les auteurs de la référence [65] peut être utilisé avec confiance pour la simulation des transferts hygrothermiques dans le bâtiment. En outre, Tariku *et al.* [67] ont développé un code de simulation sous Matlab-Simulink (HAMFitPlus). Ce code intègre un modèle de transfert hygrothermique et un modèle pour l'air intérieure en tenant compte des échanges de masse et de chaleur avec l'enveloppe, des systèmes HVAC ainsi que du comportement des occupants. Un autre travail de recherche a été réalisé à l'aide de l'environnement Simulink/COMSOL par Van Schijndel *et al.* [68] dans le but de simuler les processus d'échanges et de transferts masse et de chaleur dans les locaux.

IV.6. Cast3M

Cast3M est un outil de simulation basé sur la méthode des éléments finis pour résoudre des problèmes de la mécanique des fluides et de la structure. Il a été développé par le CEA en France au sein de Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S). Le développement de ce software s'inscrit dans l'objectif de déterminer un outil de haut qualité, qui sert à la création, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants [69]. Medjelekh *et al.* [70] ont implémenté les équations couplées du transfert hygrothermique dans l'environnement Cast3Men utilisant comme potentiels la température T pour le transfert de chaleur et l'humidité relative H_r pour les transferts d'humidité. Cette implémentation consiste à adapter une méthode implicite du transfert thermique instationnaire aux deux équations d'hygrothermique. Le programme consiste à appeler successivement à chaque pas du temps deux résolutions : une thermique, puis une autre hydrique. Après chaque étape, les propriétés des matériaux, la pression de saturation de la vapeur d'eau, et les sources interne sont actualisés, et ces paires de résolutions thermique/hydrique s'enchaînent jusqu'à la convergence des résultats. La validation du modèle implémenté a été effectuée en comparant les résultats numériques avec les mesures effectuées sur une cellule test, de volume intérieur 27 m^3 , en béton de bois soumise aux conditions climatiques extérieurs.

IV.7. Logiciels de simulation thermique dynamique destinés aux bureaux d'études

Il existe aussi d'autres logiciels de simulation des bâtiments destinés aux architectes et aux bureaux d'études. Ces outils donnent une analyse grossière du comportement énergétique des bâtiments et ne prennent pas en considération le transfert hydrique à travers les parois.

IV.7.1. COMFIE-PLEIADES

Le logiciel COMFIE a été développé par le Centre Efficacité énergétique des Systèmes (CES), ce logiciel permet d'effectuer une analyse globale des projets par les simulations dynamiques de l'enveloppe du bâtiment en commençant par l'estimation des exigences de confort en termes de taux de climatisation. Il permet de dimensionner des locaux confortables, économiques, et à faible impact sur l'environnement. COMFIE est lié à PLEIADES, une interface créée par IZUBA énergies [71].

Les simulations sur COMFIE consistent à la réduction du modèle basé sur la méthode de différences finies par une analyse modale, les paramètres variables (non-linéaires) étant implémentées phase de simulation. Ces méthodes de réduction de modèles et de programmation orientée objets permettent de faciliter de simplifier la modélisation multizone des bâtiments pour les spécialistes tels que les architectes, les ingénieurs ou les bureaux d'études. Les membres du Centre Efficacité énergétique des Systèmes ont développé le logiciel COMFIE ont développé COMFIE sur ces bases. Cet outil permet de générer des fichiers météo horaires (module METEOCALC) et de visualiser les masques solaires. Ce logiciel a aussi été enrichi par ALCYONE, un outil permettant d'activer énormément la saisie des projets avec visualisation 3D. Cet outil a déjà été utilisé par une communauté importante d'architectes, d'ingénieurs et de bureaux d'études. PLEIADES + COMFIE a été validé par le biais des logiciels plus précis (travaux de l'Agence Internationale de l'Energie par exemple) [72].

IV.7.2. CoDyBa

CoDyBa (code de simulation dynamique de bâtiments) est un outil de simulation thermique dynamique des bâtiments. Il est destiné aux bureaux d'études et aux chercheurs et formateurs. Il a été conçu d'origine par J.-J. ROUX et la version multizone sur Windows et les fonctionnalités ultérieures ont été créés par Jean NOEL, chercheur au sein du Centre de Thermique de l'INSA de Lyon ("Institut National des Sciences Appliquées") [64].

CoDyBa est un outil de simulation dynamiques sert à évaluer les performances thermiques et hydriques d'un local lorsqu'il est soumis à des conditions climatiques réels. Ce logiciel permet de faire la modélisation des systèmes HVAC (chauffage, conditionnement d'air et de ventilation) et permet également de choisir des matériaux de construction isolants. Le but principal de ce logiciel est de prédire de la consommation énergétique, et de l'amplitude de variation de la température et de l'humidité relative. Il permet de calculer à un instant donné le taux de chauffage ou de climatisation essentiel pour maintenir la température intérieure a une consigne donnée, ou d'estimer les valeurs de la températures internes quand le taux chauffage et de climatisation sont insuffisants. L'humidité est calculée de la même façon [64].

IV.8. Autres approches

La plupart des logiciels de simulation hygrothermiques des bâtiments présentent une précision moyenne (modélisation multizone pour l'air intérieur et 1D pour les parois). Néanmoins, une simulation hygrothermique à précision moyenne, notamment pour les parois, est insuffisante pour simuler certains phénomènes (eg. L'accumulation d'une masse d'eau sur les surfaces l'enveloppe). A cet effet, la littérature fait état d'un certain nombre d'approches comme la co-simulation et l'intégration directe du modèle hygrothermique dans un logiciel thermique dynamique.

IV.8.1. Co-simulation

La méthode de co-simulation instationnaire consiste à exécuter deux codes de simulation ensemble, l'un pour la modélisation énergétique de l'air intérieur et l'autre pour un modèle précis des transports de masse et de chaleur dans les murs du bâtiment. Cette méthode permet l'échange transitoire entre l'ambiance du bâtiment et l'enveloppe avec un niveau de calcul supérieur (2D et 3D). Cette méthode permet d'étudier avec exactitude les points singuliers dans les parois où des phénomènes de transferts hygrothermiques tridimensionnels se constituent. Une approche de co-simulation HAM-BES a été réalisée par Ferroukhi *et al.*[73] (figure I.20). Cette approche permet l'assemblage transitoire entre le modèle de transfert de masse et de chaleur dans l'enveloppe multicouche (HAMT) et le modèle énergétique de l'air intérieur bâtiment (BES). L'assemblage relie COMSOL Multiphysics, programme de simulation basé sur la méthode des éléments finis pour les transferts hygrothermiques dans les parois, et TRNSYS, logiciel de simulation thermique dynamique des immeubles. Le couplage entre ces deux logiciels est exécuté par MATLAB qui est considéré comme un programme intérateur.

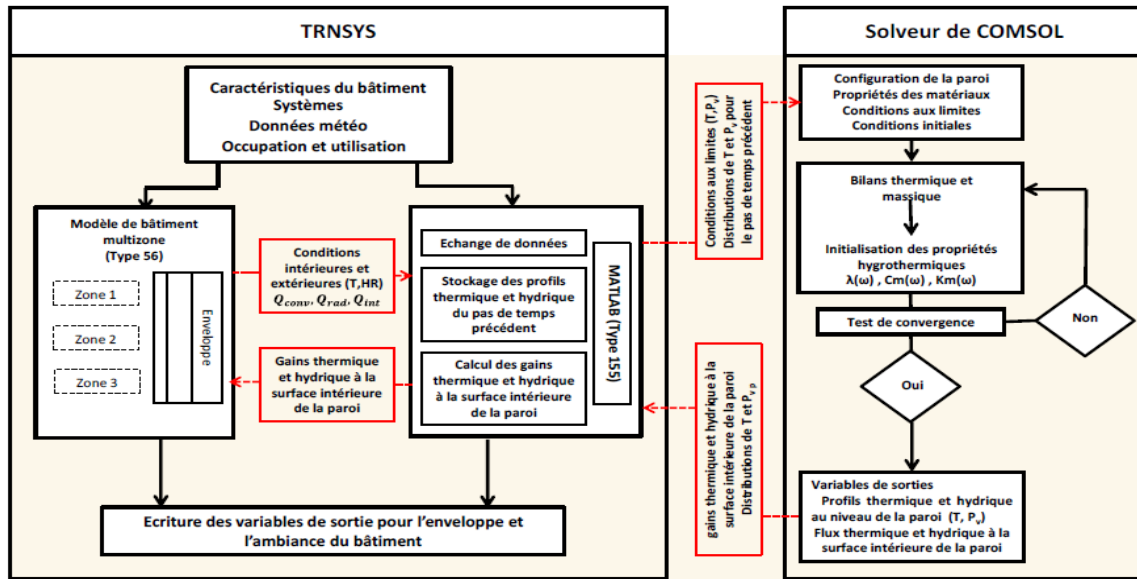


Figure I.20. Schéma de la méthode de co-simulation instationnaire HAM-BES [73].

IV.8.2. Intégration directe du modèle hygrothermique dans un logiciel thermique dynamique

Dans cette approche, la résolution du problème hygrothermique exige l'écriture d'un algorithme en langage de la programmation de logiciel de simulation souhaité en commençant par la discrétisation des équations différentielles par une certaine méthode numérique. Un type d'une enveloppe végétale sur TRNSYS a été développée par Djedjig *et al.* [74], le modèle thermo-hydrique de l'enveloppe végétale a été programmé en langage Python or la programmation des modèles dans TRNSYS ne peut se réaliser normalement qu'en C++ ou en FORTRAN. Pour cela, les auteurs ont appelé le modèle programmé dans Python à partir du corps du nouveau Type décrit en C++ et admettant la gestion des informations. La figure I.21 schématise le principe du couplage entre TRNSYS et le Type de l'enveloppe végétale. Steeman *et al.* [75] ont également intégré un modèle HAMT unidimensionnel dans un logiciel thermique dynamique des bâtiments, en particulier TRNSYS, pour la simulation des transferts de masse et de chaleur dans les matériaux hygroscopiques. Ceci a été effectué en assemblant les équations du modèle HAMT à celles de TRNSYS (figure I.22).

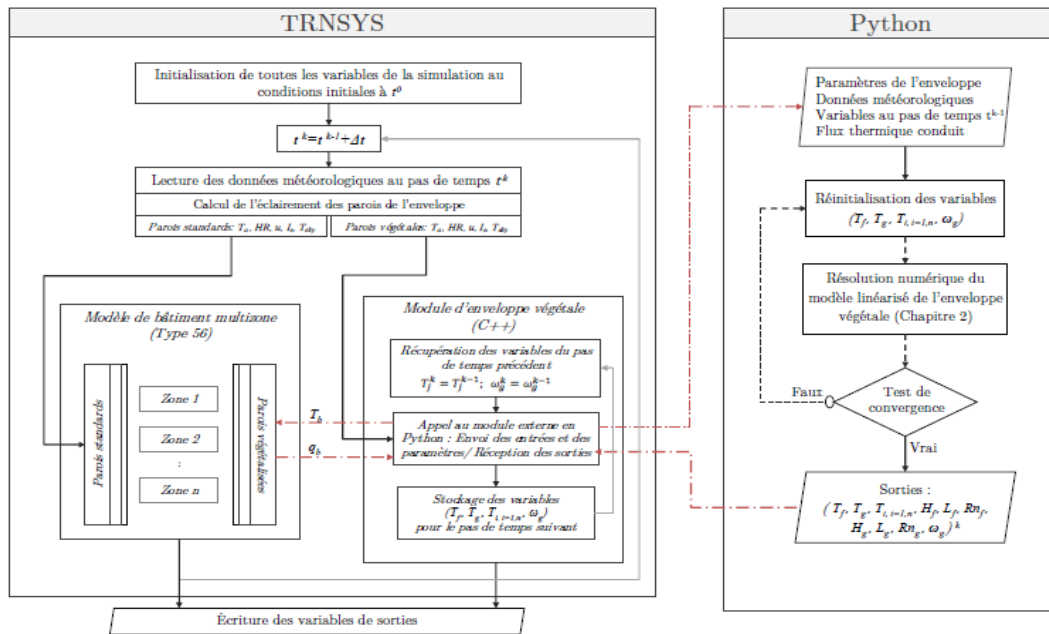


Figure I.21. Principe du couplage entre le modèle thermique du bâtiment de TRNSYS et le modèle de la paroi végétalisée [74].

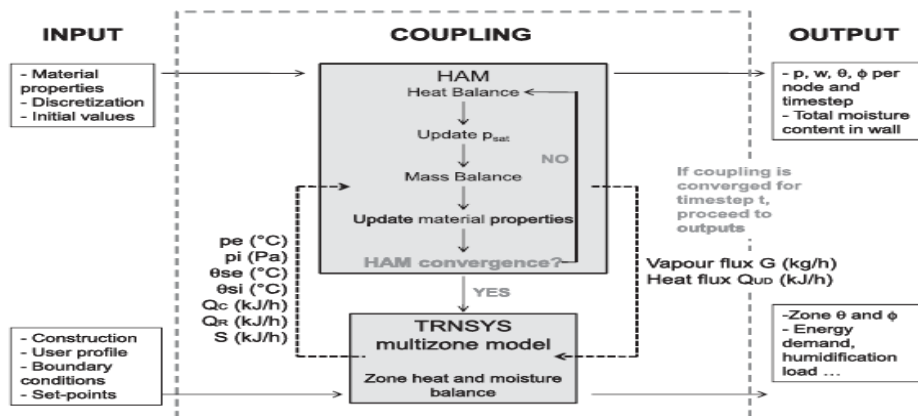


Figure I.22. Schéma du couplage entre TRNSYS et modèle HAM [75].

V. Annexe 41 de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie)

L'Annexe 41 est créé par l'AIE est un projet de recherche qui s'intéresse aux transferts couplés de masse, d'air et de chaleur dans les locaux. Le but était l'amélioration des idées scientifiques et l'analyse de l'impact du transfert de masse et de chaleur couplée à travers de l'enveloppe des bâtiments sur la qualité de l'air intérieur, les consommations d'énergie et la durabilité de l'enveloppe du bâtiment. Ce projet, a été commencé en 2004, il a réuni des chercheurs de 39

établissements et facultés, localisées dans 19 pays dans le monde. Les activités de l'Annexe 41 ont été divisées en quatre tâches [76]:

- Simulation et tests de confrontation.
- Recherches expérimentales.
- Conditions aux frontières.
- Applications.

V.1. Simulation et tests de confrontation (Benchmarks de modélisation)

L'activité « Simulation et tests de confrontation » vise à améliorer les codes de simulation existants, à développer de nouveaux modèles et à valider les codes de simulation par confrontation entre-logiciels et par comparaison avec des données expérimentales lors des tests de confrontation. Cette tâche a réuni la plupart des établissements intervenant à l'Annexe sans jamais envisager de développer un outil de simulation commun [63]. Afin de s'organiser, la tâche 1 a été sectionnée en deux sous-tâches importantes :

- Les benchmarks de comparaison, et les travaux associés, montrant particulièrement les analyses de sensibilité et les créations les plus originaux des outils de modélisation.
- Les recherches récentes de simulation (« free papers») : introductions des recherches les plus originaux sur ce sujet.

Les exercices de comparaison ont rassemblé 13 intervenants. Il s'agit de six exercices dont deux sont basés sur des données expérimentales, qui servent à vérifier les performances des codes de simulation. Ils sont strictement publiés, et ils permettent de constituer une base de validation des outils de simulation hygrothermiques :

1. CE0 : Vérification des cotés thermiques des logiciels utilisés.
2. CE1 : Élargissement de CE0 en additionnant des échanges hydriques entre les murs et l'air intérieure. Plusieurs niveaux de modélisation ont été vérifiés, dans ce cas une solution analytique a été découverte [77].
3. CE2 : basé sur les résultats d'expérimentation d'une chambre climatique avec sollicitations maintenues au Japon.
4. CE3 : Cet activité s'appuie sur des tests sur deux cellules climatiques maintenue dans des conditions extérieurs, réalisé par l'institut « Raunhofer » de physique du bâtiment à Holzkirchen en Allemagne. Dans cet exercice l'effet des conditions extérieurs et

surfaces hygroscopiques sur le taux d'humidité de l'ambiance interne et sur les consommations d'énergie a été envisagé.

5. CE4 : une continuité de CE3. Cette activité est basée sur les chambres climatiques de CE3. L'originalité de ce test était de démontrer qu'une gestion adéquate de l'humidité (en utilisant une stratégie de changement d'air adéquate et des matériaux poreux) permet de réduire de la consommation énergétique dans les bâtiments et d'améliorer le niveau de confort ressenti par les occupants.
6. CE5 : Cette activité s'appuie sur un cas réaliste d'un bâtiment situé en Belgique, montrant des problèmes liés à l'humidité et aux infiltrations. Dans ce test l'effet de la ventilation sur le comportement hygrothermique a été souligné.

V.2. Classement des modèles hygrothermiques

La majorité des études citées dans la partie IV ont été mentionnés dans le travaux de l'annexe 41 de l'AIE. Dans cette dernière, la granularité « précision » des modèles de transfert de l'humidité et de la chaleur, dans l'air intérieur et au sein l'enveloppe du bâtiment, a été classifiés selon quatre niveaux [63] :

- Très fin : L'utilisation d'un modèle 3D pour les murs et un outil (CFD : computational fluid dynamics) pour l'ambiance intérieure.
- Fin : l'air intérieur est divisé en plusieurs zones de calculs et un modèle 2D pour le transport de masse et de chaleur dans les murs ;
- Moyenne : chaque chambre du bâtiment est modélisée comme zone unique et modèles 1D pour les murs ;
- Grossier : le bâtiment entier est représenté comme une seule pièce et transfert conductif de chaleur (CTF) pour les murs.

Le tableau I.3 synthétise la classification des modèles hygrothermiques utilisée dans le cadre de l'annexe 41.

Tableau I.3 : Classification des logiciels hygrothermiques.

Enveloppe	Ambiance			
	Mono-zone	Multizone	Zonale	CFD
Simplifiée Fonction de transfert		<ul style="list-style-type: none"> • Energyplus(Modèle CTF et EMPD) • TRNSYS (EMPD) • Comfie-Pleiades • CoDyBa 		
HAMT (1D)		<ul style="list-style-type: none"> • Energyplus(ModèleHAMT) • WUFI Plus • Tran Le <i>et al.</i>[18] (SPARK) • Medjelekh <i>et al.</i>[70] (Cast3M) 		
HAMT (2D)		<ul style="list-style-type: none"> • Ferroukhi <i>et al.</i>[73] 		
HAMT (3D)				

V.3. Validation des codes de simulation

La vérification d'un outil de simulation est une étape primordiale dans un travail numérique. On peut vérifier la précision d'un modèle de calcul par trois méthodes, soit par : (i) une validation analytique (ii) une comparaison inter-logiciel ou (iii) une vérification expérimentale. La première étape de la vérification est la définition des sorties qui vont être comparées avec les données numériques et les mesures ou les résultats analytiques. L'écart entre les données expérimentaux et les simulations numériques, appelés résidus, doivent être minimisés le maximum possible à travers les étapes suivantes :

- Lors la comparaison entre l'expérimental et le numérique, lorsque le résidu est situé dans l'intervalle d'erreur de l'expérimental, les résultats du modèle sont acceptables.
- Si les résultats numériques ne sont pas validés, la méthode temps-fréquence est utilisé pour trouver les entrées corrélées au résidu. Lorsqu'une erreur de mesure est reconnue, la vérification du model est impossible.
- Si les entrées corrélées au résidu trouvée dans l'étape précédente sont dues à la méconnaissance de la valeur d'un (ou plusieurs) propriété (s), l'étude de sensibilité du modèle est accomplie.
- Lorsque les propriétés les plus influents sont déterminés, l'effet de la propriété la plus influente sur les résultats trouvés est corrélé au résidu.

- La dernière étape consiste à modifier la valeur de la propriété jusqu'à ce que le nouveau résidu trouvé ne soit plus corrélé à l'effet de la propriété(s) identifié(s).

VI. Conclusion

L'étude réalisée dans ce chapitre a mis en exergue la nécessité de la transition vers l'utilisation des matériaux de biosourcé pour la construction afin de diminuer les charges de chauffages et de climatisation, les émissions de CO₂ et de garantir un confort hygrothermique dans l'habitat et une bonne qualité de l'air intérieure. Parmi ces matériaux, le béton du bois de palmier dattier : DPC. En outre, un état de l'art sur le bois de palmier dattier, ses composites et son comportement hygrothermique à l'échelle du matériau et de mur lorsqu'il est incorporé dans le béton a été réalisé. Par la suite, une synthèse bibliographique sur les différents logiciels de simulation de transfert hygrothermique dans les bâtiments a été exposée. Ainsi, les différentes approches d'intégration des modèles hygrothermiques au niveau des murs lors de la modélisation du comportement hygrothermique des locaux ont été entrepris.

En revanche, les études à l'échelle du bâtiment restent limitées et surtout celles qui s'intéressent au confort ressenti à l'intérieur des logements construits en matériaux biosourcé. En fait, elles sont principalement menées sur la caractérisation des échantillons et les phénomènes ayant lieu au sein de la paroi. Pour cela, dans le prochain chapitre on présentera la modélisation du comportement hygrothermique à l'échelle du local suivi par les études de validation expérimentale et analytique du modèle.

References

- [1] 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.
- [2] I. Othmen, "Étude des matériaux d'isolation compatibles avec la pierre de tuffeau: application à la réhabilitation du bâti ancien et/ou historique," éditeur inconnu, 2015.
- [3] L. C. G. d. B. Rhin, "charte developpement durable des constructions departementales," Novembre 2008 Available: www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr.
- [4] F. Bennai, "Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé," Université de La Rochelle; Université Abderrahmane Mira-Bejaïa (Bejaïa, Algérie), 2017.
- [5] S. Marceau, S. Caré, and P. Lesage, "Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable," in *Séminaire MABIONAT*, 2016.
- [6] Available: <https://www.construction21.org/france/>
- [7] A. D. T. Le, "Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous titre: simulation numérique et approche expérimentale)," Université de Reims-Champagne Ardenne, 2010.
- [8] A. T. Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz, and F. Collet, "Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope," *Energy and buildings*, vol. 42, no. 10, pp. 1797-1806, 2010.
- [9] E. Krasny, S. Klarić, and A. Korjenić, "Analysis and comparison of environmental impacts and cost of bio-based house versus concrete house," *Journal of Cleaner Production*, vol. 161, pp. 968-976, 2017.
- [10] G. Costantine, "EOPEBEC-Etude et optimisation des performances énergétiques d'une enveloppe en béton de chanvre pour le bâtiment," Reims, 2018.
- [11] Y. A. Oumeziane, "Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre," INSA de Rennes, 2013.
- [12] A. Evrard, "Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials," *Université catholique de Louvain*, 2008.
- [13] F. Collet-Foucault, "Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux," Rennes, INSA, 2004.
- [14] D. Samri, "Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique," *Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*, 2008.
- [15] L. Arnaud, "Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools: experimental and theoretical approaches, in 'BIORESOURCE HEMP 2000 and other fibre crops', nova-Institut und Tritec," *Nova Institut, Hürth, Germany*, 2000.
- [16] V. Cérézo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique," *Institut National des Sciences Appliquées, Lyon*, 2005.

- [17] D. H. A. Evrard A., "Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies," *Building Physics*, vol. 34, no. 1, pp. 5-25 2010.
- [18] M. C. Tran Le A D, Mai T H , Wurtz E, Collet F, "Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope," *Energy and Building*, vol. 42, pp. 1797-1806, 2010.
- [19] C. F, "Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux," INSA Rennes France, 2004.
- [20] O. Krumm and E. Cauderay, "LA CONSTRUCTION EN BOTTE DE PAILLE."
- [21] M. Olivier, F. Rojat, G. Forêt, and C. Hamelin, "CONSTRUCTION EN PAILLE PORTEUSE METHODOLOGIE D'ESSAIS DU COMPORTEMENT MECANIQUE," in *Colloque International Francophone NoMaD, Toulouse*, 2012, pp. 19-20.
- [22] O. Douzane, G. Promis, J.-M. Roucoult, A.-D. T. Le, and T. Langlet, "Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations," *Journal of Building Engineering*, vol. 8, pp. 91-98, 2016.
- [23] B. Belhadj, M. Bederina, Z. Makhloufi, A. Goullieux, and M. Quéneudec, "Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment," *Energy and Buildings*, vol. 87, pp. 166-175, 2015.
- [24] L. Boughediri, "Le pollen de palmier dattier: approche multidisciplinaire, modelisation multiparametrique en vue de creer une banque de pollens," Paris 6, 1994.
- [25] M. Belguedj, "Evaluation du sous-secteur des dattes en Algérie," *INRAA El-Harrach*, 2007.
- [26] B. Haba, "Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques des matériaux biosourcés et locaux," UB1, 2017.
- [27] P. Munier, *Le palmier-dattier*. Maisonneuve & Larose, 1973.
- [28] K. ALMI, "Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie," UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [29] 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, no. 2-3, pp. 491-497, 2011.
- [30] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, and A. Hammami, "Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: fiber characterization," *Polymer composites*, vol. 26, no. 4, pp. 486-497, 2005.
- [31] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in polymer science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552-1596, 2012.
- [32] C. Magniont, "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources," Toulouse 3, 2010.
- [33] "Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés," *Constructions et Bioressources*2012.

- [34] H. M. Kunzel, "Simultaneous heat and moisture transport in building components," *One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart*, vol. 65, 1995.
- [35] S. Liuzzi, M. Hall, P. Stefanizzi, and S. Casey, "Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate," *Building and Environment*, vol. 61, pp. 82-92, 2013.
- [36] *Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta. ASHRAE*, 2010.
- [37] J. Toftum, A. S. Jørgensen, and P. O. Fanger, "Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort," *Energy and Buildings*, vol. 28, no. 1, pp. 15-23, 1998.
- [38] J. Toftum, A. S. Jørgensen, and P. O. Fanger, "Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin," *Energy and Buildings*, vol. 28, no. 1, pp. 1-13, 1998.
- [39] L. Fang, G. Clausen, and P. O. Fanger, "Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality," *Indoor air*, vol. 8, no. 2, pp. 80-90, 1998.
- [40] F. Lucas, L. Adelard, F. Garde, and H. Boyer, "Study of moisture in buildings for hot humid climates," *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 4, pp. 345-355, 2002.
- [41] S. Déoux and P. Déoux, *Le guide de l'habitat sain: habitat qualité santé*. Medieco éd., 2004.
- [42] K. Sedlbauer, M. Krus, W. Zillig, and H. Kunzel, "Mold growth prediction by computational simulation," *Fraunhofer Institute for Building Physics*, 2001.
- [43] P. Wolkoff and S. K. Kjærgaard, "The dichotomy of relative humidity on indoor air quality," *Environment international*, vol. 33, no. 6, pp. 850-857, 2007.
- [44] H. Zhang, H. Yoshino, and K. Hasegawa, "Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method," *Building and Environment*, vol. 48, pp. 27-34, 2012.
- [45] Y. Li, P. Fazio, and J. Rao, "An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room," *Building and Environment*, vol. 47, pp. 205-216, 2012.
- [46] O. F. Osanyintola and C. J. Simonson, "Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact," *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 10, pp. 1270-1282, 2006.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] M. Haddadi, B. Agoudjil, N. Benmansour, A. Boudenne, and B. Garnier, "Experimental and modeling study of effective thermal conductivity of polymer filled with date palm fibers," *Polymer Composites*, vol. 38, no. 8, pp. 1712-1719, 2017.
- [50] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date

- palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 348-356, 2018/12/20/2018.
- [51] T. Alioua, B. Agoudjil, N. Chennouf, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect," *Building and Environment*, vol. 163, p. 106333, 2019.
- [52] N. Chennouf, B. Agoudjil, T. Alioua, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Experimental investigation on hygrothermal performance of a bio-based wall made of cement mortar filled with date palm fibers," *Energy and buildings*, vol. 202, p. 109413, 2019.
- [53] A. Kareche, B. Agoudjil, B. Haba, and A. Boudenne, "Study on the Durability of New Construction Materials Based on Mortar Reinforced with Date Palm Fibers Wastes," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, no. 7, pp. 3801-3809, 2020/07/01 2020.
- [54] L. Rilem, "Functional classification of lightweight concrete," *Mater. Struct*, vol. 11, pp. 281-283, 1978.
- [55] T. Alioua, B. Agoudjil, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Sensitivity analysis of transient heat and moisture transfer in a bio-based date palm concrete wall," *Building and Environment*, vol. 202, p. 108019, 2021.
- [56] B. A. N. Chennouf, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 348-356, 2018.
- [57] G. H. Dos Santos and N. Mendes, "Combined heat, air and moisture (HAM) transfer model for porous building materials," *Journal of building physics*, vol. 32, no. 3, pp. 203-220, 2009.
- [58] EnergyPlus, "Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual Essential Information you need about Running EnergyPlus," Technical report 2013.
- [59] C. Spitz, Woloszyn, M., Buhe, C., and Labat, M. , "Simulating combined heat and moisture transfer with EnergyPlus : an uncertainty study an comparison with experimental data," in *Building Simulation*, Chambery, France, 2013.
- [60] J. Yang, H. Fu, and M. Qin, "Evaluation of different thermal models in EnergyPlus for calculating moisture effects on building energy consumption in different climate conditions," *Procedia Engineering*, vol. 121, pp. 1635-1641, 2015.
- [61] D. Allinson and M. Hall, "Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 6, pp. 845-852, 2010.
- [62] S. A. Klein and W. A. Beckman, "TRNSYS 16: A transient system simulation program: mathematical reference," *TRNSYS*, vol. 5, pp. 389-396, 01/01 2007.
- [63] M. Woloszyn, C. Rode, and J.-J. Roux, *Modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments dans l'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie*. 2008.
- [64] J. Noel, J.-j. Roux, and P. S. Schneider, "CoDyBa, a design tool for buildings performance simulation," 2001.
- [65] T. A. Qin M, Belarbi R., "Transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les bâtiments climatisés," 2006.
- [66] A. V. Luikov, "Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies," *Elsevier*, 1964.

- [67] F. Tariku, Kumaran, K., and Fazio, P. , "Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer. ," *Int. J. Heat Mass Transf*, vol. 53, pp. 3111–3120, 2010.
- [68] A. W. Van Schijndel, "Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using SimuLink and COMSOL," *Build. Simul*, vol. 2, pp. 143–155, 2009.
- [69] E. Le Fichoux, "Présentation et utilisation de cast3m," *ENSTA-LME* (<http://www.cast3m.com>), 2011.
- [70] D. Medjelekh, L. Ulmet, and F. Dubois, "Mesure et modélisation des transferts hygrothermiques d'une enveloppe en béton de bois'," in *Conférence IBPSA, Arras, France*, 2014.
- [71] E. é. d. S. CES, "Plateforme logicielle PLEIADES+COMFIE Outil de simulation thermique dynamique et multizones des bâtiments," mines-paristech.
- [72] T. Salomon, R. Mikolasek, and B. Peuportier, "Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE," *Journée thématique SFT-IBPSA*, 2005.
- [73] M. Y. Ferroukhi, "Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments: Evaluation des désordres causés par l'humidité," Université de La Rochelle, 2015.
- [74] R. Djedjig, "Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain," Université de La Rochelle, 2013.
- [75] M. Steeman, Janssens, A., Steeman, H.J., Belleghem, M.V., and Paepe, M.D, "On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model.," *Build. Environ.*, vol. 45, pp. 865–877, 2010.
- [76] M. C. Woloszyn, R. J. E. C. i. B. Carsten, and I. E. A. Community Systems", "R." IEA Annex 41, MOIST-ENG Subtask 1-Modelling Principles and Common Exercises," 2007.
- [77] T. Bednar and C. Hagentoft, "Analytical solution for moisture buffering effect validation exercises for simulation tools," in *Nordic building physics symposium*, 2005, pp. 13-15.

**Choix de l'outil de
simulation et validation du
modèle de calcul**

I. Introduction

Ce chapitre porte sur la modélisation des transferts hygrothermiques au niveau du bâtiment. Dans un premier temps, les principaux paramètres caractéristiques d'un matériau hygroscopique sont présentés afin de pouvoir faire une étude paramétrique dans le chapitre III. Dans la deuxième partie, les mécanismes de stockage et de transfert hygrothermique dans les milieux hygroscopiques ainsi que les modèles décrivant les transferts de masse et de chaleur au sein de l'enveloppe hygroscopique sont présentés. Nous présentons par la suite, les bilans de chaleur et d'humidité de l'ambiance intérieure du bâtiment et les conditions aux frontières. L'outil de simulation choisi et la méthode de discrétisation des équations hygrothermiques sont exposées dans la partie suivante. Enfin la validation du modèle hygrothermique présenté sera réalisée en utilisant les résultats de la littérature.

II. Grandeurs caractéristiques d'une enveloppe hygroscopique

Une substance est dite hygroscopique quand elle est capable de stocker et de fixer une quantité significative de la vapeur d'eau. Donc, cette caractéristique traduit l'aptitude d'une matière à adsorber la vapeur d'eau et à la restituer selon les conditions de l'air environnant. Pour bien comprendre la modélisation du comportement hygrothermique de ces matériaux, il est nécessaire de connaître la définition des propriétés hygrothermique des matériaux hygroscopiques.

II.1. Composition structurelle d'un matériau hygroscopique

Les matériaux biosourcés de construction comme le DPC sont des matériaux hygroscopiques poreux polyphasiques. Ils sont composés de trois phases :

- Une phase solide composé des fibres, des hydrates et des portions du liant.
- Une phase liquide constituée d'eau liquide.
- Une phase gazeuse composé de l'air et de la vapeur d'eau.

Un matériau hygroscopique poreux, peut être schématisé comme montré dans la figure II.1.

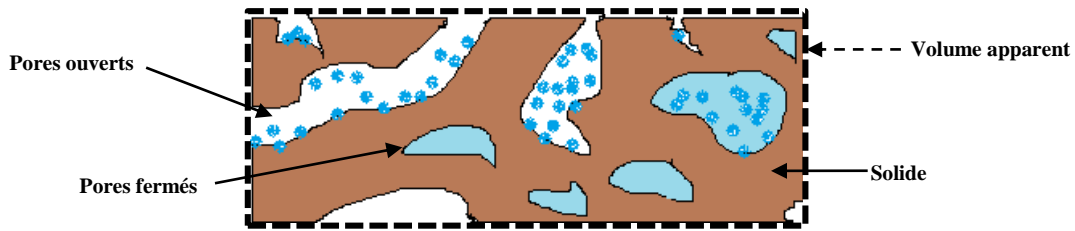


Figure II.1. Schéma d'un matériau hygroscopique.

Pour définir un matériau poreux, il est primordial de comprendre les grandeurs ci-dessous :

- Porosité ouverte :

$$P_o = \frac{V_o}{V_a} \quad (1)$$

- Porosité totale :

$$P = \frac{V}{V_a} \quad (2)$$

Où : V_o : le volume des pores ouverts, qui sont en contact avec l'air l'extérieur (m^3), V_a : le volume apparent inclus dans les frontières du matériau (m^3), V : le volume total des pores (ouverts+ fermés) (m^3).

La porosité ouverte de DPC est de l'ordre de 58 % et sa porosité fermée est de l'ordre de 64% [1]. Il faut mentionner que les différentes grandeurs hygrothermiques des matériaux de construction poreux dépendent des porosités définies ci-dessus.

II.2. Humidité relative (φ)

Le degré d'hygrométrie d'un milieu ou l'humidité relative est défini comme le rapport entre la pression partielle P_v sur la pression saturante de la vapeur d'eau P_{vs} . Donc, elle indique la relation entre la quantité de la vapeur d'eau dans l'air ambiant et sa capacité maximum à en tenir dans les mêmes conditions. Elle s'exprime par la relation (3) :

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (3)$$

Où : φ : est l'humidité relative (%), P_v : est la pression partielle de vapeur d'eau (Pa), P_{vs} : est la pression de saturation de la vapeur d'eau (Pa).

II.3. Teneur en eau

Au sein des matériaux hygroscopiques, l'eau peut se présenter sous divers états pour une température et une humidité relative données. La teneur en eau désigne la quantité d'eau présente dans le matériau, elle dépend de l'humidité relative et de la température extérieure et intérieure. De nombreuses relations peuvent être utilisées pour définir la teneur en eau. Ces équations sont illustrées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Formules de la teneur en eau [2].

Teneur en eau	Formule
Massique (kg.kg ⁻¹)	$u = \frac{m_{eau}}{m_{sec}} \quad (4)$
Massique par unité de volume (kg.m ⁻³)	$W = \frac{m_{eau}}{V_a} \quad (5)$
Volumique (m ³ .m ⁻³)	$\theta = \frac{V_{eau}}{V_a} \quad (6)$

Où : m_{eau} : la masse d'eau (kg), m_{sec} : la masse du matériau à l'état sec (kg), V_a : le volume apparent inclus dans les frontières du matériau (m³).

II.3.1. Isotherme de sorption

L'isotherme de sorption représente la variation de la teneur en eau comprise dans le matériau poreux en fonction de l'humidité relative de l'air environnant. Cette caractéristique permet de comprendre et de prédire le comportement hydrique d'un matériau soumis à des conditions environnementales. On parle de la courbe d'adsorption si on commence d'un état sec vers un état de saturation et dans le cas contraire, on parle la courbe de désorption. La figure II.2 représente la courbe de sorption du béton de bois de palmier dattier. On constate que pour une certaine humidité relative, le DPC possède une teneur en eau distincte pour les phases d'adsorption et de désorption. Cette observation est appelée : phénomène d'hystérésis. Ce phénomène physique peut être justifier par différentes explications. Cependant, l'angle de contact [3] et la non uniformité géométrique des pores [4] sont les importants paramètres auxquels est lié le phénomène d'hystérésis. Selon les travaux de thèse de Costantine [5] qui portent sur le béton de chanvre, l'effet d'hystérésis de la courbe de sorption est négligeable lors

la simulation des transferts hygrothermiques au niveau du bâtiment . C'est pour cela, les logiciels de simulation commerciaux ne tiennent pas en considération cet effet d'hystérésis, mais préférentiellement la moyenne entre les courbes d'absorption et de désorption. La pente de la courbe de sorption indique la capacité hydrique, elle est appelée aussi capacité hydrique de stockage d'un matériau, souvent notée $\xi\varphi$ [2].

$$\xi_{\varphi} = \left. \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right|_T \quad (7)$$

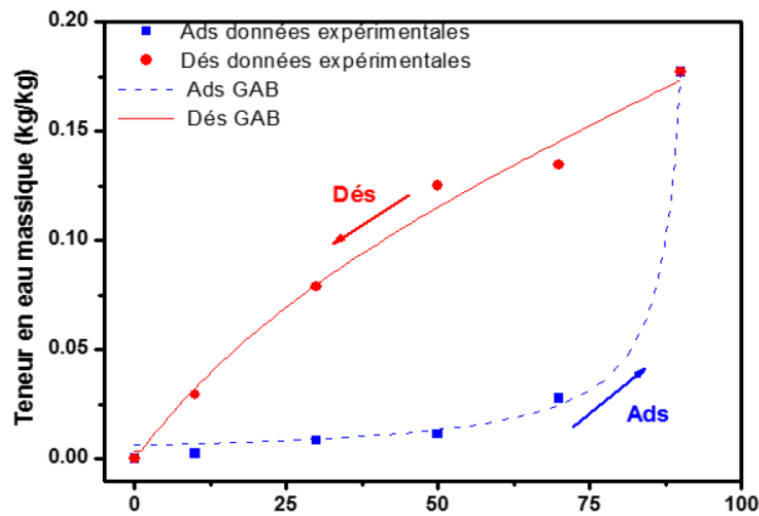


Figure II.2. Courbe de sorption du DPC dattier à 23°C [6].

II.4. Perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau

La perméabilité d'un matériau hygroscopique δ_p décrit sa capacité à se laisser traverser par de l'eau (liquide et gaz) sous un gradient de pression entre ses deux surfaces. Donc, la perméabilité indique le rapport entre la quantité de vapeur qui traverse le matériau et (i) l'unité d'épaisseur, (ii) le temps et (iii) l'unité de pression de vapeur de part et d'autre du matériau. Elle est déterminée par l'équation 8 [2]:

$$\delta_p = \frac{\delta_{p,a}}{\mu} \quad (8)$$

$$\delta_{p,a} = 2.31 * 10^{-5} \frac{M_l}{RT} \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.81} \quad (9)$$

Où : $\delta_{p,a}$ est la Perméabilité de l'air à la vapeur ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$), M_i est la masse molaire de la vapeur d'eau ($0.018 \text{ kg.mol}^{-1}$), R est la constante internationale des gaz parfaits ($8.314 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$), μ est le facteur de résistance à la diffusion du matériaux sec (-).

Les valeurs de la perméabilité et de facteur de résistance de béton de bois de palmier dattier sont reportées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Valeurs de la perméabilité et de facteur de résistance de DPC [6].

	Etat sec	Etat humide
Perméabilité ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$) $\times 10^{-11}$	3.16	3.95
Facteur de résistance (-)	6.31	5.57

II.5. Coefficient de diffusion de liquide D_l

D_l ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$) est le coefficient de transport de l'eau liquide sous l'action d'une différence d'humidité relative ; c'est une combinaison de plusieurs processus selon les différentes régions hygroscopiques [7]:

- Région hygroscopique $0\% < \varphi < 95\%$

$$D_{l,\varphi} = \left(\frac{1}{\mu(\varphi)^*} - \frac{1}{\mu} \right) \delta_{p,a} P_{sat} \quad (10)$$

Où : μ et $\mu^*(\varphi)$ sont les facteurs de résistance à la diffusion du matériau sec et humide, respectivement.

- Région capillaire $\varphi > 95\%$

$$D_{l,ws} = D_{ws} \cdot \xi_\varphi = \left(3,8 \cdot \left(\frac{A_c}{W_f} \right) \cdot 1000^{\frac{w}{w_f}-1} \right) \xi_\varphi \quad (11)$$

- Le coefficient de transport de liquide par redistribution D_{ww} est également pris en considération ; il est estimé comme une puissance décimale en dessous du coefficient de transport capillaire D_{ws} .

Où : D_{ws} est le coefficient de transport de liquide pour la succion capillaire, A_c est le coefficient d'absorption d'eau liquide ($\text{kg.m}^{-2}\text{S}^{-0.5}$), W_f est la teneur en eau saturante (kg.m^{-3}), ξ_φ est la dérivée de la courbe de sorption-désorption (Capacité de stockage d'humidité) (kg. m^{-3}).

Les coefficients de transport de liquide pour la succion D_{ws} et pour la redistribution D_{ww} sont calculés selon l'équation 11. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Coefficients de transport de liquide pour la succion D_{ws} et pour la redistribution D_{ww} du DPC.

Teneur en eau (kg .m⁻³)	2.15	8.07	10.76	26.35	168.86
$D_{ws} \times 10^{-10}$ (m².S⁻¹)	5.82	6.40	6.07	8.59	85.22
$D_{ww} \times 10^{-11}$ (m².S⁻¹)	5.82	6.40	6.07	8.59	85.22

II.6. Conductivité thermique

Parmi les propriétés thermiques les plus importantes pour les matériaux de construction des bâtiments, la conductivité thermique (λ), elle permet d'évaluer la capacité d'isolation des matériaux. Elle désigne le flux thermique traversant une couche d'un mètre de matériau quand la différence de température ΔT entre les faces opposées de cette couche est de 1°C. Les recherches sur la conductivité thermique de DPC [1] ont relevé que sa valeur est très sensible au changement des conditions climatiques extérieures (T et HR) ; à cause de sa structure poreuse comme montré dans la figure II.3. Cette observation a été également constatée par d'autres chercheurs [8] ; elle est liée à l'existence de l'eau qui change largement les propriétés thermiques d'un matériau.

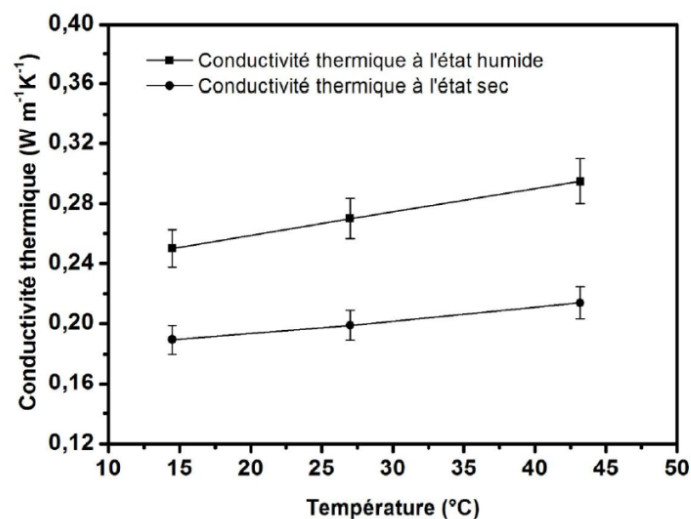


Figure II.3. Conductivité thermique du DPC pour différentes températures et à l'état sec et humide [9].

III. Mécanismes de stockage et de transfert hygrothermique dans les milieux hygroscopiques

Pour modéliser le transfert de masse et de chaleur dans les milieux hygroscopiques, des hypothèses simplificatrices ont été proposées dans la littérature [10]:

- Le matériau est considéré comme isotrope
- Équilibre thermodynamique local atteint
- L'état gazeux est constitué de la vapeur d'eau et de l'air sec et se comportent comme un fluide parfait incompressible
- Le transfert radiatif est négligé au sein du matériau
- Pas de réaction chimique au sein des matériaux

Plusieurs mécanismes de stockage et de transport masse et de chaleur entrent en jeu lorsque l'on étudie les parois hygroscopiques du bâtiment. La figure II.4 présente l'ensemble de ces mécanismes ainsi que les différentes causes ou potentiels de transport affectant chacun de ces mécanismes selon l'étude de Kunzel [7].

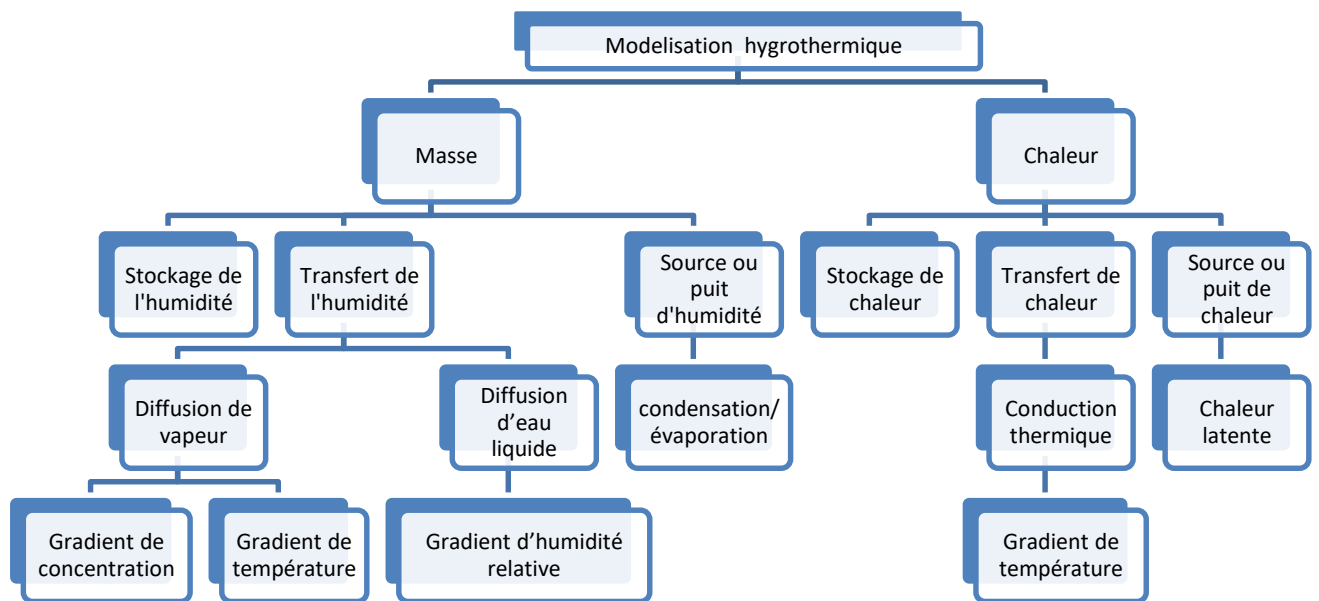


Figure II.4. Mécanismes de stockage et de transfert hygrothermique dans un milieu hygroscopique.

III.1. Stockage de masse

La masse d'eau s'accumule dans les matériaux poreux par le biais de plusieurs mécanismes. Ce qui permet un stockage de la masse d'eau sous forme de vapeur et de liquide à l'intérieur des

matériaux hygroscopiques. Cette aptitude à stocker de l'eau dépend de la porosité, quand l'humidité de l'air ambiant augmente la masse totale du matériau accrois cela revient à la fixation des molécules de l'eau sur les parois intérieures des pores du matériau et vice versa. Ces phénomènes sont dus à l'adsorption et à la désorption de l'eau. Ce processus peut avoir lieu dans les matériaux en plusieurs phases (figure II.5).

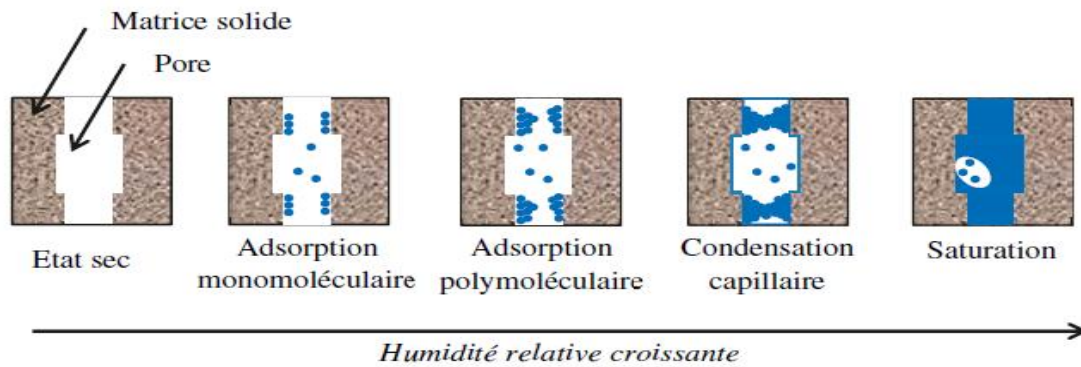


Figure II.5. Schéma de modes de fixation d'humidité dans un pore [10].

A l'état sec, le matériau ne peut contenir aucune humidité. Cependant, à partir du moment où l'humidité accrois, la masse d'eau va être adsorbée doucement tout d'abord sur de la surface des pores ensuite à l'ensemble des pores. Le stockage de masse se fait par la chronologie suivante :

- **Adsorption mono-moléculaire** : l'eau se fixe d'abord en une couche unique
- **Adsorption poly-moléculaire** : quand l'humidité relative augmente l'eau se fixe sur de nombreuses couches, cette observation est appelée aussi adsorption hygroscopique.
- **Conduction capillaire** : Aux plus fortes humidités, il aura lieu une création de ponts liquides aura lieu. Ils touchent en premier les pores les plus petits puis les plus grands.
- **Saturation** : quand l'humidité relative atteint 100% (état de saturation), la teneur en eau atteint une valeur appelée teneur saturante w_{sat} , elle dépend de la porosité du matériau hygroscopique.

La teneur en eau stockée dans les matériaux ne dépend pas que de l'humidité relative, mais également de la température ambiante, sa variation en fonction du temps est décrite par la relation (12) :

$$\frac{dw}{dt} = \left. \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right|_T \frac{d\varphi}{dt} + \left. \frac{\partial w}{\partial T} \right|_{\varphi} \frac{\partial T}{dt} = \xi_{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} + \xi_T \frac{\partial T}{dt} \quad (12)$$

III.2. Transfert de l'humidité

Selon les travaux de Kunzel [7], la diffusion de la vapeur et le transport d'eau par capillarité sont considérés lors le transport de l'humidité. Dans des conditions faibles en humidité relatives, le mécanisme de transport principal de l'eau est la diffusion de vapeur. Aussi, si la teneur en eau augmente au sein de l'enveloppe, il apparait un transport d'eau par capillarité ($\varphi > 95\%$). Ces deux processus de transfert sont les plus importants dans le domaine du bâtiment.

III.2.1. Diffusion de la vapeur d'eau

Dans les milieux hygroscopiques à vapeur d'eau se diffuse sous gradient de deux moteurs : la température (effet Soret) et de fraction massique (Diffusion de Fick), selon les équations suivantes [7]:

$$g_{v,diff,total} = g_{fick} + g_{soret} \quad (13)$$

$$g_{fick} = D_X \nabla X = D_X \nabla \frac{c_v}{c_{tot}} = D_X \nabla \frac{P_v}{P_a} = -\delta_{p,a} \nabla P_v \quad (14)$$

$$g_{soret} = D_T \nabla T \quad (15)$$

$$g_{v,diff,total} = -\delta_{p,a} \nabla P_v + D_T \nabla T \quad (16)$$

Ou, $g_{v,diff,total}$: densité de flux diffusif de la vapeur d'eau ($\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$), D_X : coefficient de diffusion de masse ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$), D_T : coefficient de thermo-diffusion ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$), X : fraction massique de la vapeur dans l'air (-), $\delta_{p,a}$: la perméabilité de l'air à la vapeur ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$), P_v : La pression partielle de la vapeur d'eau (P).

En réalités, dans la physique des bâtiments, les différences de température existante sont faibles. Donc, le transfert masse par thermo-diffusion est insignifiant face à la diffusion de Fick. D'où, la densité de flux diffusif de la vapeur d'eau s'exprime par [7]:

$$g_{v,diff} = -\delta_{p,a} \nabla P_v \quad (17)$$

En fait, les matériaux poreux offrent des petits pores. Donc, le phénomène d'effusion peut avoir lieu, l'effusion est la presseuse par lequel la vapeur d'eau traverse les pores du matériau hygroscopique. Par conséquent, l'ajout d'un facteur de résistance à la diffusion noté μ qui caractérise le matériau s'avère nécessaire. La relation qui décrit la densité de flux diffusif de vapeur s'écrit [7]:

$$g_{v,diff,total} = -\frac{\delta_{p,a}}{\mu} \nabla P_v = -\delta_p \nabla P_v = -\delta_p \nabla(\phi P_{sat}) \quad (18)$$

Où δ_p : désigne la perméabilité du matériau ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$), P_{sat} : La pression de saturation de vapeur (P), μ : facteur de résistance du matériau (-).

Cette dernière équation montre que le transfert diffusif de la vapeur d'eau ne dépend pas seulement à l'humidité relative mais aussi à la température par le biais de la pression de la vapeur saturante.

III.2.2. Diffusion de l'eau liquide

La diffusion de l'eau liquide démarre dès lors l'eau liquide existe dans le matériau. Kunzel [7] a donné une relation qui exprime la diffusion d'eau liquide sous un gradient d'humidité relative selon l'équation suivante [7]:

$$g_{l,diff} = -D_l \nabla \phi \quad (19)$$

Où: D_l indique le coefficient de diffusion liquide sous différence d'humidité relative à température constante, il est exprimé selon la région d'humidité relative (régions hygroscopique et capillaire) comme expliqué dans la section II.5.

III.3. Stockage de chaleur

L'enthalpie désigne la chaleur contenue au sein d'un matériau dans des conditions isobariques. Dans les matériaux de construction poreux polyphasiques, l'enthalpie totale est la somme de l'enthalpie la phase sèche (matériau sec) et l'enthalpie de l'eau (vapeur et liquide) [7].

$$H = H_0 + H_l \quad (20)$$

Où : H est l'enthalpie totale du matériau ($J.m^{-3}$), H_0 est l'enthalpie du matériau sec et H_l est l'enthalpie de l'eau ($J.m^{-3}$).

Avec :

$$H_0 = \rho_0 C_0 T \quad (21)$$

$$H_l = w C_l T \quad (22)$$

D'où :

$$H = \rho_0 C_0 T + w C_l T \quad (23)$$

Où : ρ_0 : La masse volumique du matériau sec ($kg.m^{-3}$), C_0 : La chaleur spécifique isobare du matériau sec ($J.kg^{-1}K^{-1}$), C_l : la chaleur spécifique isobare de l'eau ($J.kg^{-1}K^{-1}$).

III.4. Transfert de chaleur

A l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment et à travers les différentes couches de matériaux, le mode principal de transport de chaleur est la conduction thermique. La conduction est définie comme le mode de transfert de chaleur provoqué par un gradient de température entre les faces intérieur et extérieur de l'enveloppe. La loi de Fourier décrit la densité de flux de chaleur conductif en fonction du gradient de température comme suivant [7]:

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (24)$$

λ ($W.m^{-1}k^{-1}$) est la conductivité thermique à l'état humide, elle est fonction de la teneur en eau. L'équation 25 décrit sa variation en fonction de la teneur en eau [7].

$$\lambda(w) = \lambda_0 \left(1 + b \frac{w}{\rho_0}\right) \quad (25)$$

Avec λ_0 : conductivité thermique du matériau à l'état sec ($W.m^{-1}K^{-1}$), ρ_0 : masse volumique du matériau à l'état sec ($kg.m^{-3}$), w : teneur en eau massique par unité de volume ($kg.m^{-3}$), b : supplément hydrique de la conductivité thermique (-).

IV. Modèles de transfert hygrothermique (HAMT) dans les parois des bâtiments

Le transfert thermique à travers les parois hygroscopique s'effectue par conduction thermique et par changement de phase. Ainsi, le transfert de masse s'effectue par diffusion de l'eau (vapeur et liquide). Cet ensemble de phénomènes couplés rend la modélisation complexe. Pour une meilleure prédiction du comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques, le développement de nombreux modèles HAMT (Heat, Air and Moisture transfert) a été réalisé dans plusieurs travaux de la littérature [7, 11-13]. Ces modèles se différencient par le choix de potentiels de calcul ainsi que les hypothèses retenues. Cependant, les modèles décrivant le transfert hygrothermique reposent sur le même principe de conservation décrit par l'équation de continuité de différentielle suivant :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\nabla \cdot j + S \quad (26)$$

Dans cette équation, X représente le terme de stockage, J le terme de transport et S représente un terme source. Dans les sous parties suivantes, les détails des modèles de Kunzel [7], Philip et De Vries (Mends)[11, 12] et Luikov (1964)[13] sont présentés.

IV.1. Modèle de Kunzel

IV.1.1. Equation de conservation de masse

Kunzel [7] considère que la quantité physique qui décrit le stockage de masse est la teneur en eau w , le terme de transport est la somme du flux diffusif de vapeur et de liquide tandis que le terme source est une conséquence de la condensation et l'évaporation d'eau. Avec ces considérations, l'équation de continuité pour le transfert de masse devient :

[La variation de la teneur en eau dans la paroi] = [Flux massique diffusif entrant dans l'enveloppe]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (g_{v,diff} + g_{l,diff}) + S_m \quad (27)$$

S_m est le terme source de l'humidité, il est égal à la somme de la masse générée par évaporation et par condensation de la vapeur d'eau qui s'annulent à la fin

$$S_m = S_{evap} + S_{cond} = S_{evap} + (-S_{evap}) = 0 \quad (28)$$

En remplaçant les équations 18, 19 et 28 dans l'équation 27 on trouve l'équation de conservation de masse :

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi P_{sat})) + D_l \nabla \varphi \quad (29)$$

IV.1.2. Equation de conservation de chaleur

Selon Kunzel [7], la quantité physique qui décrit le stockage de chaleur est l'enthalpie du matériau humide H , le terme de transfert de chaleur est le flux thermique conductif tandis que le terme source est dû au processus d'évaporation-condensation de l'eau. Avec ces considérations, l'équation de continuité pour transfert de chaleur s'écrit :

[La variation de l'enthalpie totale de la paroi] = [Flux conductif diffusif] + [Source ou puit de la chaleur]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot q_{cond} + S_C \quad (30)$$

S_C est la source ou le puit de la chaleur, il traduit l'interaction entre le flux diffusif de la vapeur d'eau et le changement de phase dans le matériau humide, il est décrit par la relation suivante :

$$S_C = -l_v \nabla \cdot g_v \quad (31)$$

Où : l_v chaleur latente de vaporisation ($J.kg^{-1}$).

En remplaçant les équations 23, 24 et 31 dans l'équation 30 on trouve l'équation de conservation de chaleur écrite sous forme différentielle suivante :

$$(\rho_0 C_0 + w C_l) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + l_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi P_{sat})) \quad (32)$$

Les équations de conservation de l'humidité (équation 29) et de chaleur (équation 32) sont fortement couplées. Ce qui peut être observé dans la dépendance à la fois de la température et de l'humidité relative dans chaque équation.

IV.2. Modèle de Philip et De Vries (Mends)

Le modèle de Philip & De Vries [11, 12] vise à modéliser les transferts de masse et de chaleur dans les matériaux hygroscopiques en prenant en considération les flux diffusifs de la vapeur et de liquide comme des fonctions de la teneur en eau volumique et de la température. Ainsi, ils considèrent que le transfert thermique s'effectue que par conduction et par changement de phase. L'équation de continuité décrivant les transferts hygrothermiques sont :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot (q_v + q_l) \quad (33)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot (q_{cond}) - L_v \nabla \cdot (q_v) \quad (34)$$

La diffusion de vapeur d'eau sous gradient de température et de teneur en eau volumique est écrite par l'équation (35) :

$$q_v = -D_{T,v} \nabla T - D_{\theta,v} \nabla \theta \quad (35)$$

Avec : $D_{T,v}$: le coefficient de transfert de la vapeur d'eau sous l'action d'une différence de température ($m^2 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$), $D_{\theta,v}$: le coefficient de transfert de la vapeur d'eau sous l'action d'un gradient de la teneur en eau volumique ($m^2 \cdot s^{-1}$).

q_l représente le flux diffusif de l'eau liquide, il s'écrit selon Philip & De Vries sous la forme suivante:

$$q_l = -D_{T,l} \nabla T - D_{\theta,l} \nabla \theta \quad (36)$$

Où : $D_{T,l}$: le coefficient de transfert de l'eau liquide sous le gradient de température ($m^2 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$) et $D_{\theta,l}$: le coefficient de transfert de l'eau liquide sous le gradient de la teneur en eau volumique ($m^2 \cdot s^{-1}$)

Avec :

$$D_T = D_{T,v} + D_{T,l} \quad (37)$$

Et :

$$D_{\theta} = D_{\theta,v} + D_{\theta,l} \quad (38)$$

D_T : le coefficient de transport de masse lié à un gradient de température ($m^2 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$), D_{θ} : le coefficient de transport de masse lié à un gradient de la teneur en eau, $m^2 \cdot s^{-1}$;

D'où le terme de diffusion de l'eau devient :

$$q_v + q_l = -D_{\theta} \nabla \theta - D_T \nabla T \quad (39)$$

En remplaçant l'équation 39 dans l'équation 33, on trouve l'équation de transfert de masse selon l'approche de De Vries :

[La variation de la teneur en eau volumique dans la paroi] = [Flux massique diffusif de la vapeur et de liquide entant dans l'enveloppe]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\theta} \nabla \theta + D_T \nabla T) \quad (40)$$

En remplaçant les équations 23, 24 et 35 dans l'équation (34) on trouve l'équations de transfert thermique sous la forme suivante :

[La variation de l'enthalpie totale de la paroi] = [Flux conductif diffusif] + [Source ou puit de la chaleur]

$$(\rho_0 C_{p0} + \rho_l C_l \theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L_v \nabla \cdot (D_{T,v} \nabla T + D_{\theta,v} \nabla \theta) \quad (41)$$

IV.3. Modèle de Luikov

Le modèle de Luikov [13] est parmi les plus anciens modèles de transfert hygrothermiques les matériaux hygroscopiques. Luikove considère que le transport d'humidité s'effectue par thermo-diffusion et par gradient de teneur en eau massique. Ainsi le transfert thermique s'effectue par conduction et par changement de phase. Le modèle de Luikov est le suivant :

[La variation de la teneur en eau massique dans la paroi] = [Flux massique diffusif par gradient de teneur en eau massique et par thermo-diffusion]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D_m (\nabla u + \delta_s \nabla T)) \quad (42)$$

[La variation de l'enthalpie totale de la paroi] = [Flux conductif diffusif] + [Source ou puit de la chaleur]

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla T) + L_v \varepsilon \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \quad (43)$$

Avec : ρ_s : masse volumique du matériau (Kg.m^{-3}), D_m : coefficient de diffusion de masse ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), C_p : capacité thermique du matériau ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), L_v : chaleur latente de changement de phase (J.kg^{-1}), ε : Rapport entre le flux diffusif de la vapeur d'eau et le flux de masse total (-), δ_s : coefficient de thermo-diffusion [-].

V. Bilans massiques et thermiques de l'ambiance intérieure du bâtiment

La température et l'humidité relative d'une pièce climatisée sont calculées en considérant les gains de chaleur et de masse à travers les parois du bâtiment, les sources intérieures et les équipements HVAC etc...

V.1. Bilan thermique

La température intérieure du bâtiment climatisée est liée aux flux de chaleur dans la pièce. Elle est calculée en tenant en compte les gains ou pertes thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment, les sources internes et l'équipement HVAC (chauffage, ventilation et climatisation), ainsi que les échanges thermiques internes dues à la ventilation et à l'infiltration de l'air. Le bilan thermique peut s'écrire par l'équation suivante [14] :

[La variation de l'énergie interne de la pièce] = [flux de chaleur provenant de l'enveloppe] + [flux de chaleur dû à l'infiltration d'air] + [flux de chaleur dû aux systèmes HVAC] + [charges thermiques internes]

$$\rho_{air} c_p V_{in} \frac{dT_{in}}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{T_i} A_i (T_{si} - T_{in}) + n \rho_{air} c_p V_{in} (T_{ext} - T_{in}) + Q_{HVAC} + Q_{in} \quad (44)$$

Où ρ_{air} : masse volumique de l'air intérieur (kg.m^{-3}), h_{T_i} : coefficients de transfert thermique convectif ($\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$), T_{ext} : température de l'air extérieur (K), T_{si} : température de la surface i (K), T_{in} : température de l'air intérieur (K), t : temps (s), A : surface (m^2), C_p : chaleur spécifique de

l'air intérieur ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), n : taux d'infiltration d'air (h^{-1}), Q_{in} : gains internes des occupants, de la lumière et des équipements (W), Q_{HVAC} : flux de chaleur gagnés ou perdus grâce au système HVAC (W), V : volume (m^3).

V.2. Bilan massique

L'humidité dans la pièce est une conséquence des flux traversant l'enveloppe du bâtiment, du taux d'humidité produite par les occupants, des gains ou des pertes hydriques dus à l'infiltration d'air ainsi que des sources ou des puits d'humidité dus aux systèmes HVAC. Par conséquent, le bilan hydrique peut être écrit de la manière suivante [14]:

[La variation de l'humidité interne de la pièce] = [flux d'humidité provenant des surfaces intérieures] + [gains ou pertes d'humidité dus à l'infiltration d'air] + [sources ou puits d'humidité dus aux systèmes HVAC] + [production d'humidité interne]

$$V_{in} \frac{dv_{in}}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i g_{wi} + nV_{in} (v_{ext} - v_{in}) + M_{HVAC} + M_{prod} \quad (45)$$

Où : v_{ext} : taux d'humidité absolue de l'air extérieur ($kg.m^{-3}$), v_{in} : taux d'humidité absolue de l'air intérieur ($kg.m^{-3}$), g_{wi} flux d'humidité traversant la pièce par les surfaces ($kg.s^{-1}m^{-2}$), M_{prod} : production d'humidité ($kg.h^{-1}$), M_{HVAC} : gains ou pertes d'humidité dus au système HVAC ($kg.h^{-1}$).

V.3. Interaction enveloppe –air intérieur : Conditions aux frontières

L'échange de masse et de chaleur entre les parois du bâtiment et l'air ambiant est décrit par le biais des conditions aux limites. L'enveloppe du bâtiment est soumise aux conditions convectifs de masse et de chaleur aux surfaces extérieure et intérieure [7].

L'échange thermique sur une surface est basé sur la convection et le rayonnement et calculé au moyen de la formule suivante :

$$q_i = h_r (T_{si} - T_{in}) \quad (46)$$

Avec :

$$h_r = h_c + h_r \quad (47)$$

Où q_i est la densité de flux thermique échangé sur une surface i ($W \cdot m^{-2}$), h_c est le coefficient de transfert convectif ($W \cdot m^{-2}K^{-1}$), h_r est le coefficient de transfert radiatif ($W \cdot m^{-2}K^{-1}$), T_{in} est la température de l'air intérieur (K) et T_{si} est la température de surface i (K).

Le transfert de masse peut être décrit par une manière similaire à celle de chaleur au moyen de l'équation suivante :

$$g_{wi} = h_m (P_{si} - P_{in}) \quad (48)$$

Où g_{wi} est la densité de flux échangé ($kg \cdot m^{-2} s^{-1}$), h_m est le coefficient de transfert de la vapeur d'eau ($kg \cdot m^{-2} s^{-1} Pa^{-1}$), P_{in} est la pression de la vapeur de l'air (Pa) et P_{si} est la pression de la vapeur à la surface i (Pa).

VI. Choix de logiciel de simulation

Afin de réaliser une étude hygrothermique à l'échelle du bâtiment, le choix de logiciel de simulation se requiert. L'outil choisi pour la modélisation dans cette étude est le logiciel EnergyPlus. Le choix de cet outil comme programme de simulation est motivé par différentes raisons : comme décrit dans le chapitre I au paragraphe IV.1, EnergyPlus est un programme « open source », il est entièrement libre de droit et gratuit, il est utilisable par tous et ne requiert aucun investissement. En plus EnergyPlus est le logiciel le plus complet en termes de l'implémentation des modèles du bâtiment pour prédire les performances hygrothermiques et énergétiques des locaux. Son financeur est le département de l'énergie des États-Unis [15]. Les équations intégrées à EnergyPlus sont basées sur des transferts couplés de chaleur et de masse et sont similaires à celles de Wufi développées par Künzle. Ce modèle est appliqué à l'enveloppe hygroscopique du bâtiment pour l'évaluation de la performance thermique ainsi que le tampon hydrique de l'enveloppe du bâtiment [16]. De ce fait, dans les sections III, IV et V, les détails des modèles des transferts hygrothermiques qui ont lieu dans l'enveloppe ainsi qu'à l'air intérieur du bâtiment sont présentés.

VI.1. Outil de simulation thermique dynamique EnergyPlus

EnergyPlus est un outil de simulation conçu pour modéliser les bâtiments avec leurs équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation associés. Cependant, il s'exécute de manière autonome sans une interface graphique à l'aide du programme EP-Launch. Cette partie décrit comment exécuter EnergyPlus de manière autonome.

VI.1.1. EP-Launch

EP-Launch est un composant optionnel de l'installation d'EnergyPlus (il n'est pas disponible pour les plates-formes Linux et Mac). EP-Launch se trouve dans le répertoire principal d'EnergyPlus, en double-cliquant sur l'icône EP-Launch vous obtenez l'écran ci-dessous (figure II.6). En outre, EP-Launch aide à ouvrir un (IDF Editor), de sélectionner un fichier des données climatiques EPW (EnergyPlus weathre data) et à ouvrir une feuille de calcul pour les fichiers de résultats du post-processeur [15].

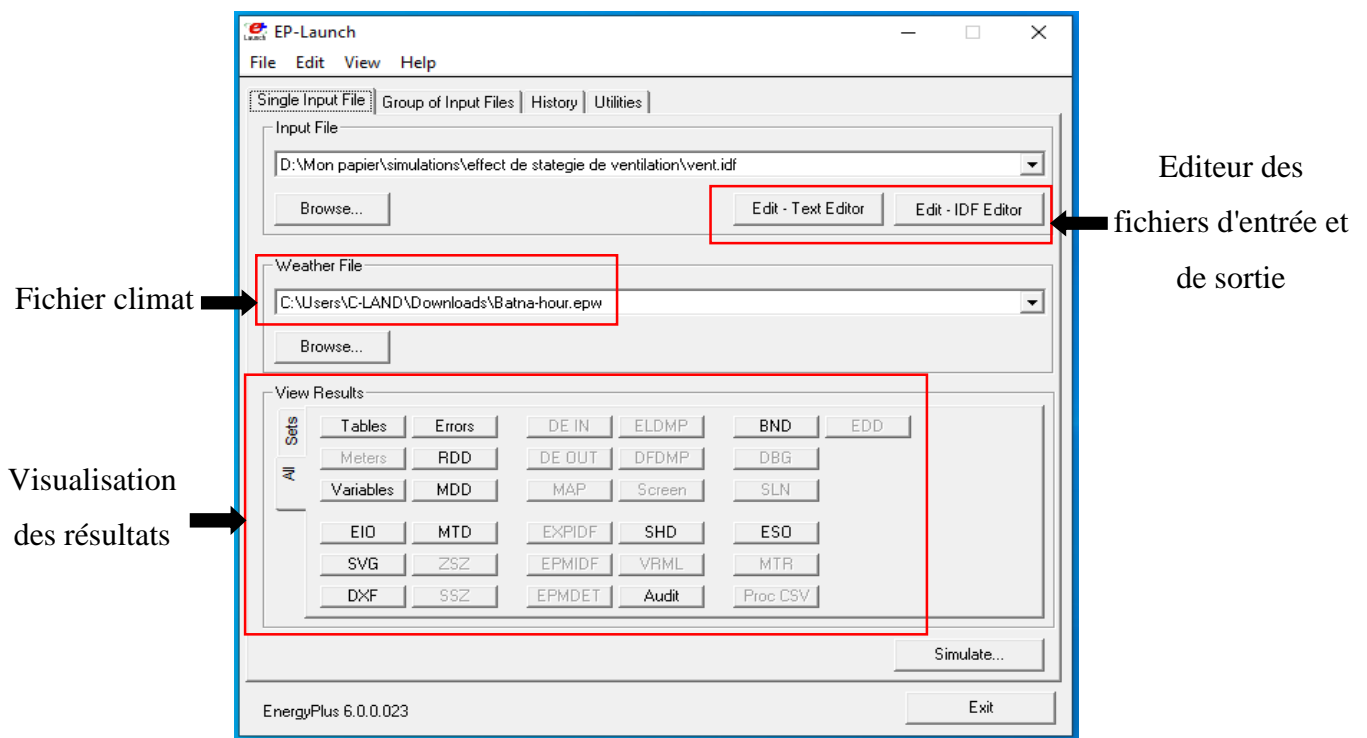


Figure II.6. Interface EP-launch.

VI.1.2. IDF Editor

L'éditeur IDF est un éditeur simple et « intelligent » qui lit le dictionnaire de données EnergyPlus (IDD) et permet la création et la révision des fichiers d'entrée d'EnergyPlus. C'est un moyen de la création ou de la modification des fichiers de données d'entrée EnergyPlus (IDF) (figure II.7). Il peut être exécuté à partir d'un raccourci dans le répertoire principal d'EnergyPlus (créé pendant de l'installation) ou directement depuis EP-Launch. L'éditeur IDF ne vérifie pas la validité des entrées, bien que certains champs numériques soient mis en surbrillance s'ils sont hors plage [15].

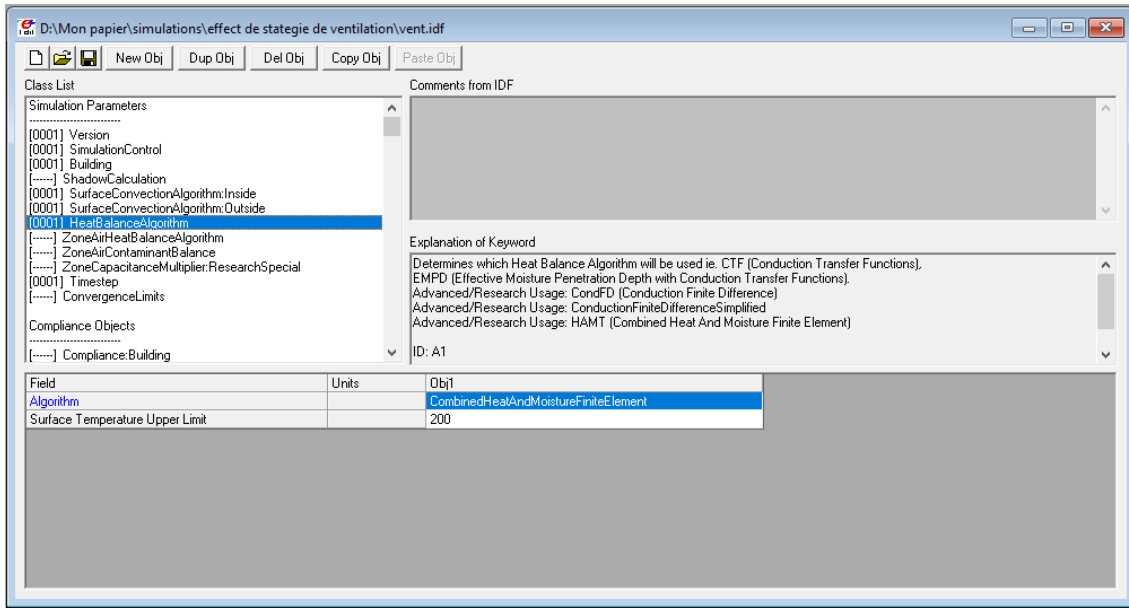


Figure II.7. Interface IDF Editor.

VI.2. Méthode de discrétisation et de solution

VI.2.1. Bilans de chaleur et de masse de l'air intérieur

EnergyPlus fournit trois algorithmes de solution différents pour résoudre le bilan thermique et massique de l'ambiance intérieure de la zone : 3rd Order Back ward Difference, Euler Method et Analytical Solution. Les deux premières méthodes utilisent la méthode des différences finies tandis que la troisième utilise une solution analytique pour résoudre les équations (44) et (45) [16]. Une courte description de la discrétisation est donnée ci-dessous. T^t indique la température au point i à l'instant t et Δt représentent les pas du temps. L'équation 44 est écrite sous la forme [16] :

$$\rho_{air} c_p V_{in} \frac{T_{in}^t - T_{in}^{t-\Delta t}}{\Delta t} = \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si}^{t-\Delta t} - T_{in}^t) + n \rho_{air} c_p V_{in} (T_{ext}^{t-\Delta t} - T_{in}^t) + Q_{HVAC} + Q_{in} \quad (49)$$

Un réarrangement de l'équation 49 consiste à déplacer la température vers le côté gauche donne l'apparence explicite de la température de l'ambiance intérieure par l'équation suivante :

$$T_{in}^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si}^{t-\Delta t} + n \rho_{air} c_p V_{in} T_{ext}^{t-\Delta t} + Q_{HVAC} + Q_{in} + \rho_{air} c_p V_{in} \frac{T_{in}^{t-\Delta t}}{\Delta t}}{\frac{\rho_{air} c_p V_{in}}{\Delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + n \rho_{air} c_p V_{in}} \quad (50)$$

Le bilan massique décrit par l'équation 45 est discrétisée comme suit :

$$V_{in} \frac{v_{in}^t - v_{in}^{t-\Delta t}}{\Delta t} = \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i g_{wi} + nV_{in} (v_{ext} - v_{in}^t) + M_{HVAC} + M_{prod} \quad (51)$$

Un réarrangement de l'équation consiste à déplacer l'humidité absolue vers le côté gauche, donne l'apparence explicite de l'humidité absolue de l'ambiance intérieur par l'équation suivante :

$$v_{in}^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i g_{wi} + nV_{in} v_{ext} + M_{HVAC} + M_{prod} + \frac{V_{in}}{\Delta t} v_{in}^{t-\Delta t}}{\frac{V_{in}}{\Delta t} + nV_{in}} \quad (52)$$

VI.2.2. Modèle hygrothermique pour les parois

Pour les parois du bâtiment les surfaces sont constituées de plusieurs couches de distincts matériaux. Chaque couche est divisée en cellules à travers sa profondeur. Le modèle HAMT peut générer plus de 10 cellules par matériau avec des largeurs très fines. T_i^t indique la température au point i à l'instant t , Δt et Δx représentent les pas du temps et de l'espace respectivement [16].

Pour le transfert thermique l'équation 32 peut être utilisée pour décrire le stockage et le transport thermique à travers la $i^{\text{ème}}$ cellule d'une surface. Sa discrétisation par la méthode des différences finies est donnée par l'équation suivante :

$$(\rho_0 C_0 + w C_l) \Delta V_i \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \lambda A \frac{T_j^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}}{\Delta x} + l_v \cdot \delta_p A \frac{P_j^{t+\Delta t} - P_i^{t+\Delta t}}{\Delta x} \quad (53)$$

Dans le cas unidimensionnel, il n'y a que deux cellules adjacentes chacune est notée j . La chaleur générée par la vaporisation de l'eau q_i peut être calculée séparément comme suit :

$$q_i^v = l_v \cdot \delta_p A \frac{P_j^{t+\Delta t} - P_i^{t+\Delta t}}{\Delta x} \quad (54)$$

Un réarrangement de l'équation 53 donne la température dans une cellule au pas de temps suivant :

$$T_i^{t+\Delta t} = \frac{\lambda A \frac{T_j^{t+\Delta t}}{\Delta x} + q_i^v + (\rho_0 C_0 + w C_l) \Delta V_i \frac{T_i^t}{\Delta t}}{\frac{(\rho_0 C_0 + w C_l) \Delta V_i}{\Delta t} + \frac{\lambda A}{\Delta x}} \quad (55)$$

L'humidité est transportée à travers les matériaux sous forme de liquide et de vapeur. Il existe deux potentiels différents qui conduisent le mouvement de l'humidité à travers le matériau. Le transfert de l'eau liquide est entraîné par une différence d'humidité relative tandis que le transfert de la vapeur d'eau est entraîné par une différence de pression partiel de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur. L'équation 56 peut être écrite pour une cellule discrète dans le matériau continu comme suit :

$$\frac{dw}{d\varphi_i} \Delta V_i \frac{\varphi_i^{t+\Delta t} - \varphi_i^t}{\Delta t} = \delta_p A \frac{P_j^{t+\Delta t} - P_i^{t+\Delta t}}{\Delta x} + D_\varphi A \frac{\varphi_j^{t+\Delta t} - \varphi_i^{t+\Delta t}}{\Delta x} \quad (56)$$

La pression partielle de la vapeur d'eau dépend de l'humidité relative et la pression de vapeur saturante comme suit :

$$P_i^{t+\Delta t} = \varphi_i^{t+\Delta t} P_i^{sat} \quad (57)$$

L'équation 56 peut être réarrangée pour fournir l'humidité relative de la $i^{\text{ème}}$ cellule au pas du temps $t + \Delta t$ comme suivant :

$$\varphi_i^{t+\Delta t} = \frac{D_l A \frac{\varphi_j^{t+\Delta t}}{\Delta x} + \delta_p A \frac{P_j^{t+\Delta t}}{\Delta x} + \frac{dw}{d\varphi_i} \Delta V_i \frac{\varphi_i^t}{\Delta t}}{\frac{dw}{d\varphi_i} \frac{\Delta V_i}{\Delta t} + \frac{D_l A}{\Delta x} + \frac{\delta_p A P_i^{sat}}{\Delta x}} \quad (58)$$

L'équation 58 peut être utilisée avec l'équation de la chaleur (55) dans une alternance pas à pas de manière à calculer les nouveaux profils de température et d'humidité relative pour chaque cellule et pour le pas de temps $t + \Delta t$.

VII. Validation du modèle HAMT pour des enveloppes hygroscopiques

Pour la vérification du modèle HAMT deux méthodes ont été choisies. Dans la première, une validation expérimentale du modèle HAMT en utilisant une cellule à base de béton de bois de

palmer dattier a été effectuée. Dans la deuxième, une validation analytique en utilisant le test CE1 de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie a été réalisée. Les mêmes conditions ont été utilisées pour la simulation pour de comparer les résultats obtenus aux données expérimentales et analytiques. Ces travaux ont été sélectionnés puisqu'ils possèdent des informations complètes essentielles pour reproduire la simulation hygrothermique à l'échelle du bâtiment.

VII.1. Validation expérimentale

Le but de cette partie de chapitre est de prouver que le modèle utilisé est bien adapté pour la simulation du comportement hygrothermique des murs en DPC. Ceci a été réalisé en utilisant un banc expérimental construit en laboratoire par Chennouf *et al.* [6] pour montrer la capacité du mur DPC à atténuer les variations périodiques de la température et de l'humidité relative. Benzaama *et al.* [17] ont utilisé cette même investigation expérimentale. Où les résultats mesurés sont employés pour estimer les paramètres linéaires de conduction ainsi que pour valider le modèle PWARX. Le banc expérimental comporte une paroi en DPC installée entre deux environnements ; l'humidité relative et la température sont contrôlées dans le premier, tandis que le second est laissé sans contrôle. Cette méthode permet d'évaluer l'impact des transferts hygrothermiques sur la réponse de l'environnement intérieur et de valider les outils de simulation.

Le dispositif expérimental est constitué d'une enceinte climatique de type HPP750 Memmert servant à réguler la température et l'humidité relative extérieures de la cellule passive où la température et l'humidité relative sont mesurées (figure II.8). La cellule passive de 50 cm x 50 cm de côté et de 15 cm d'épaisseur est isolée pour réduire les échanges de chaleur et de masse avec l'environnement extérieur, sauf sur une façade avant. La température et l'humidité relative ont été mesurées et contrôlées au centre de la cellule à l'aide des capteurs DKRF400 (plage de mesure de l'humidité relative (HR) : 0 - 100 % avec une erreur de 1.8 % ; et de température (T) : -40 - +45 °C avec une erreur de 0.5 °C). Les autres capteurs installés dans le mur à des profondeurs de 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm ne sont pas présentés car ils ne font pas l'objet de cette recherche.

Pour valider expérimentalement le modèle HAMT utilisé dans ce travail, et après un pré-conditionnement du système à 23°C et 50%, la cellule passive a été soumise à des variations simultanées de température et d'humidité relative. Cependant, les conditions hygrothermiques

à l'intérieur de la cellule ne sont pas contrôlées. L'expérience a commencé par des augmentations progressives de la température extérieure et des baisses de l'humidité relative, qui ont été maintenues pendant 12 heures, atteignant respectivement 40 °C et 33 %. La température et l'humidité relative ont ensuite changé à nouveau, atteignant respectivement 18 °C et 75 %. Ce réglage a été maintenu et fixé pendant encore 12 heures avant de redémarrer le cycle. L'humidité relative et la température expérimentales imposées par la chambre climatique sont illustrées dans la figure II.9.

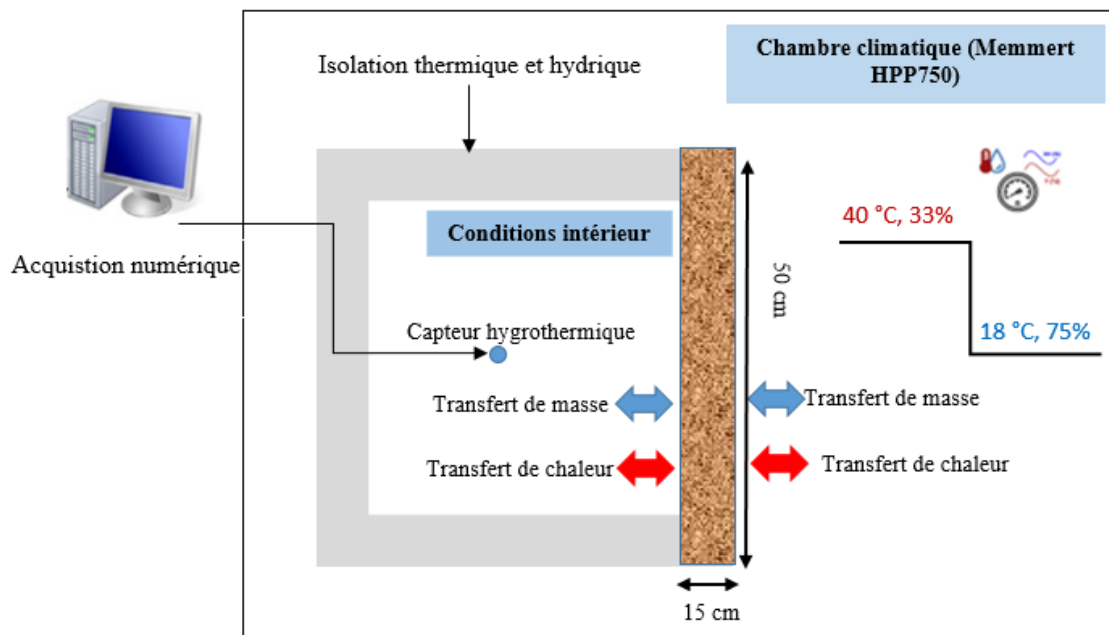


Figure II.8. Schéma du banc expérimental.

Les mesures expérimentales ainsi que les valeurs numériques issues du modèle HAMT utilisé dans ce travail sont illustrées dans la figure II.9 (a et b). Pour la température, on peut remarquer que l'air intérieur montre un fort amortissement par rapport aux conditions extérieures. Ceci est lié à la faible diffusivité thermique qui atténue les variations de température extérieure et empêche les phénomènes de surchauffe. La comparaison entre les résultats numériques proposés par le modèle HAMT et les données mesurées est illustrée à la figure II.9 (b). On peut remarquer que la température intérieure obtenue par le modèle HAMT semble être en bon accord avec les mesures, avec un écart maximum de 1.5 °C.

Regardons le transfert d'humidité, les résultats montrent que les changements de l'humidité relative à l'intérieur de la cellule passive ne sont pas influencés par les conditions extérieures. En outre, un bon accord entre les simulations numériques et les données expérimentales a été trouvé (une différence maximale inférieure à 2.4%). L'humidité relative simulée est légèrement inférieure à l'humidité relative mesurée. Cette différence mineure pourrait s'expliquer par l'erreur des mesures des propriétés hygrothermiques de DPC utilisées comme données d'entrée dans le modèle HAMT, par la précision des capteurs ($\pm 1.8\%$ pour l'humidité relative et $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température). Par conséquent, les résultats obtenus peuvent être considérés comme exactes et le modèle HAMT est adéquat pour étudier le comportement hygrothermique du DPC à l'échelle du bâtiment.

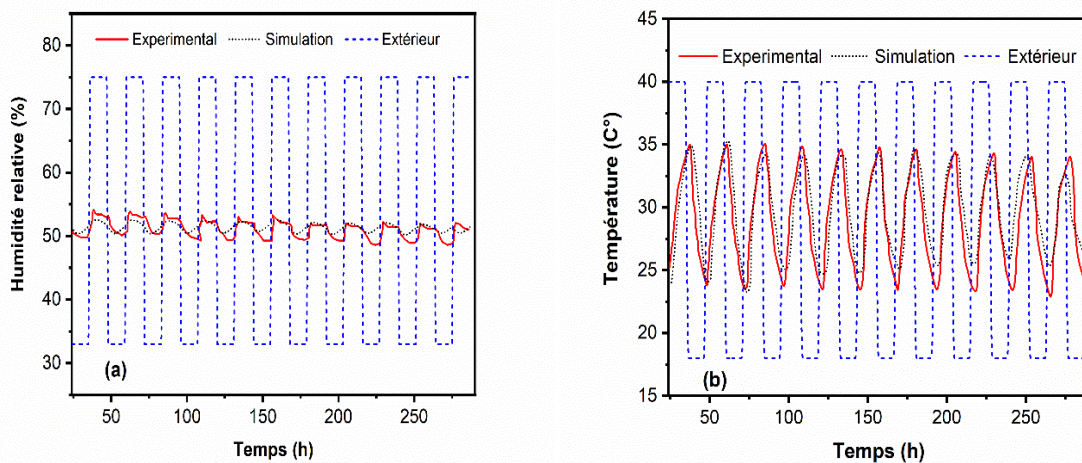


Figure II.9. Validation du modèle HAMT en utilisant données expérimentales : (a) humidité relative et (b) température.

Le degré de précision du modèle HAMT intégré dans le logiciel EnergyPlus a été validé expérimentalement pour des matériaux hygroscopiques dans de nombreux travaux de recherche de la littérature [14, 18, 19]. Les résultats de simulation du modèle HAMT pour l'humidité relative et pour la température ont été comparés aux mesures expérimentales d'un bâtiment à ossature bois qui se situe dans le sud-est de la France (Grenoble) [20]. Dans cette étude, plusieurs capteurs ont été installés dans l'air intérieur et à plusieurs endroits à l'intérieur des murs. Un bon accord entre les valeurs mesurées et prédites pour la température et pour l'humidité relative à différents endroits du mur et dans l'air intérieur a été trouvé [18]. En outre, le modèle HAMT de logiciels ENERGYPLUS a été également validé par Qin *et al.*[14], en

utilisant des données expérimentales d'une chambre d'un immeuble construit en 2000 situé en Chine (Nanjing). Les résultats numériques montrent que la température de l'air intérieur est en bon accord avec les données mesurées, avec une erreur relative moyenne d'environ 3 %. Quant à la simulation de l'humidité relative intérieure, les résultats numériques montrent un bon accord avec les résultats mesurés avec une erreur relative moyenne inférieure à 9%. Un autre travail a été établi par Yu *et al.*[19] pour vérifier la fiabilité de l'outil numérique Energyplus, en simulant un bâtiment réel testé par Zhang *et al.* [21] dans lequel une série de tests expérimentaux sur deux salles réelles (salle A et salle B) a été réalisée. L'objectif était d'étudier l'effet de tampon d'humidité du panneau de vermiculite en tant que type de matériau hygroscopique. La figure II.10 montre la comparaison entre les données de la simulation et de la mesure. L'erreur relative moyenne du modèle de simulation était d'environ 2.5 %. Selon les auteurs de la référence [19], la précision du modèle HAMT est suffisante et l'outil de simulation pouvait être appliqué.

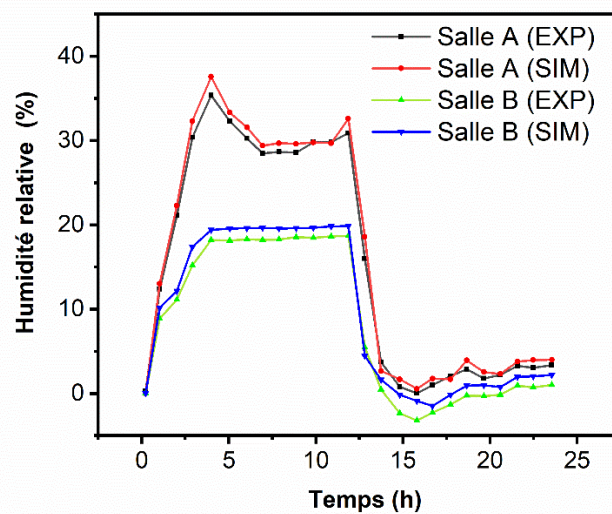


Figure II.10. Comparaison entre les résultats expérimentaux (*EXP*) et numériques (*SIM*) de l'humidité relative intérieure [19].

VII.2. Validation analytique

Le modèle HAMT du logiciel Energyplus a été déjà vérifié dans la littérature [14, 18, 19]. Cependant, pour plus de confiance aux résultats obtenus dans les parties suivantes ; la validation analytique du modèle HAMT est réalisée dans cette section. La vérification est établie en comparant la solution numérique à une solution analytique précise des équations différentielles

avec quelques simplifications (bâtiment monocouche sans fenêtre, même condition de température pour l'ambiance intérieure et extérieure avec un taux de ventilation constant). Ce cas d'étude a été réalisé dans le cadre du projet international « Annexe 41 » de IEA [22]. Dans ce test, l'humidité relative interne d'un local simple a été évaluée analytiquement. Le local choisi présente une pièce fermée de volume de 129.6 m^3 ($6 \times 8 \times 2.7 \text{ m}^3$). L'enveloppe du local (murs, plancher et toiture) est constituée d'une monocouche de béton cellulaire de 15 cm d'épaisseur. La figure II.11 montre le modèle architectural (Sketchup et Openstudio) du bâtiment d'étude. Les propriétés hygrothermiques du béton cellulaire sont présentées dans le tableau II.4.

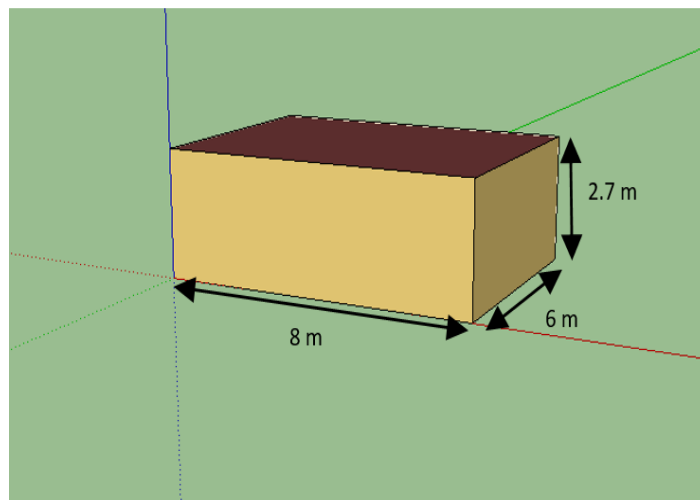


Figure II.11. Géométrie du bâtiment.

Tableau II.4: Propriétés hygrothermiques du béton cellulaire [23].

Propriété	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	C_p [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kg m^{-3}]	W [kg/m^3]	δ_p [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$]
Valeur	0.18	840	650	$42.965 \times \varphi$	3×10^{-11}

La validation de logiciel de simulation consiste à refaire l'exercice en prenant en considération les mêmes conditions initiales et aux frontières que la solution analytique. C'est une condition isotherme avec absence de transfert radiatifs. L'humidité relative et la température extérieure sont fixées à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et à 30% respectivement. La température de l'air intérieur est fixée à $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Une génération d'une masse d'eau quotidienne dans la pièce de 0.5 kg.h^{-1} entre 9h00 et 17h00 et un renouvellement d'air avec un taux constant de 0.5 ACH sont proposés. Les conditions initiales des parois et de l'air intérieur sont fixées à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et à 30% respectivement. La validation a été effectuée pour deux cas :

- Cas 0A, un pare-vapeur est utilisé sur la surface interne des parois afin d'arrêter le transfert hydrique de l'intérieur vers l'extérieur.
- Cas 0B sans pare-vapeur, dans ce cas le transfert d'humidité est autorisé.

Les résultats numériques de l'humidité relative sont comparés avec la solution analytique proposée dans l'annexe 41 [24] comme montré dans la figure II.12.

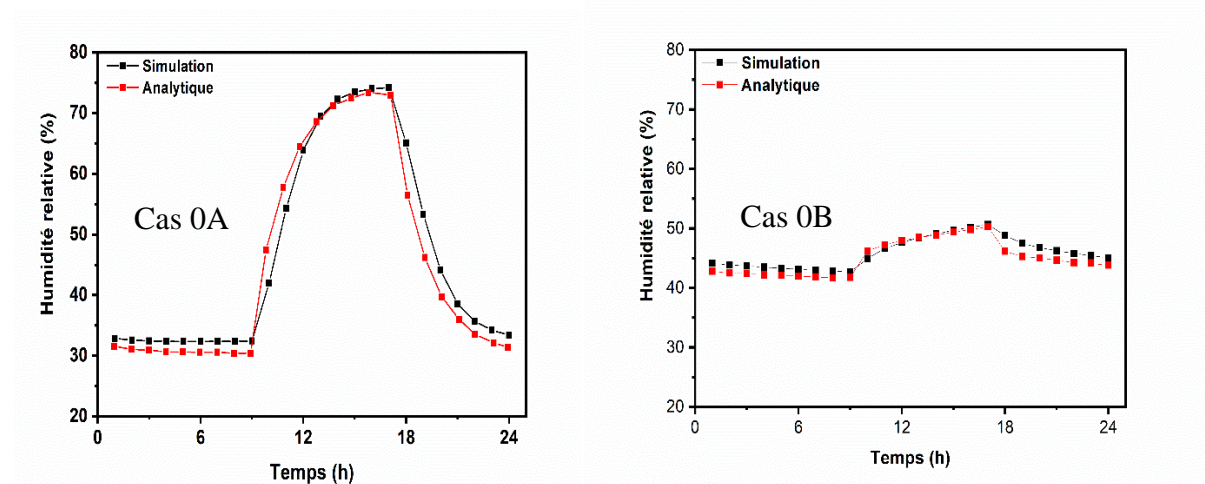


Figure II.12. Confrontation de la solution analytique et de la simulation pour les deux Cas : Cas 0A et Cas 0B.

On peut observer qu'il y a un bon accord entre la solution numérique obtenue par le logiciel Energyplus et les valeurs analytiques. Le modèle HAMT peut bien prédire les échanges hydriques entre l'enveloppe et l'air intérieur de la pièce. On peut remarquer que l'humidité relative de l'air intérieur passe de 41.74% à 50.24% pour le cas 0B et de 30.93% à 73% pour le cas 0A pendant la période de génération de la vapeur d'eau (9h00 à 17h00). L'humidité relative diminue ensuite en raison du renouvellement d'air exigé et de l'absence de génération d'humidité dans la pièce (17h00 à 9h00). La valeur élevée de l'humidité pour le cas 0A est due à l'absence d'adsorption de la vapeur générée dans la pièce à travers les parois du local en raison de la présence du pare-vapeur.

En complément, la figure II.13 montre le résidu pour l'humidité relative intérieure. Le résidu est calculé comme suit :

$$R(t) = \varphi_{simulation}(t) - \varphi_{analytique}(t) \quad (59)$$

La solution numérique issue du logiciel Energyplus est en accord avec les résultats analytiques. Pour le cas 0B, où le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment est pris en compte, le résidu moyen de l'humidité relative intérieure est approximativement égal à 0.91 %. Pour le cas 0A, l'accord entre les valeurs numériques et analytiques est moins bon que le cas 0B avec un résidu moyen d'environ 1.6 %. Cette différence est peut-être due au pare-vapeur qui bloque le transfert d'humidité. Or le modèle HAMT est établi pour prédire le transfert couplé de chaleur et d'humidité.

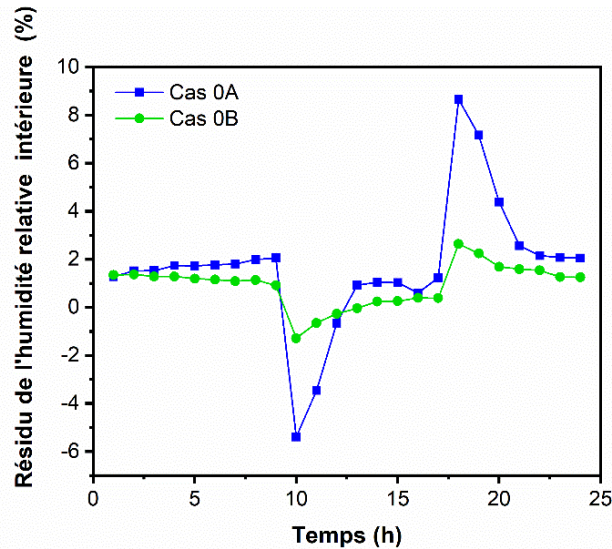


Figure II.13. Résidu de l'humidité relative intérieure.

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation du transfert de masse et de chaleur à l'échelle du bâtiment a été présentée. Premièrement, les grandeurs définissant un matériau hygroscopique ainsi que les différents mécanismes mis en jeu lors du stockage et de transfert hygrothermique ont été abordés. Par la suite on a présenté les modèles de transfert de masse et de chaleur au sein de l'enveloppe ainsi que les bilans thermiques et hydriques de l'ambiance intérieure du bâtiment. Ultérieurement, le choix de l'outil de simulation a été justifié et sa méthode de discrétisation a été présentée. Finalement, la validation de modèle hygrothermique a été effectuée expérimentalement et analytiquement. Les résultats montrent que la précision du modèle HAMT était suffisante et l'outil de simulation pourrait être appliqué pour l'étude des matériaux hygroscopiques comme le DPC à l'échelle du bâtiment. Pour cela, le troisième chapitre étudiera

le comportement hygrothermique d'un bâtiment conçu en béton de bois de palmier dattier (DPC) à l'aide du modèle HAMT.

References

- [1] 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.
- [2] Y. Aït Ouméziane, "Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre," INSA, Rennes, 2013.
- [3] D. J. Bellini, "transport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire," Université de Grenoble), 1992.
- [4] A. Musy, and Soutter, M. , " physique du sol," 1991.
- [5] G. Costantine, "EOPEBEC-Etude et optimisation des performances énergétiques d'une enveloppe en béton de chanvre pour le bâtiment," Reims, 2018.
- [6] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 348-356, 2018.
- [7] H. M. Künzeli, "Simultaneous heat and moisture transport in building components," *One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart*, vol. 65, 1995.
- [8] 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.
- [9] B. Haba, "Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques des matériaux biosourcés et locaux," UB1, 2017.
- [10] Y. A. Oumeziane, "Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre," INSA de Rennes, 2013.
- [11] J. Philip and D. De Vries, "Moisture movement in porous materials under temperature gradients," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 38, no. 2, pp. 222-232, 1957.
- [12] G. H. Dos Santos and N. Mendes, "Combined heat, air and moisture (HAM) transfer model for porous building materials," *Journal of building physics*, vol. 32, no. 3, pp. 203-220, 2009.
- [13] A. V. Luikov, "Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies," *International Journal of Heat and mass transfer*, vol. 18, no. 1, pp. 1-14, 1975.
- [14] J. Yang, H. Fu, and M. Qin, "Evaluation of different thermal models in EnergyPlus for calculating moisture effects on building energy consumption in different climate conditions," *Procedia Engineering*, vol. 121, pp. 1635-1641, 2015.
- [15] EnergyPlus, "Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual Essential Information you need about Running EnergyPlus," Technical report 2013.

- [16] EnergyPlus, "EnergyPlus Engineering Reference," 2011, Available: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineer>
- [17] M.-H. Benzaama, L. Rajaoarisoa, F. Boukhelf, and Y. El Mendili, "Hygrothermal transfer modelling through a bio-based building material: Validation of a switching-linear model," *Journal of Building Engineering*, p. 104691, 2022.
- [18] C. Spitz, M. Woloszyn, C. Buhé, and M. Labat, "Simulating combined heat and moisture transfer with EnergyPlus: An uncertainty study and comparison with experimental data," in *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 2013*, pp. 668-676.
- [19] S. Yu, Y. Cui, Y. Shao, and F. Han, "Research on the comprehensive performance of hygroscopic materials in an office building based on energyplus," *Energies*, vol. 12, no. 1, p. 191, 2019.
- [20] A. Piot, M. Woloszyn, J. Brau, and C. Abele, "Experimental wooden frame house for the validation of whole building heat and moisture transfer numerical models," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 6, pp. 1322-1328, 2011.
- [21] H. Zhang, H. Yoshino, K. Hasegawa, J. Liu, W. Zhang, and H. Xuan, "Practical moisture buffering effect of three hygroscopic materials in real-world conditions," *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 214-223, 2017.
- [22] M. C. Woloszyn, R. J. E. C. i. B. Carsten, and I. E. A. Community Systems", "R." IEA Annex 41, MOIST-ENG Subtask 1-Modelling Principles and Common Exercises," 2007.
- [23] M. K. KUMARAN, "Iea annex 24 final report, vol. 3, task 3: Material properties. IEA," Acco Leuven 1996.
- [24] T. Bednar and C. Hagentoft, "Analytical solution for moisture buffering effect validation exercises for simulation tools," in *Nordic building physics symposium*, 2005, pp. 13-15.

**Chapitre III : Evaluation
des performances
hygrothermiques d'un
bâtiment en DPC sous
différentes conditions
climatiques**

I. Introduction

Après la présentation et la validation du modèle de prédiction du comportement hygrothermique des bâtiments dans le chapitre précédent, une évaluation du comportement hygrothermique d'un local conçu en DPC sera effectuée dans le présent chapitre. Dans un premier temps, le modèle validé sera utilisé pour étudier l'influence du transfert massique sur l'humidité de l'air intérieur, la température et les besoins énergétiques du bâtiment en DPC en périodes d'hiver et d'été. Par la suite, le bâtiment en DPC sera comparé à un bâtiment réalisé avec un matériau conventionnel (béton cellulaire autoclavé ; AAC) sous différentes conditions climatiques en Algérie. Cette comparaison sera effectuée en termes d'inertie thermique et du confort, de régulation hydrique, d'économie d'énergie et de risque de condensation superficielle.

II. Description du cas d'étude

Dans ce travail, l'effet du transfert couplé de chaleur et de masse sur le comportement hygrothermique d'une pièce en béton de bois de palmier dattier (DPC) à l'échelle du bâtiment va être étudié. Pour cela, le bâtiment test de la simulation énergétique (Building energy simulation test ; BESTEST) a été choisi pour l'étude. Ce bâtiment est référencé dans la norme ASHRAE 140 [1] et utilisé dans le cadre de l'annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie IEA (International Energy Agency) [2], il s'agit d'une pièce fermée de volume de 129.6 m^3 ($6 \times 8 \times 2.7 \text{ m}^3$) avec des murs extérieurs de 20 cm d'épaisseur en DPC. La façade sud possède deux fenêtres identiques avec double vitrage, tandis que les autres façades ne sont pas exposées au soleil. La géométrie de ce bâtiment est illustrée dans la figure III. 1. Un taux de ventilation de 0.5 ACH est considéré avec les coefficients de transfert de chaleur et de masse suivants :

- Coefficients de transfert de chaleur : $h_{T,e} = 29 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1})$ pour la surface externe et $h_{T,i} = 8 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1})$ pour la surface interne.
- Coefficients de transfert de masse : $h_{m,e} = 6.25 \times 10^{-8} \text{ (kg.Pa}^{-1}\text{s}^{-1}\text{ m}^{-2})$ pour la surface externe et $h_{m,i} = 2 \times 10^{-8} \text{ (kg.Pa}^{-1}\text{s}^{-1}\text{ m}^{-2})$ pour la surface interne.

Les propriétés hygrothermiques du DPC utilisées pour les simulations sont détaillées dans le chapitre II.

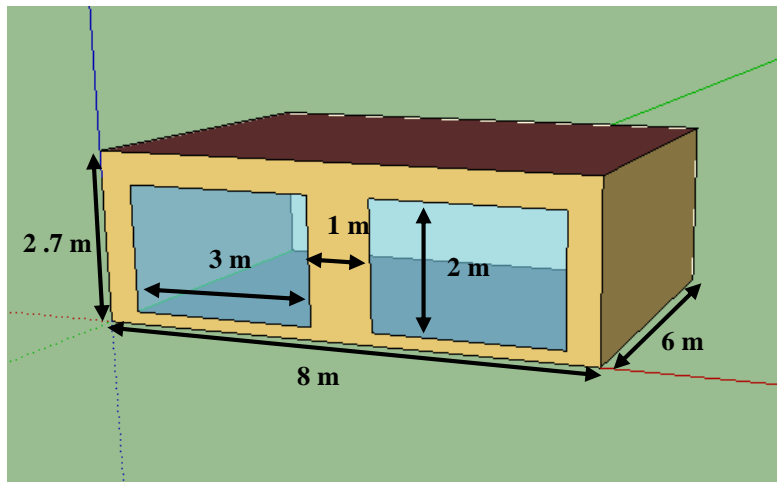
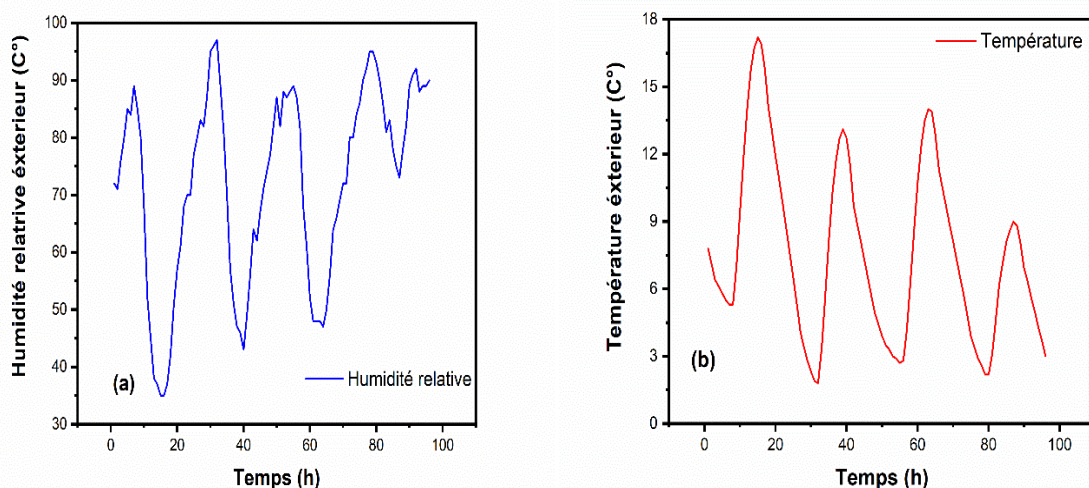
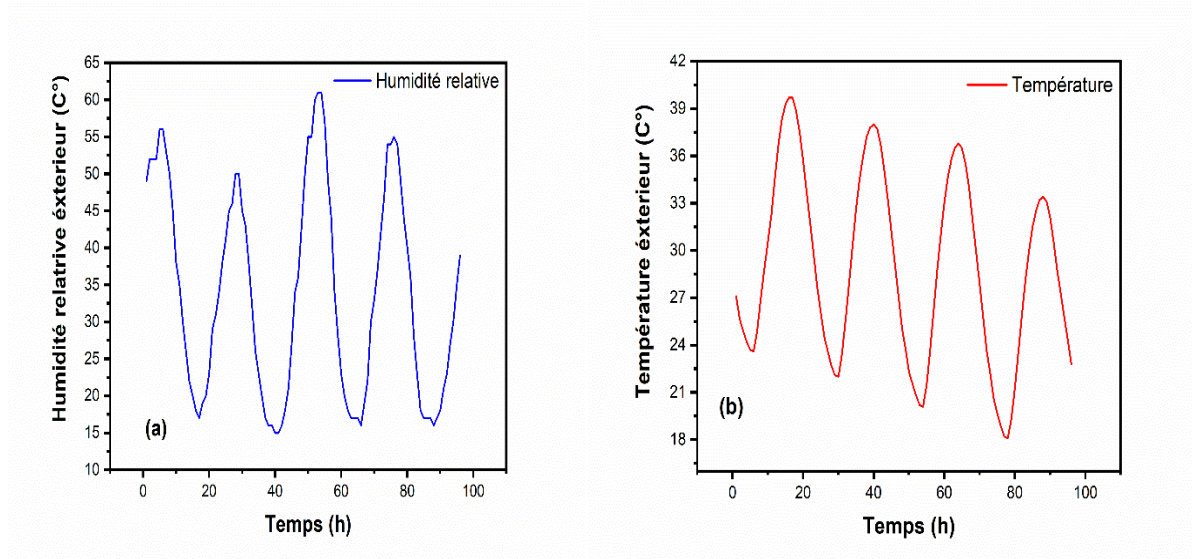


Figure III.1. Géométrie du bâtiment choisi pour l'étude.

La simulation a été réalisée avec le logiciel EnergyPlus sous des conditions climatiques réelles de la région de Batna (Est de l'Algérie). Les données climatiques horaires de cette région ont été extraites du logiciel Métronorme [3]. Les figures III.2 et III.3 présentent les conditions environnementales extérieures de cette région en termes de température et d'humidité relative pour quatre jours typiques d'hiver (Janvier du 1^{er} au 4) et d'été (Juillet du 23 au 26). On peut remarquer que la région de Batna possède un climat semi-aride qui est chaud et sec en été, où la température monte jusqu'à 40°C et l'humidité relative peut chuter en dessous de 15% et froid et humide en hiver, où la température descend à 0° C et l'humidité relative pourrait augmenter jusqu'à 95 %.



Figures III.2. Conditions extérieures de la région de Batna en période d'hiver (Janvier du 1^{er} au 4) : (a) humidité relative et (b) température.



Figures III.3. Conditions extérieures de la région de Batna en période d'été (Juillet du 23 au 26) : (a) humidité relative et (b) température.

III. Effet du transfert couplé de chaleur et de masse sur le comportement hygrothermique et la consommation énergétique d'un bâtiment en DPC

Le but de cette section est d'étudier l'effet du transfert couplé de masse et de chaleur sur (i) la température de l'air intérieur, (ii) l'humidité relative et (iii) la consommation d'énergie du bâtiment en DPC. Ceci est effectué en comparant deux cas d'études. Dans le premier cas, le modèle HAMT ainsi validé dans le chapitre II et l'ensemble des propriétés hygrothermiques du DPC à l'état humide sont utilisés pour simuler les phénomènes d'absorption-désorption de la vapeur d'eau par l'enveloppe du bâtiment. Dans le deuxième cas, le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment n'est pas pris en compte (simulation sans utilisation du modèle HAMT). Dans ce cas, aucun transport d'humidité n'est pris en compte, le modèle est décrit uniquement par l'équation de transfert de chaleur avec les propriétés sèches du matériau. La description détaillée des deux cas de test est présentée dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Description des cas de simulation.

Cas 1	Simulation avec considération du transfert couplé de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment.
Cas 2	Simulation sans considération du transfert couplé de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment.

Cette section d'étude est divisée en deux parties : dans la première partie, le bâtiment en DPC est considéré comme passif (pas de chauffage, pas de climatisation ni de régulation hydrique) et dans la deuxième partie le bâtiment est considéré climatisé. Par ailleurs, dans chaque partie on va simuler des conditions hivernales et estivales.

III.1. Bâtiment passif (non climatisé)

Tout d'abord, pour étudier l'effet du transfert couplé d'humidité et de chaleur sur les conditions intérieures sans aucune régulation thermique ou hydrique. Les simulations sont déroulées pendant quatre jours typiques d'hiver (du 1^{er} au 4 janvier) et d'été (du 23 au 26 juillet).

III.1.1. Conditions hivernales

Les variations horaires de l'humidité relative et de la température pour les deux cas en période d'hiver (du 1^{er} au 4 Janvier) sont présentées dans la figure III.4 (a) et (b). On peut constater que le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment a un impact important sur la prédiction de l'humidité relative intérieure et qu'il atténue sa variation. Dans le cas 1 où le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment est pris en compte, l'humidité relative intérieure ne dépasse pas 62 %. Cependant, dans le cas 2 où les transferts d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment ne sont pas considérés, l'humidité relative intérieure fluctue entre 50 % et 75 %. Ce résultat montre la capacité d'adsorption-désorption de l'enveloppe DPC contribuant à réguler l'humidité intérieure. Le DPC absorbe la vapeur d'eau lorsque l'humidité de l'air intérieur est élevée, qui se condense et se fixe sur les surfaces de ses pores sous forme de vapeur et d'eau liquide. Par la suite, la masse d'eau stockée dans l'enveloppe de DPC sera désorbée dans l'air intérieur lorsqu'il sera sec.

Pour la température, les résultats montrent que la température de l'air intérieur est quasiment la même dans les deux cas. Cela signifie que le transfert d'humidité à travers l'enveloppe DPC n'affecte pas la température de l'air intérieur en hiver. Ainsi, les besoins de chauffage ne seront pas significativement affectés, comme montré dans la section III.2. Des résultats similaires sont rapportés par Qin *et al.* [4]. Où l'effet du transfert massique sur l'humidité de l'air intérieur, la température et la consommation d'énergie a été étudié pour deux types de climat : climat chaud et humide (Hong Kong, Chine) et climat tempéré (Paris, France). Les résultats de cette étude confirment que le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment n'affecte pas significativement la température intérieure contrairement à l'humidité relative.

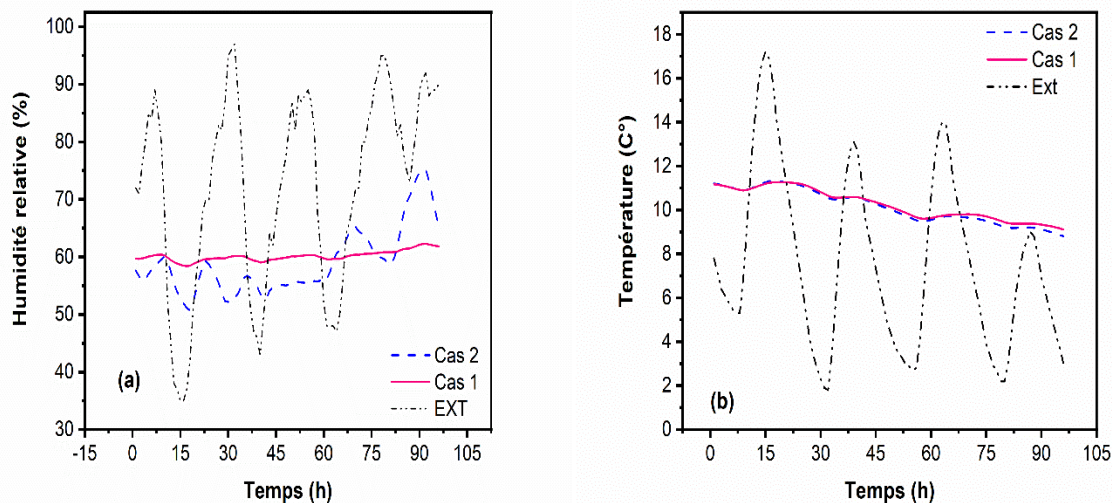


Figure III.4. (a) Humidité relative intérieure et (b) température simulées du bâtiment non climatisée (du 1^{er} au 4 Janvier).

III.1.2. Conditions estivales

Les conditions hivernales de Batna ne peuvent pas être représentatives du climat annuel de cette région. Par conséquent, la simulation hygrothermique a été répétée pour des conditions estivales pendant quatre jours typiques (du 23 au 26 Juillet). Les résultats numériques de l'humidité relative intérieure et la température intérieure pour la période de simulation considérée sont présentées dans la figure III.5 (a) et (b). Dans le cas 1, l'humidité relative intérieure minimale reste supérieure à 52 %. Cependant, dans le cas 2, l'humidité relative intérieure peut chuter en dessous de 30 %. Par conséquent, le risque de problèmes respiratoires augmente. Par conséquent, une procédure d'humidification supplémentaire pourrait être utilisée dans ce cas. Ce résultat est dû aux phénomènes de désorption dans l'enveloppe en DPC qui libèrent de l'humidité dans l'air tout en régulant l'humidité relative intérieure du bâtiment. En outre, les résultats de la température de l'air intérieur pour les deux cas étudiés révèlent que le transfert d'humidité dans le matériau de construction a un effet plus important sur la température en été qu'en hiver. La température de l'air intérieur dans le cas 1 est inférieure à celle du cas 2 avec une différence de 0.8 C°. Cette différence peut être due au processus de désorption endothermique dans l'enveloppe hygroscopique, où les matériaux de construction absorbent la chaleur de l'air intérieur en diminuant la température de l'air intérieur dans le cas 1.

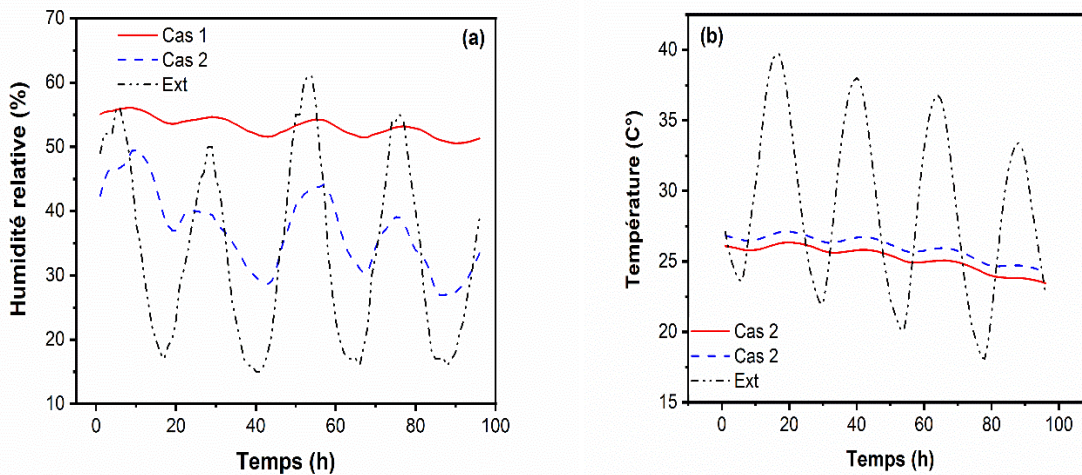


Figure III.5. Humidité relative intérieure (a) et température (b) simulées du bâtiment non climatisé (du 23 au 26 Juillet).

Nous pouvons conclure de cette section que le transfert d'humidité à travers les murs du bâtiment a un effet important sur l'humidité relative intérieure en conditions estivales et hivernales. L'enveloppe en DPC montre une capacité d'adsorption-désorption importante contribuant à réguler l'humidité intérieure et à améliorer le confort humain et la qualité de l'air intérieur. De plus, la température de l'air intérieur est quasiment là même dans les deux cas (avec est sans considération du transfert hydrique à travers les paroi) en période d'hiver. Contrairement à l'été, la température est légèrement affectée par le transfert d'humidité, cela est peut-être dû au processus de désorption endothermique.

III.2. Bâtiment climatisé

Pour étudier l'influence du transfert massique à travers l'enveloppe du bâtiment sur la consommation d'énergie d'un bâtiment, un système de régulation thermique a été programmé pour le chauffage lorsque la température intérieure est inférieure à 20°C et pour le refroidissement lorsque la température intérieure dépasse 24 °C (températures de consigne). Le bâtiment est supposé occupé de 8h00 à 16h00 et inoccupé le reste de la journée. Un taux d'humidité de 500 g.h⁻¹ est généré dans la pièce pendant les heures d'occupation. Pendant la période inoccupée, il n'y a pas de chauffage, pas de refroidissement et pas de production d'humidité dans la pièce. Les résultats numériques des besoins de chauffage et de refroidissement pour les deux cas sont résumés dans le tableau III.2.

En période hivernale, les besoins de chauffage pour le cas avec considération du transfert de masse à travers l'enveloppe du bâtiment (cas 1) sont inférieurs de 3% à celui de cas 2. Cela signifie que le transfert d'humidité à travers les parois du bâtiment a un effet insignifiant sur les besoins de chauffage. Des observations similaires sont rapportées par plusieurs auteurs pour des enveloppes hygroscopiques multicouches [4] et pour des bâtiments en béton de chanvre [5]. Cette faible différence dans les besoins de chauffage entre les deux cas peut s'expliquer par le phénomène d'absorption dans l'enveloppe du bâtiment. En hiver, le matériau hygroscopique (DPC) absorbe l'humidité de l'air intérieur humide ; comme nous le savons, l'adsorption est un phénomène exothermique en raison de la condensation de la vapeur d'eau à l'intérieur des pores. Ainsi, une certaine quantité de chaleur est générée dans les matériaux de construction qui permet d'augmenter la température de l'air intérieur du bâtiment. Selon Osanyintola *et al.* [6], l'adsorption d'humidité dans les matériaux poreux libère 2.5 kJ.kg^{-2} de chaleur, ce qui diminue les besoins de chauffage nécessaires. Par conséquent, lorsque le système de chauffage fonctionne, les besoins de chauffage sont plus faibles si l'on tient compte du transfert de chaleur et d'humidité à travers les murs du bâtiment.

En été, l'impact du transfert d'humidité sur les besoins de refroidissement est plus important. Le DPC libère de l'humidité dans l'air ambiant ; comme le processus de désorption est un phénomène endothermique en raison de l'évaporation de l'eau stockée à l'intérieur des pores, une partie de la chaleur sera absorbée, diminuant ainsi l'énergie de refroidissement requise. Donc, lorsque le système de climatisation fonctionne, les besoins de refroidissement sont inférieurs si l'on considère le transfert d'humidité à travers le bâtiment avec une erreur relative de 37%. Ces résultats sont en accord avec ceux des auteurs de [4,7, 8].

Les résultats obtenus montrent que le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment n'a pas d'effet significatif sur les besoins de chauffage mais a un effet important sur ceux de refroidissement. La consommation totale utilisée pour le chauffage et le pour refroidissement dans le cas 1 est d'environ 3% et 37% inférieure à celles du cas 2, respectivement. Cela signifie que le DPC peut absorber de la chaleur pendant la désorption de la vapeur d'eau et libérer de la chaleur pendant l'absorption de la vapeur d'eau.

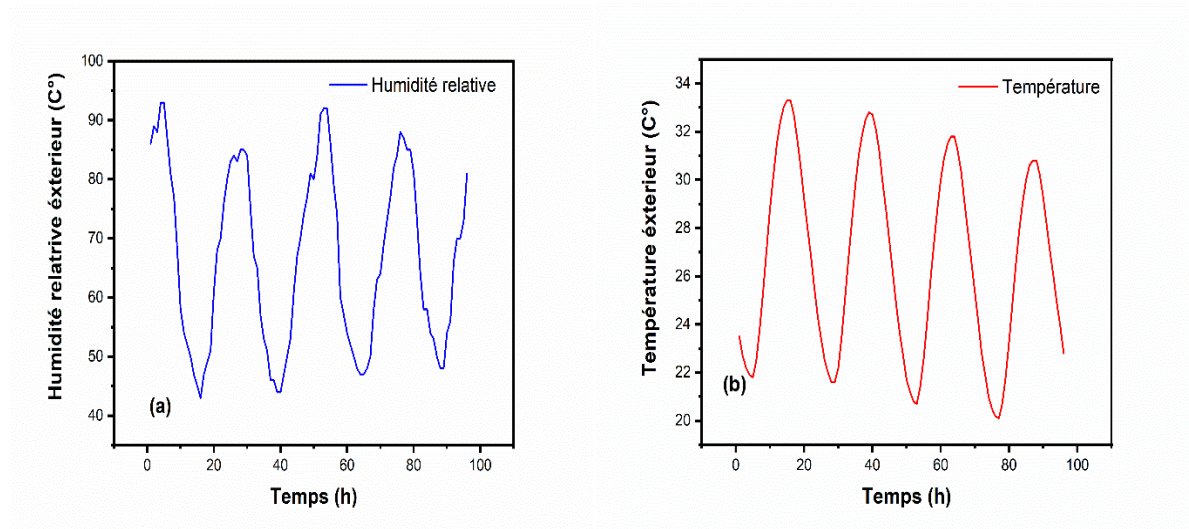
Tableau III.2 : Besoins de chauffage et de climatisation pour les deux cas étudiés.

	Cas 1	Cas 2	Erreur relative (%)
Besoins de chauffage [W]	1174.31	1207.40	3
Besoins climatisation [W]	149.26	204.31	37

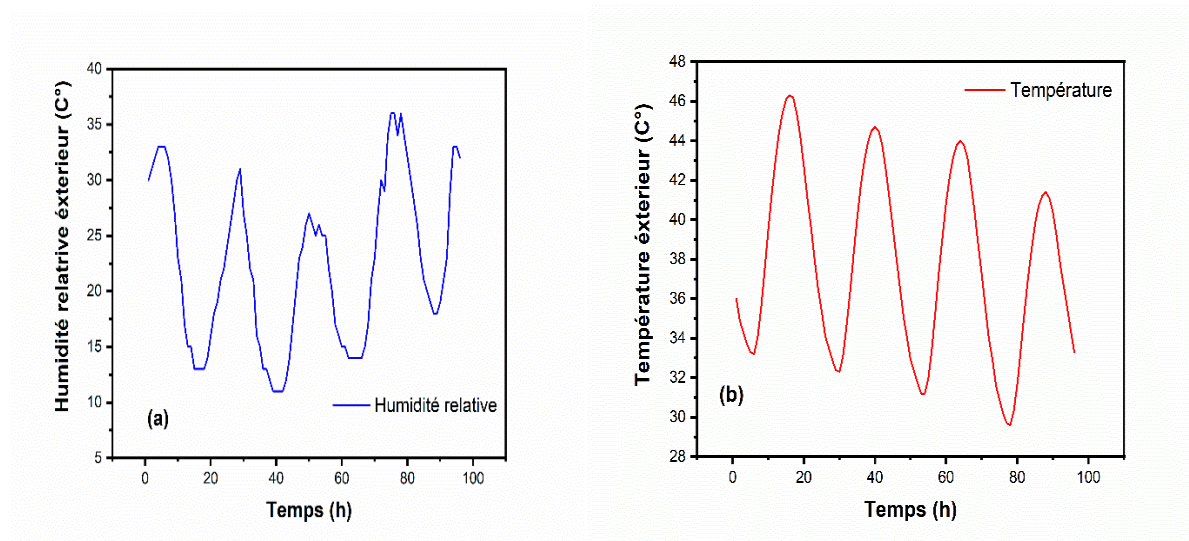
Dans cette section, nous avons mis en évidence l'importance de prendre en compte le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du DPC. En outre, nous avons constaté que la négligence de ce phénomène entraîne des erreurs significatives dans la prédiction de l'humidité relative intérieure et de la consommation d'énergie, notamment en période estivale.

IV. Comparaison des performances hygrothermiques du béton de bois de palmier dattier avec un matériau de construction conventionnel

Dans cette section, une comparaison entre les performances hygrothermiques du béton de palmier dattier et celles d'un matériau de construction conventionnel (béton cellulaire autoclavé, AAC) en termes d'inertie thermique, de régulation hydrique, d'économie d'énergie et de risque de condensation a été réalisée. Cette évaluation est effectuée en utilisant le modèle HAMT sous différentes conditions climatiques : climat humide (Alger, nord de l'Algérie) (figure III.6) ; climat semi-aride (Batna, est de l'Algérie) (figure III.3) ; et climat chaud et sec (Ouargla, sud de l'Algérie) (figure III.7). Ceci est réalisé en comparant deux cas d'études. Dans le premier cas, l'enveloppe est construite avec une seule couche de DPC et dans le second, l'enveloppe est construite avec une seule couche de béton cellulaire autoclavé (AAC). Dans ce contexte, en se référant aux travaux de Benmansour *et al.* [9], le DPC est classé comme un matériau isolant qui satisfait les exigences de RILEM pour le béton léger autoclavé. Sur la base de cette classification, le béton cellulaire autoclavé (AAC) a été choisi comme un matériau de comparaison. Ce matériau est largement utilisé en raison de sa légèreté, de ses excellentes caractéristiques isolantes et structurelles [10]. Le tableau III.3 résume les propriétés hygrothermiques du AAC obtenues à partir de la base de données du logiciel Wufi [11]. L'isotherme de sorption du béton cellulaire autoclavé est présenté dans la Figure III.8.



Figures III.6. Conditions climatiques de la région d'Alger en période d'été (Juillet du 23 au 26): (a) humidité relative et (b) température.



Figures III.7. Conditions climatiques de la région de Ouargla en période d'été (Juillet du 23 au 26): (a) humidité relative et (b) température.

Tableau III. 3 : Propriétés hygrothermique du béton cellulaire autoclavé [11].

Propriété	$\lambda(\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1})$	$C_p(\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\rho(\text{kg.m}^{-3})$	$\mu(-)$
Valeur	0.14	850	600	8.3

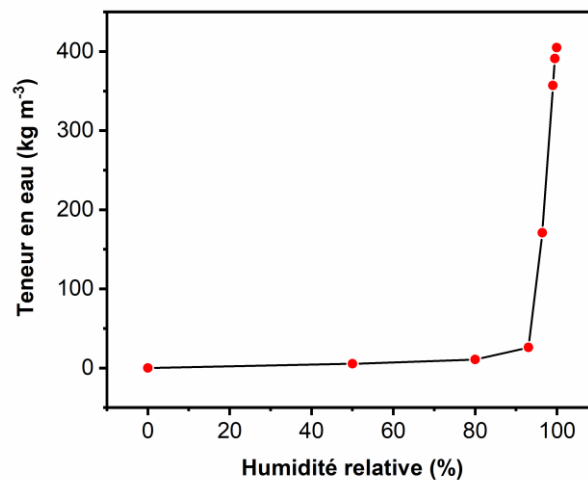


Figure III.8. Isotherme de sorption du AAC issue du logiciel WUFI [11].

IV.1. Inertie et confort thermique

Dans cette section on compare le comportement hygrothermique du DPC à celui du béton cellulaire autoclavé (AAC) en termes d'inertie et de confort thermique. Pendant l'été, la température augmente fortement et peut atteindre 34 °C à Alger, 40 °C à Batna, et 46 °C à Ouargla, où le phénomène de surchauffe peut avoir lieu. Le terme " surchauffe " désigne l'inconfort ressenti par les occupants en raison de l'accumulation de chaleur dans un bâtiment. La surchauffe peut entraîner des problèmes de santé, notamment pour les personnes âgées et les jeunes enfants. Une bonne perception thermique nécessite une bonne inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment, ce qui signifie que les fluctuations climatiques externes sont retardées et amorties. Le taux d'amortissement des fluctuations de température peut être calculé à l'aide de l'équation ci-dessous [12] :

$$\zeta = \frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{ext}} \quad (1)$$

Où T_{in} et T_{ext} représentent les gradients de température intérieure et extérieure, respectivement.

Le déphasage est défini par le temps pendant lequel les températures extérieures et intérieures atteignent leur maximum [12] :

$$\eta = t(T_{ext,max}) - t(T_{in,max}) \quad (2)$$

Les simulations ont été effectuées pour un bâtiment sans chauffage et refroidissement ni de génération d'humidité afin de comparer les performances hygrothermiques du DPC et de AAC sans aucune régulation thermique ou hydrique. Les deux bâtiments ont été exposés aux conditions extérieures réelles des trois régions mentionnées dans la section IV, tandis que les conditions intérieures sont laissées libres. L'ensemble du test a duré quatre jours typiques en période d'été (23 au 26 juillet). La température intérieure a été simulée et présentée dans la figure III. 9. La température extérieure est également représentée sur la même figure. Nous pouvons remarquer que les températures intérieures dans les climats humides (Alger) et semi-arides (Batna) sont légèrement inférieures dans le bâtiment en DPC par rapport au bâtiment en AAC. Pour un climat chaud et sec (Ouargla), la température dans le bâtiment en DPC (autour de 31 °C) est plus basse que dans le bâtiment en AAC (entre 31 °C et 34 °C), comme le montre la figure III.9 (c). Le DPC absorbe plus de chaleur de l'air intérieur que le AAC en raison du processus de désorption de la vapeur d'eau et permet ainsi de réduire la température ambiante et de refroidir l'air intérieur. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que le DPC a une grande inertie thermique et une grande capacité de tampon hydrique par rapport au béton cellulaire autoclavé.

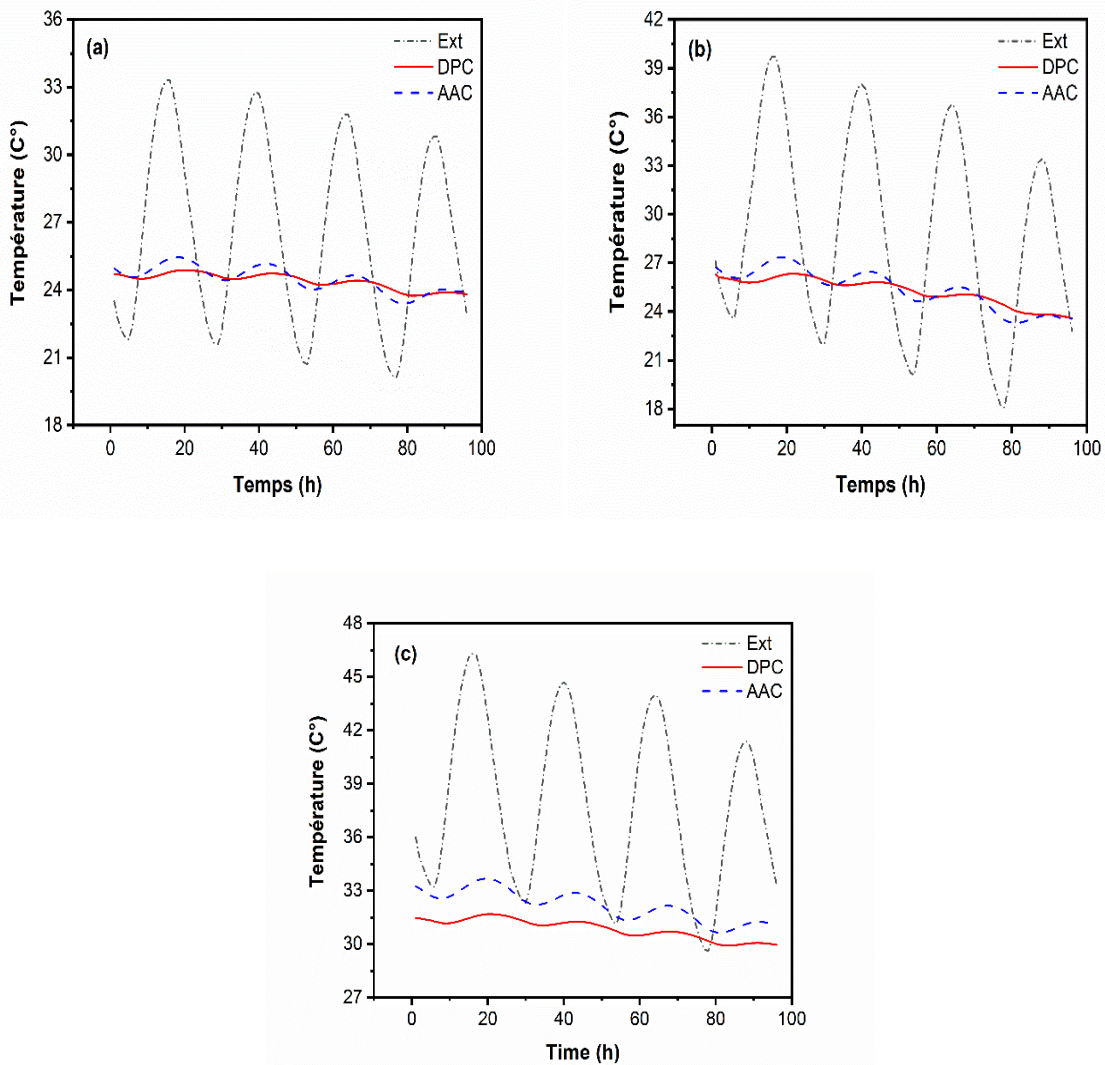


Figure III. 9. Température calculée à l'intérieure des bâtiments en DPC en AAC (23-26 juillet) à : Alger (a), Batna (b) et Ouargla (c).

Afin d'évaluer le niveau de confort apporté par le bâtiment en DPC, les déphasages et les taux d'amortissement des variations de température à l'intérieur des deux bâtiments étudiés sont calculés et présentés dans les tableaux III.4 et III.5. Nous pouvons constater que l'enveloppe du DPC peut retarder le pic de température de 6 heures dans les régions humides et semi-arides et de 5 heures dans les climats chauds et secs. En outre, le taux d'amortissement est estimé à 3.3 %, 3.4 % et 4 % dans les trois climats, respectivement. En comparaison, le béton cellulaire autoclavé (AAC) peut retarder le pic de température d'environ 3 heures dans le climat humide et semi-aride et de 4 heures dans le climat chaud et sec. En plus, le AAC atténue la variation de température d'environ 8 %, 8.1 % et 8.5 % dans les trois climats, respectivement. Ces résultats

révèlent que le DPC possède une inertie thermique importante en raison de sa faible diffusivité thermique ($1.29 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) par rapport au béton cellulaire autoclavé ($2.75 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). La bonne inertie thermique permet de retarder le pic de température intérieure jusqu'à la nuit pendant les jours d'été et d'amortir la température extérieure. Ces résultats montrent que le DPC permet de limiter la surchauffe estivale, d'assurer le confort thermique des occupants et de réduire la consommation d'énergie pour le refroidissement.

Tableau IV. 4: Déphasage (h)

		Alger	Batna	Ouargla
η (h)	DPC	6	6	5
	AAC	3	3	4

Tableau IV.5 : Amortissement (%)

		Alger	Batna	Ouargla
ξ (%)	DPC	3.3	3.4	4
	AAC	8	8.1	8.5

IV.2. Régulation de l'humidité relative (tampon hydrique)

L'humidité relative intérieure est l'un des paramètres essentiels affectant la santé des occupants, la durabilité de l'enveloppe du bâtiment et la consommation d'énergie. Pour évaluer la performance hydrique du bâtiment en DPC sous les trois climats considérés, l'humidité relative a été simulée, et les résultats sont présentés dans la figure III.10. On peut remarquer que l'enveloppe construit en DPC a été moins affectée par les conditions hygrothermiques environnementales imposées. L'enveloppe de DPC atténue significativement les variations périodiques de l'humidité relative intérieure et améliore les processus de déshumidification de l'air intérieur, en particulier dans les climats humides et semi-arides en raison de sa capacité hydrique élevée. Dans un climat humide (Alger), l'humidité relative intérieure reste autour de 70% dans le bâtiment en DPC. Cependant, l'humidité relative intérieure maximale dans un bâtiment en AAC dépasse les 80%. Selon Goto *et al.* [13], lorsque l'humidité relative dans une pièce dépasse 80%, le risque de formation de moisissures augmente, ce qui peut affecter la santé

des occupants et peut endommager le bâtiment. Par conséquent, dans le bâtiment en AAC, un processus de déshumidification supplémentaire peut être nécessaire.

Dans le climat chaud et sec (Ouargla), nous pouvons remarquer que l'humidité relative pour les deux configurations est presque la même. Cela peut s'expliquer par la nature sèche du climat de Ouargla où les matériaux (DPC et AAC) peuvent libérer la même quantité d'humidité dans l'air intérieur, donc les matériaux hygroscopiques ont des effets limités sur l'humidité relative dans ces conditions.

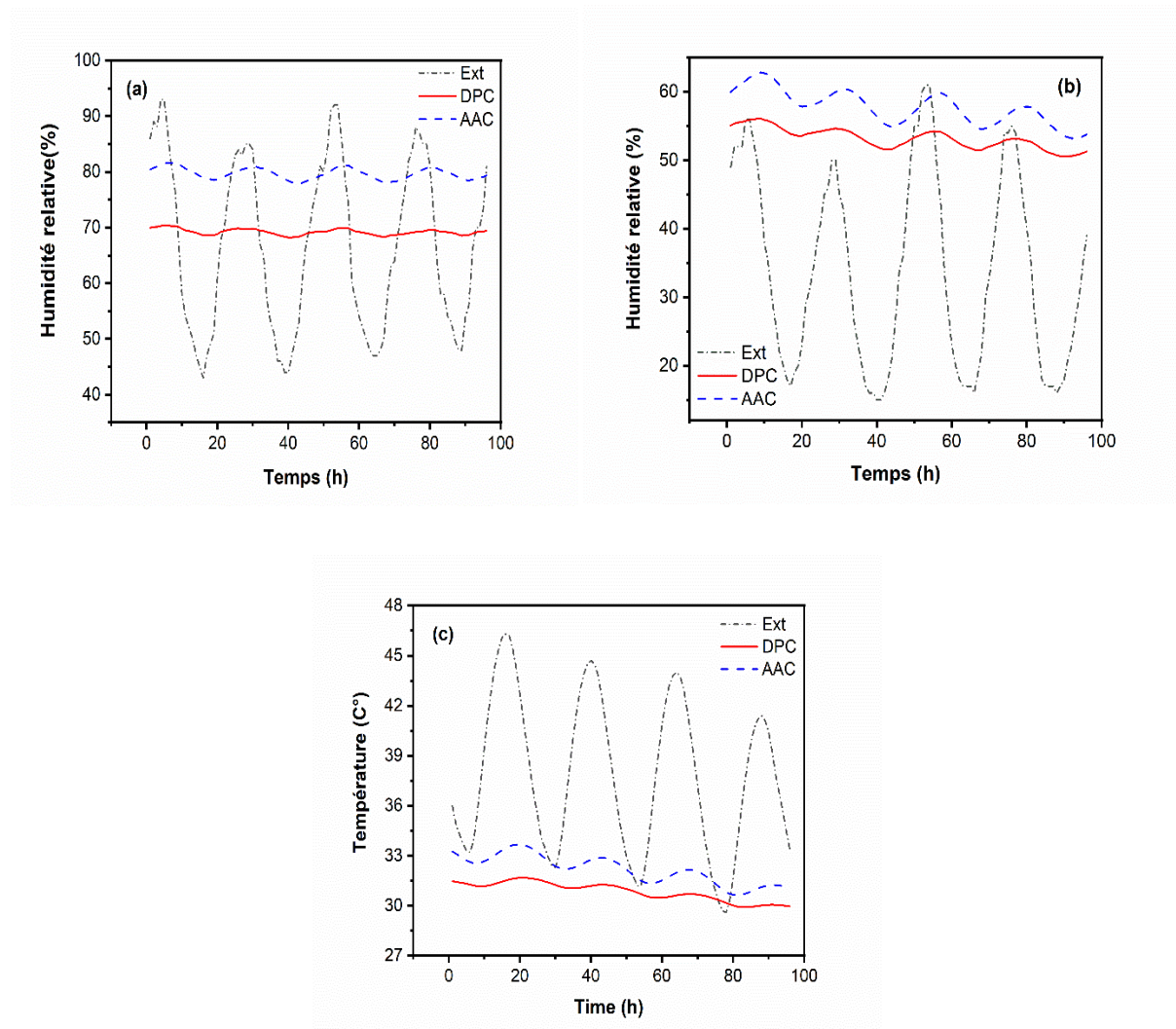


Figure III.10. Humidité relative calculée à l'intérieure des bâtiments en DPC et AAC (23-26 juillet) à Alger (a), Batna (b) et Ouargla (c).

IV.3. Consommation énergétique

Le comportement hygrothermique du DPC est également comparé à celui du béton cellulaire autoclavé (BCA) en termes de consommation d'énergie pendant la période de refroidissement pour les trois climats considérés. Le climatiseur a été réglé pour la refroidissement de l'air intérieur lorsque la température interne dépassait 24°C. La Figure III.11 montre l'énergie requise pour la climatisation pour les trois climats (humide, semi-aride et sec) des trois villes d'Algérie. L'effet tampon hydrique du DPC permet de diminuer l'énergie de refroidissement totale d'environ 66% à Alger, 44% à Batna, et 4% à Ouargla par rapport à l'utilisation de la AAC, comme montré dans le tableau III.6. Selon les résultats obtenus dans la section IV.2, en régions humides (Alger) et semi-arides (Batna), le bâtiment DPC présente une humidité relative intérieure plus faible que le bâtiment AAC. Le DPC permet de réduire l'humidité intérieure plus efficacement dans les conditions humides et semi-arides, l'enthalpie intérieure est donc réduite. Par conséquent, la réduction de l'enthalpie de l'air intérieur réduit la consommation d'énergie de refroidissement du bâtiment et améliore la qualité de l'air intérieur [6]. Par conséquent, les charges de refroidissement totales du bâtiment en DPC sont inférieures à celles de AAC d'environ 66% à Alger et 44% à Batna.

Dans le climat chaud et sec (Ouargla), l'humidité relative intérieure du bâtiment DPC est presque la même que celle du bâtiment en AAC (l'humidité relative intérieure est un peu plus faible dans le bâtiment en DPC) comme le montre la figure III.10 (c), ils possèdent donc presque la même enthalpie intérieure. Par conséquent, une économie d'énergie de 4 % peut être gagnée en utilisant le DPC.

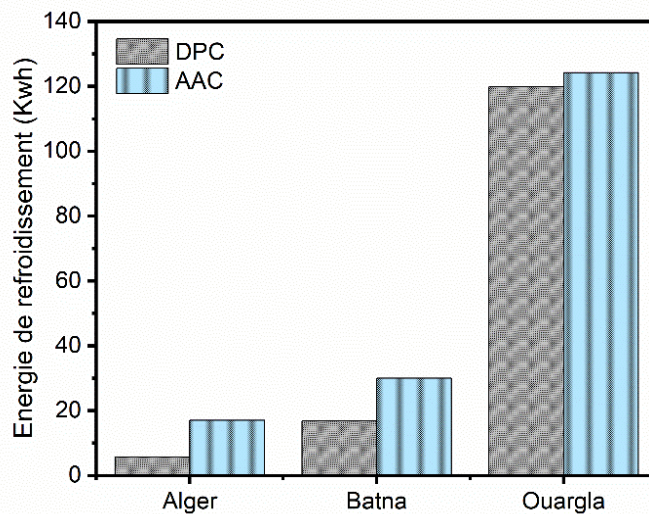


Figure III.11. Energie requise pour le refroidissement des bâtiments en DPC et en AAC.

Tableau III. 7 : Economie d'énergie (%)

	Alger	Batna	Ouargla
Economie (%)	66	44	4

Pour l'énergie de chauffage requise, le résultat obtenu montre que la consommation d'énergie pour les deux configurations étudiées (béton de palmier dattier et béton cellulaire autoclavé) est très proche. On peut donc conclure que le DPC présente plusieurs avantages en termes de confort hygrothermique et d'économie d'énergie, qui apparaissent surtout dans les régions humides et semi-arides pendant la période estivale.

De plus, dans le tableau 8, nous comparons le DPC avec le fameux matériau biosourcé « le béton de chanvre » en termes d'économie d'énergie dans les climats humides. D'une part, le béton de chanvre peut réduire la consommation d'énergie de 45% par rapport au béton conventionnel (AAC) [5]. D'autre part, le DPC réduit de 66% la consommation d'énergie par rapport au AAC, comme nous l'avons trouvé dans cette section. Comme mentionné ci-dessus, l'économie d'énergie est réalisée grâce à l'effet tampon de l'humidité du matériau. Cette caractéristique est exprimée par la valeur tampon hydrique du matériau (MBV). La MBV du DPC est plus élevée ($3 \text{ g.m}^{-2} \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$) que celle du béton de chanvre ($2.25 \text{ g.m}^{-2} \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$) [14]. Donc, les économies d'énergie dans les bâtiments en DPC sont plus importantes. Ces résultats

montrent que le DPC est énergétiquement efficace non seulement par rapport aux matériaux conventionnels mais aussi par rapport aux matériaux biosourcés.

Tableau III.8. Comparaison entre le béton de chanvre et le DPC en termes d'économie d'énergie

	Béton de chanvre [5]	DPC
Economie d'énergie (%)	45	66

IV.4. Evaluation du risque de condensation

La quantité élevée d'humidité à l'intérieur du bâtiment peut réduire la durée de vie de l'enveloppe tout en créant un environnement intérieur malsain dû au développement de moisissures. Ces moisissures entraînent une augmentation du risque d'allergies et peuvent endommager le bâtiment [15]. En outre, l'accumulation d'humidité intérieure aussi influence l'efficacité des systèmes HVAC.

Dans cette partie de l'étude, nous allons prédire les risques majeurs associés à l'humidité, notamment la condensation de la vapeur d'eau sur les surfaces des murs pendant l'hiver. Cette étude a été réalisée pour le climat d'Alger (climat humide) en période hivernale pendant quatre jours typiques, du 6 au 9 janvier, lorsque l'humidité relative extérieure peut atteindre une valeur de 100% et que la température descend en dessous de 0°C. En général, le risque de condensation augmente pendant la saison hivernale car la température est basse et l'humidité relative est élevée. Goto *et al.* [15] ont constaté que lorsque l'humidité relative dans un élément de mur n'atteint pas 80 %, les problèmes d'accumulation d'humidité peuvent être évités. L'humidité relative des surfaces intérieures et extérieures des deux configurations étudiées est présentée sur la figure. 12 (a) et (b). Sur la surface intérieure, on peut remarquer que l'humidité relative du bâtiment en DPC est d'environ 75% alors qu'elle dépasse 90% dans le bâtiment en AAC, comme montré dans la figure III.12 (a). Donc l'accumulation d'humidité ne peut pas avoir lieu sur la surface intérieure du bâtiment en DPC.

Néanmoins, l'humidité relative sur la surface extérieure des bâtiments en DPC et en AAC suit presque la même allure de variation que les conditions extérieures. Où, l'humidité relative du DPC est inférieure à celle du bâtiment en AAC, avec une différence de 4%. De ce fait, la

condensation de la vapeur peut avoir lieu sur les surfaces extérieures des deux configurations. Une attention particulière peut être appliquée dans ce cas.

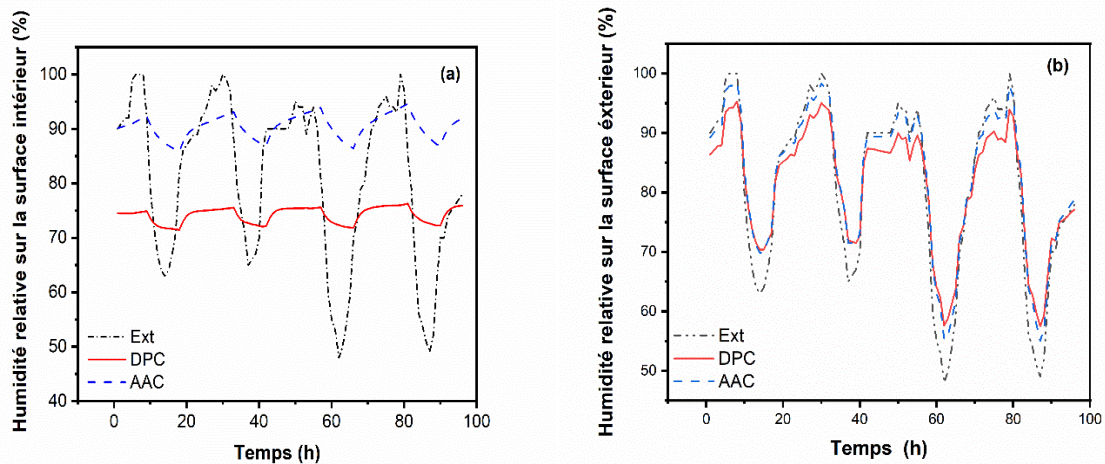


Figure III.12. Humidité relative de : (a) la surface intérieure et (b) la surface extérieure pour les deux configurations étudiées.

La période hivernale nécessite des précautions particulières pour éviter les dommages causés par une humidité relative élevée. Lorsque la température s'approche de la température du point de rosée, la condensation de la vapeur d'eau peut se produire sur les parois du bâtiment. La température du rosé est définie comme la température à laquelle un certain volume d'air à une pression atmosphérique donnée est saturé en vapeur d'eau, induisant la condensation et la production de rosée [16]. Cette température de point de rosée est calculée à l'aide de la table thermodynamique de la vapeur d'eau.

Cette partie de l'étude est consacrée à l'évaluation du risque lié à l'humidité en hiver, qui se caractérise par un taux d'humidité élevé ainsi qu'une baisse de la température. D'une part, on peut constater sur la figure III.13 (a) qu'il n'y a aucune possibilité de développement de moisissures ou de condensation superficielle sur la surface interne de l'enveloppe en DPC pendant la période de test considéré. D'autre part, la condensation de la vapeur d'eau sur la surface interne d'un bâtiment en AAC peut avoir lieu car les conditions de température sont très proches de celles des points de rosée, comme nous pouvons le remarquer sur la figure III.13 (b). Les conditions hygrothermiques sur la surface intérieure de mur en béton cellulaire autoclavé révèlent que l'humidité relative sur la surface du mur intérieur est très proche de 100% comme montré dans la figure III.14.

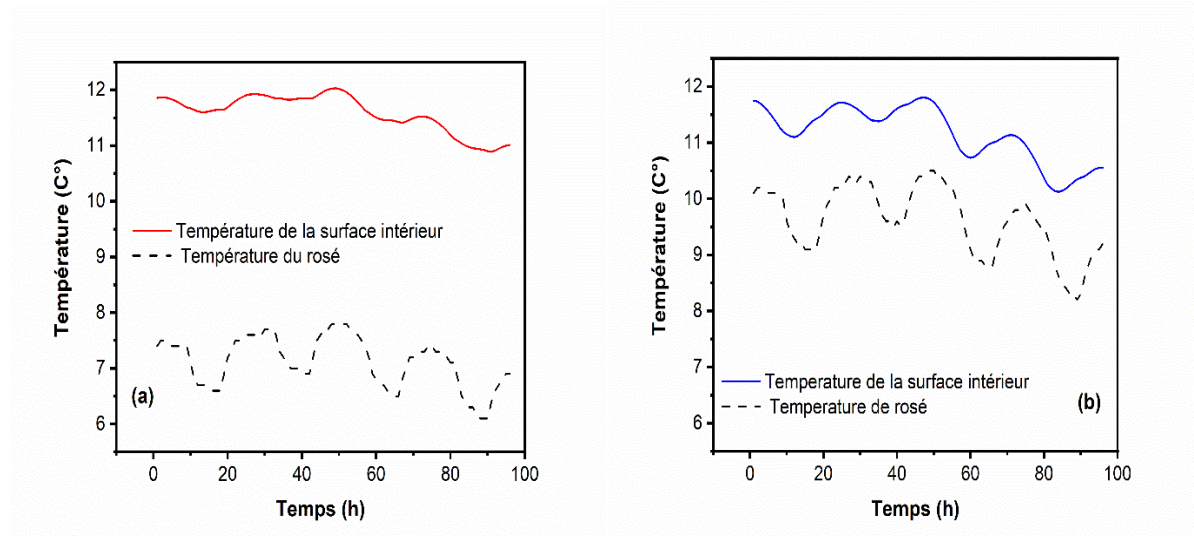


Figure III.13. Evaluation du risque de condensation sur la surface interne des bâtiments en DPC (a) et en AAC (b).

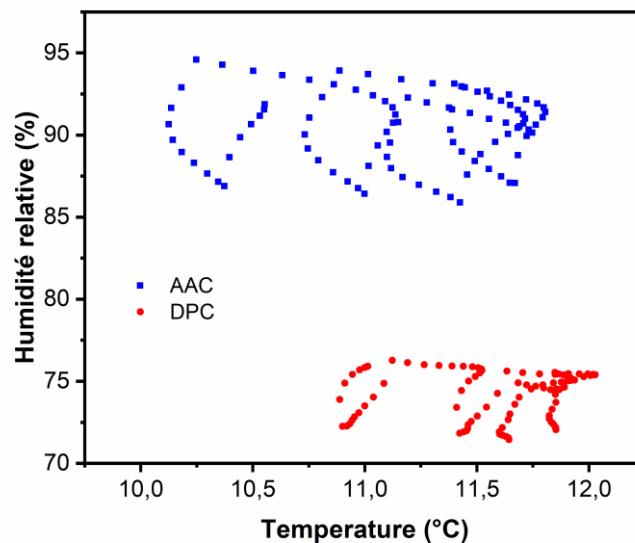


Figure III.14. Conditions hygrothermiques sur la surface intérieure de l'enveloppe du bâtiment

De plus, en calculant les températures de point de rosée pour les différentes orientations du bâtiment étudié (sud, nord, est et ouest), nous avons trouvé des résultats presque similaires. Cette observation peut être due à la modélisation zonale d'EnergyPlus, où une seule pièce d'un bâtiment est considérée comme une enceinte, dont les caractéristiques sont parfaitement uniformes. Dans ce cas, le comportement de l'air intérieur de la pièce est représenté par un seul

ensemble de variables : température, humidité relative, etc. Des résultats similaires ont été rapportés par Maia *et al.* [17] lors de la simulation du risque de condensation en considérant les climats de Porto, Paris et Hanovre pour les orientations nord et sud. Les résultats obtenus par Maia *et al.* [17] montrent également que le risque de condensation est légèrement influencé par le coefficient d'adsorption solaire. Si une valeur élevée de ce paramètre améliore le processus de séchage des surfaces extérieures, contrairement à EnergyPlus, l'introduction de ce paramètre est facultative et peut conduire à des erreurs mineures dans l'évaluation du risque de condensation.

V. Conclusion

Ce chapitre présente une étude du comportement hygrothermique d'un bâtiment en DPC. L'objectif c'était d'étudier les effets du transfert couplé de chaleur et de masse au sein de l'enveloppe du bâtiment et l'interaction de l'enveloppe avec son environnement. Dans un premier temps, le modèle HAMT a été utilisé pour étudier l'influence du transfert de masse à travers l'enveloppe du bâtiment sur les conditions hygrothermiques et la consommation énergétique du bâtiment en DPC sous différents cas. Les résultats révèlent que l'effet principal du transfert de masse et des processus de sorption-désorption sur les résultats numériques apparaît en été, où une erreur relative de 37% dans les besoins de refroidissement ont été trouvées. En outre, cette étude souligne la capacité de l'enveloppe DPC à réguler l'humidité intérieure dans une certaine fourchette (50-60%) et à améliorer la qualité de l'air intérieur. Enfin, les performances du DPC et de AAC ont été comparées en termes (i) d'inertie thermique et de tampon d'humidité, (ii) d'économie d'énergie et (iii) de risque de condensation sous trois climats différents (humide, semi-aride et chaud et sec). En ce qui concerne l'inertie thermique, les résultats montrent que l'enveloppe en DPC amortit et retarde considérablement les variations de température en raison de sa faible diffusivité thermique, le déphasage et le taux d'amortissement pouvant atteindre 6 heures et 3.4 % dans les climats humide et semi-aride, respectivement. En outre, l'enveloppe DPC réduit considérablement les fluctuations périodiques de l'humidité relative intérieure et améliore le processus d'humidification/déshumidification de l'air intérieur, en particulier dans les climats humides et semi-arides. En ce qui concerne les économies d'énergie, l'utilisation du DPC peut réduire la demande d'énergie de 66 % dans un climat humide et de 44 % dans un climat semi-aride par rapport à l'AAC, en raison de son tampon hydrique important dans ces régions. En outre, les résultats de l'évaluation du risque de condensation ont révélé qu'il n'y a aucune possibilité de

condensation de surface ou de développement de moisissures sur la surface intérieure du bâtiment en DPC (l'humidité relative sur les surfaces intérieures est inférieure à 80 %). En conclusion, le modèle HAMT fournit des résultats plus précis tant pour les conditions hygrothermiques intérieures que pour la consommation d'énergie. Cependant, il n'est peut-être pas le meilleur outil pour évaluer le risque de condensation car il est basé sur une modélisation multizone qui ne tient pas compte de la stratification thermique et hydrique dans la pièce ainsi que certains paramètres tels que le coefficient d'adsorption solaire. Par ailleurs, le DPC est recommandé pour la construction durable dans les régions humides et semi-arides en raison de ses performances hygrothermiques, de son inertie thermique et de son tampon hydrique.

References

- [1] ASHRAE, *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*. Atlanta: GA: American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers, 2004
- [2] M. C. Woloszyn, R. J. E. C. i. B. Carsten, and I. E. A. Community Systems", "R." IEA Annex 41, MOIST-ENG Subtask 1-Modelling Principles and Common Exercises," 2007.
- [3] (2008). *Meteonorm software* Available: <https://meteonorm.com/en/meteonorm-version-8>
- [4] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, and F. Allard, "Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings," *Automation in construction*, vol. 18, no. 5, pp. 624-631, 2009.
- [5] A. T. Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz, and F. Collet, "Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope," *Energy and buildings*, vol. 42, no. 10, pp. 1797-1806, 2010. O.
- [6] F. Osanyintola and C. J. Simonson, "Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact," *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 10, pp. 1270-1282, 2006.
- [7] M. Qin and J. Yang, "Evaluation of different thermal models in EnergyPlus for calculating moisture effects on building energy consumption in different climate conditions," in *Building Simulation*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 15-25: Springer.
- [8] S. Yu, Y. Cui, Y. Shao, and F. Han, "Research on the comprehensive performance of hygroscopic materials in an office building based on energyplus," *Energies*, vol. 12, no. 1, p. 191, 2019.
- [9] 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.
- [10] B. Dolton and C. Hannah, "Cellular concrete: Engineering and technological advancement for construction in cold climates," in *The 2006 annual general conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, 2006, pp. 1-11
- [11] *WUFI*. Available: <https://wufi.de/en/software/>
- [12] O. Douzane, G. Promis, J.-M. Roucoult, A.-D. T. Le, and T. Langlet, "Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations," *Journal of Building Engineering*, vol. 8, pp. 91-98, 2016.
- [13] Y. Goto, Y. Ostermeyer, K. G. 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.
- [14] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 348-356, 2018.

- [15] Y. Goto, Y. Ostermeyer, K. G. 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.
- [16] S. N. Qasem, S. Samadianfard, H. Sadri Nahand, A. Mosavi, S. Shamshirband, and K.-w. Chau, "Estimating daily dew point temperature using machine learning algorithms," *Water*, vol. 11, no. 3, p. 582, 2019.
- [17] J. Maia *et al.*, "Hygrothermal performance of a new thermal aerogel-based render under distinct climatic conditions," *Energy and Buildings*, vol. 243, p. 111001, 2021.

Chapitre IV : Etude numérique paramétrique

I. Introduction

Ce quatrième chapitre présente une étude numérique paramétrique réalisée avec le modèle HAMT du logiciel EnergyPlus. Les simulations effectuées portent sur une étude de sensibilité du modèle utilisé envers les propriétés hygrothermiques du matériau hygroscopique. De plus, l'effet de différents paramètres de simulations sur le comportement thermo-hydrique de l'enveloppe hygroscopique sera étudié. Ce chapitre simule, donc, les trois aspects des conditions intérieures : la température, l'humidité relative intérieure et la consommation d'énergie de la pièce afin de fournir une analyse théorique et des conseils techniques pour la recherche, l'ingénierie et la fabrication. Cette étude tient compte de plusieurs facteurs, les propriétés du matériau, la stratégie de ventilation, l'épaisseur de l'enveloppe, les conditions initiales, la thermo-dépendance et la dépendance à l'humidité des paramètres hygrothermiques du matériau.

II. Etat de l'art

Afin d'étudier l'effet des matériaux utilisés comme enveloppe du bâtiment sur le confort hygrothermique, la simulation doit être réalisée ; par ce qui est moins cher et détaillé autant que le test in-situ (expérimental). Concernant les outils de simulation, les propriétés hygrothermiques (λ , $W(\text{hr})$, ρ , $\mu\dots$) sont requises pour tous les modèles de transfert hygrothermique (HAMT). Pour un même échantillon d'un matériau, les propriétés hygrothermiques mesurées par différents laboratoires peuvent être différentes. Par exemple, les travaux expérimentaux de Collet [1] et Evrard [2] ont montré que les chaleurs spécifiques du béton de chanvre (avec la masse volumique de 413 et 440 kg.m^3) sont respectivement de 1000 et 1530 $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ avec une différence de 34.6%. On peut aussi citer les travaux expérimentaux de Chennouf *et al.*[3] ainsi que ceux de Haba *et al.*[4] qui ont trouvé des valeurs relativement différentes pour le facteur de résistance à la vapeur 6.31 et 4.4, respectivement avec une erreur relative de 30%. Ces erreurs expérimentales peuvent se produire pour différentes raisons comme l'incertitude de l'appareillage, la méthode de mesure, la lecture erronée...etc. Ces données montrent qu'une étude de sensibilité du modèle HAMT envers l'erreur des propriétés hygrothermiques et leurs effets sur les résultats de simulation est nécessaire. Par conséquent, le but de ce chapitre de thèse est de donner une étude numérique paramétrique du modèle HAMT pour étudier l'effet des propriétés hygrothermiques du matériau ainsi que les

paramètres de simulation sur les conditions hygrothermiques intérieures d'une pièce en DPC soumise à des conditions environnementales réelles.

Dans le domaine des matériaux de construction hygroscopiques ; plusieurs travaux sur la sensibilité du modèle HAMT ont été réalisés. Pour le DPC une étude de sensibilité sur le transfert transitoire de l'humidité et de chaleur basé sur le modèle de Kunzel à l'échelle de la paroi a été effectuée par Alioua *et al.* [5]. Dans la première partie de leurs travaux une analyse paramétrique sur l'impact des propriétés hygrothermiques sur les sorties du modèle a été effectuée. Les résultats de cette étude paramétrique montrent qu'une précaution importante doit être considérée lors de la mesure des paramètres suivants (capacité calorifique et densité pour le transfert de chaleur, isotherme de sorption et facteurs de résistance à la vapeur d'eau pour le transfert hydrique). Les incertitudes sur ces paramètres peuvent entraîner des accumulations d'erreurs, en particulier lors de la modélisation du processus de transfert hydrique. De plus, les conditions initiales et l'emplacement des senseurs semblent être des sources possibles d'écarts dans les profils d'humidité relative calculés. Le *et al.* [6] ont réalisé une étude paramétrique du modèle de Mendes au niveau du bâtiment. Dans leurs travaux, l'impact de changement des coefficients de transfert, de l'isotherme de sorption, du taux de changement d'air, de la finesse de discrétisation et de l'activité des occupants, sur les conditions hygrothermiques et la consommation d'énergie a été effectué. Leurs résultats exhibent que la considération du transfert d'humidité et la présence d'une fine discrétisation spatiale de l'enveloppe du bâtiment sont nécessaires pour prédire correctement le comportement hygrothermique. Concernant l'impact de propriétés hygrothermiques, les résultats montrent que la température est influencée par les paramètres thermiques du béton de chanvre (λ , ρ et C_p), alors que l'humidité relative de la pièce est influencée à l'isotherme de sorption, au taux de ventilation et au facteur de transport hydrique. Une autre étude paramétrique à l'échelle du bâtiment fait référence à Yu *et al.* [7]. Dans ce travail, la simulation de différents cas y compris la stratégie de ventilation, l'épaisseur et la teneur en humidité initiale a été réalisée. Les résultats montrent que des petites valeurs des taux de changement d'air et de plus grandes surfaces hygroscopiques utilisés peuvent aider à améliorer les performances des matériaux hygroscopiques. L'épaisseur et la teneur en humidité initiale des matériaux hygroscopiques ont peu d'impact sur le tampon d'humidité évalué.

III. Cas de la référence

Pour effectuer l'analyse paramétrique sur le modèle couplé HAMT, un cas de référence a été choisi. Le cas sélectionné est celui du bâtiment climatisé défini dans le chapitre III pendant la période estivale (du 23 au 26 Juillet). Le choix d'utiliser ce cas pour l'étude est établie afin d'analyser la sensibilité dans des conditions réelles et d'étudier l'impact des paramètres de simulation non seulement sur l'humidité et la température mais aussi sur la consommation énergétique du bâtiment. Le tableau IV récapitule les paramètres d'entrée de référence.

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation de référence.

Paramètre	Propriété hygrothermique du matériau	Taux de renouvellement de l'air	Teneur en eau initial	Epaisseur de l'enveloppe
Valeur	Voir chapitre II	0.5 ACH	0.02 kg/kg	0.2 m

Les résultats de référence de la température et de l'humidité relative intérieure sont présentés dans la figure IV.1. Ces résultats ont été simulés en utilisant les propriétés hygrothermiques du DPC sans aucune variation des propriétés. Pour la consommation énergétique, les besoins de climatisation obtenue pour ce cas de référence sont estimés à 149.26 W.

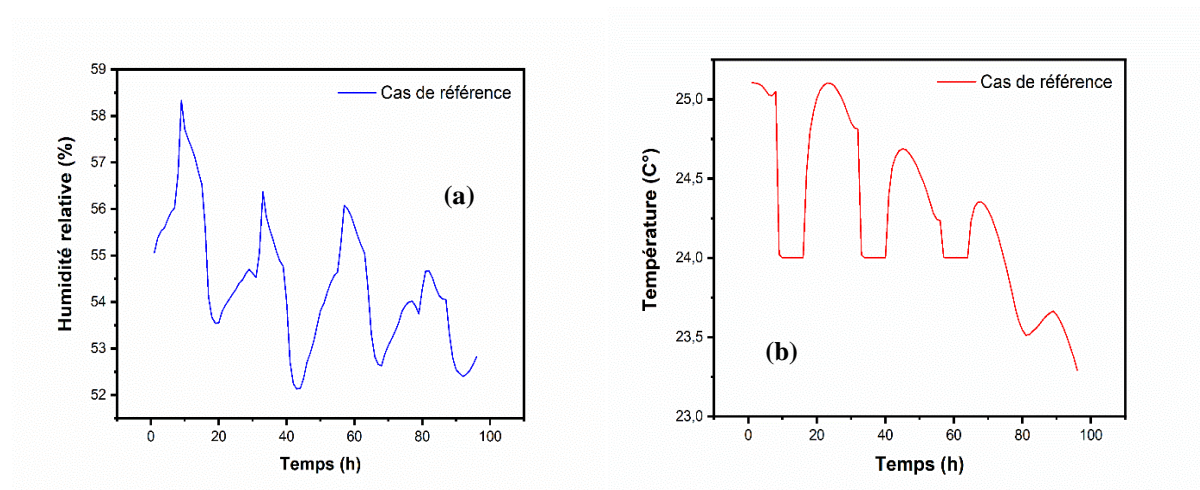


Figure IV.1. Solution de référence de : (a) l'humidité relative et (b) la température.

IV. Sensibilité du modèle HAMT envers la variation des propriétés hygrothermiques du DPC

Après avoir validé le modèle HAMT dans le chapitre II, il sera donc intéressant d'étudier la sensibilité de ce modèle envers la variation des propriétés hygrothermiques du DPC afin de montrer leurs effets sur le comportement hygrothermique du bâtiment. La sensibilité du modèle HAMT a été étudiée pour les propriétés suivants : la conductivité thermique, la densité, le facteur de résistance à la vapeur, l'isotherme de sorption et les coefficients de transfert convective de chaleur et de masse. Chaque paramètre a été varié séparément en considérant un écart de 25% par rapport aux valeurs de référence présentées dans le chapitre II. Ce travail a pour objectif de démontrer l'effet des incertitudes élevées dans la mesure des propriétés hygrothermiques du béton de bois palmier dattier (échelle du matériau) sur l'humidité relative, la température et la consommation d'énergie de l'air intérieur (échelle du bâtiment). Certains de ces paramètres sont définis comme des valeurs constantes (cas de C_p , h et ρ), mais d'autres propriétés sont variables et définis comme des fonctions de (λ, μ, W) , ces paramètres sont modifiés simultanément avec les mêmes pourcentages.

IV.1. Conductivité thermique (λ)

L'impact de la conductivité thermique du DPC sur l'humidité relative et la température de la pièce est illustrée dans la figure IV.2. On peut remarquer qu'une valeur plus élevée de la conductivité thermique entraîne une augmentation la température interne et une diminution légère de l'humidité relative de la pièce. Cela est dû à l'augmentation du flux de chaleur traversant l'enveloppe du bâtiment de l'extérieur vers l'intérieur. De plus, l'augmentation de la conductivité thermique produit un changement rapide de la température de la pièce en raison de l'augmentation de la diffusivité thermique. A noter qu'une erreur de 25% de la conductivité thermique peut produire une erreur faible en température et presque négligeable en humidité relative avec un écart maximum de 0.3°C sur la température intérieure et de 0.44% sur l'humidité relative de la pièce. Nos résultats sont en bon accord avec les résultats rapportés dans les travaux de thèse de Tran Le [8], où une variation de 25% dans la conductivité thermique du béton de chanvre a permis d'engendrer une erreur de 1.1 % sur la prédiction de l'humidité relative et 0.4°C sur la température interne du bâtiment.

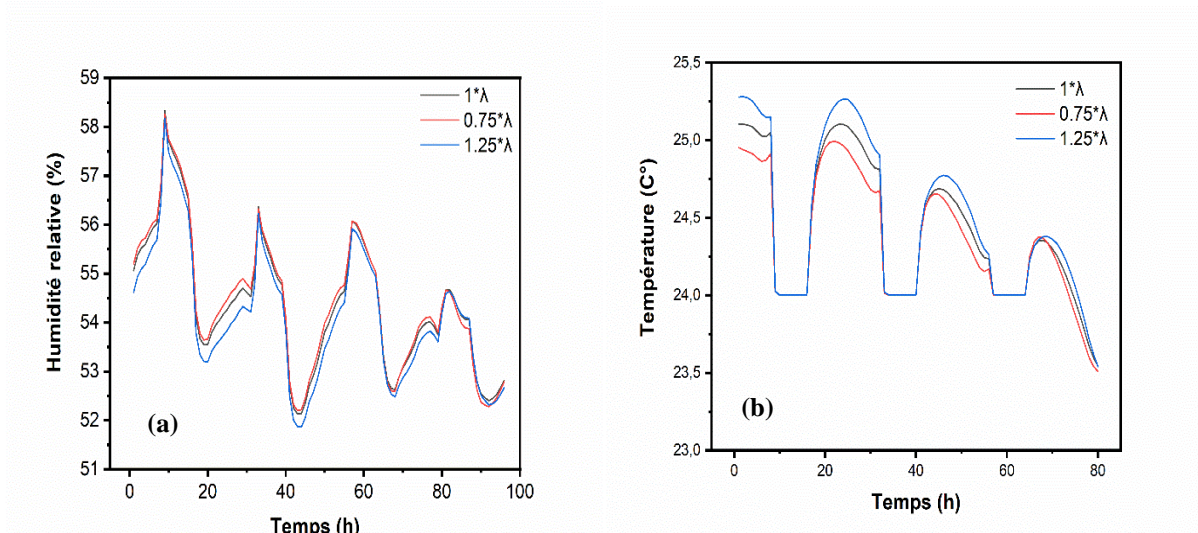


Figure IV.2. Impact de la conductivité thermique sur la prédiction de : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.

IV.2. Capacité thermique (C_p)

L'impact de la capacité thermique du DPC sur les conditions hygrothermiques de la pièce est illustrée dans la figure IV.3. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la chaleur spécifique se traduit par une diminution progressive de la température de la pièce. Dans ce cas, une variation de 25 % dans la chaleur spécifique peut entraîner une erreur maximale de température de 0,2 °C. De plus, on constate que l'erreur dans la chaleur spécifique a un effet négligeable sur l'humidité relative intérieure (figure IV.3 (a)). Des observations similaires ont été constatées par Tran [8] où un changement de 25% dans la capacité thermique du béton de chanvre engendre une erreur de 0,3 °C dans la prédiction de la température et 0,6 % dans l'estimation de l'humidité relative de la pièce.

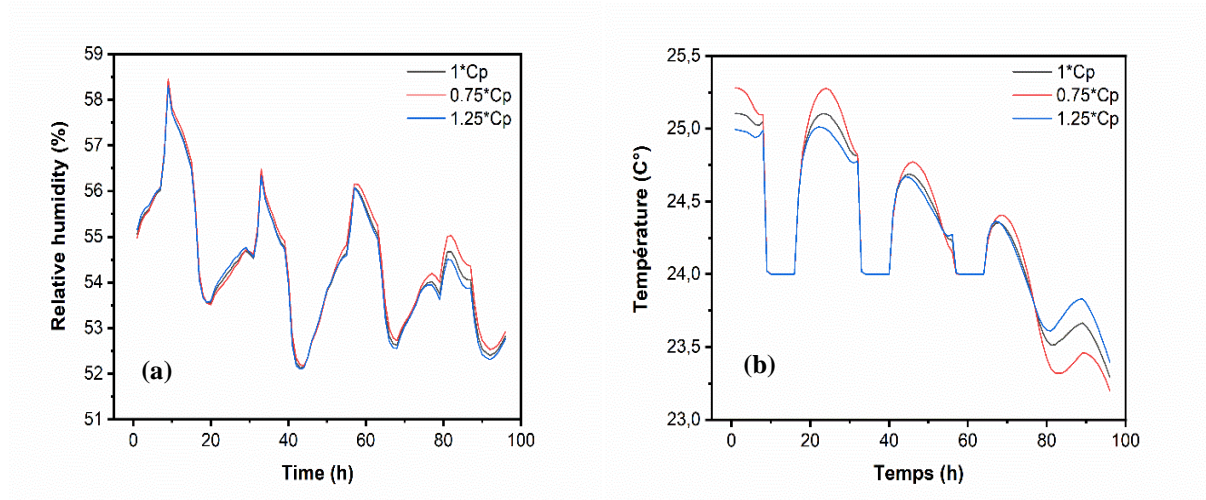


Figure IV.3. Impact de la chaleur spécifique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce

IV.3. Masse volumique (ρ)

L'impact de la masse volumique à l'état sec du DPC sur la température et l'humidité relative intérieure est montrée sur la figure IV.4. On remarque que son impact sur la température est similaire à celui de la chaleur spécifique car ils sont attachés l'un à l'autre par la diffusivité thermique. Pour l'humidité relative, nous pouvons constater que la masse volumique a une grande impacte sur sa prédiction. L'erreur dans l'humidité relative s'explique par le fait que plus la masse volumique du matériau augmente, plus la porosité du matériau diminue, ce qui réduit la capacité du transport d'humidité à travers les murs et par conséquent l'augmentation de l'humidité relative du bâtiment. Dans ce cas, un changement de 25% dans la masse volumique peut entraîner une erreur maximale de 0.4 °C sur la température et 3 % sur l'humidité relative de la pièce. Les résultats de la température sont en bon accord avec les résultats trouvés par Tan Le [8] où une variation de 25% de masse volumique engendre une erreur de 0.5 C°. Cependant, l'effet de la masse volumique de béton de chanvre est insignifiant sur l'humidité relative du bâtiment en béton de chanvre.

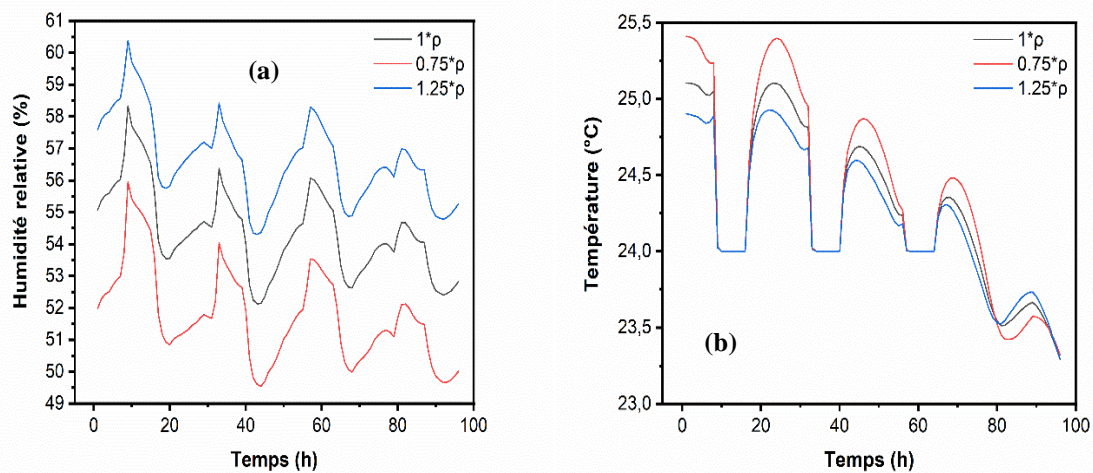


Figure IV.4. Impact de la masse volumique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.

IV.4. Facteur de la résistance à la vapeur (μ)

L'effet du facteur de résistance à la vapeur du DPC sur les conditions hygrothermiques de la pièce est illustrée da la figure IV.5. Nous pouvons remarquer que l'erreur sur ce paramètre a un effet négligeable sur la température de l'air intérieure. L'humidité relative intérieure pour le cas ($1.25 \times \mu$) est plus élevée que pour le cas ($0.75 \times \mu$) parce que l'augmentation du facteur de résistance à la vapeur entraine une diminution du flux d'humidité à travers les parois du bâtiment de l'ambiance intérieur vers l'ambiance l'extérieur ce qui permet d'augmenter l'humidité relative intérieure de la pièce. Une erreur de 0.7% sur l'humidité relative est observée lorsque la valeur du facteur de résistance à la vapeur varie de 25%. Les mêmes observations sont constatées par Alioua *et al.* [5] lors de l'analyse de sensibilité du modèle de Kunzel à l'échelle de la paroi. Leurs résultats montrent que l'influences du facteur de résistance à la diffusion sur le transfert thermique est négligeables tandis que le transfert d'humidité est très influencé par la variation de ce facteur.

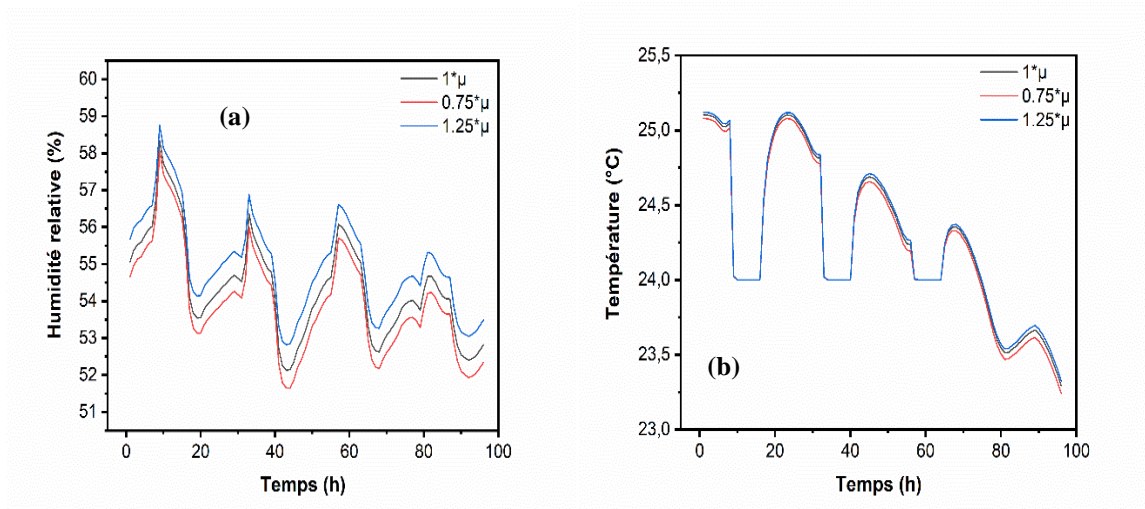


Figure IV.5. Impact du facteur de résistance à la vapeur sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.

IV.5. Isotherme de sorption (W)

L'influence de l'isotherme de sorption sur les conditions hygrothermiques de la pièce est montrée dans la figure IV.6. Une erreur de 25 % sur la valeur de l'isotherme de sorption entraîne une variation de 2.5 % sur l'humidité relative intérieure et une erreur de 0.15 °C sur la température intérieure. Cette petite erreur sur la température pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité thermique due à l'accumulation d'humidité dans les matériaux hygroscopiques. Pour l'humidité relative, plus l'isotherme de sorption du DPC augmente, plus la capacité d'adsorption du matériau augmente, ce qui provoque la diminution de l'humidité relative de l'air intérieur. Les résultats de Trant Le [8] confirment nos données où une variation de 25% de l'isotherme de sorption de béton de chanvre engendre une erreur de 3.3% et 0.2% dans l'humidité é et la température, respectivement.

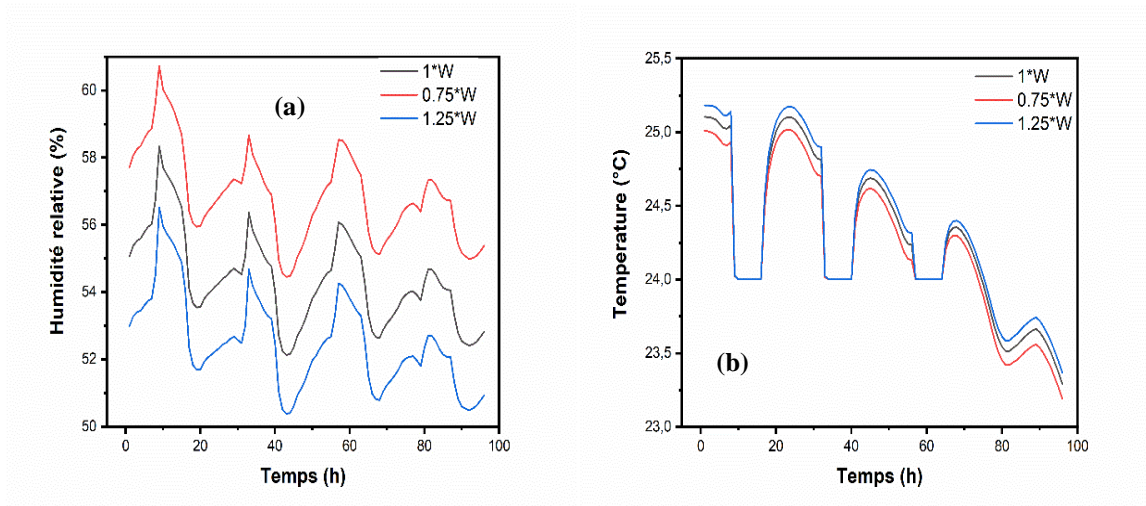


Figure IV.6. Impact de l'isotherme de sorption sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.

IV.6. Coefficient de convection thermique (h_t)

L'impact de coefficient de convection thermique sur l'humidité relative et la température de la pièce est illustré dans la figure IV.7. Les résultats révèlent que son impact est relativement faible et on constate que plus on augmente ce coefficient, plus la température intérieure augmente et l'humidité relative diminue, du fait de l'augmentation du flux de chaleur transféré à l'enveloppe du bâtiment. Dans ce cas, lorsque la variation des coefficients de convection extérieure est d'environ 25 %, la température et l'humidité relative varient respectivement de 0.1 °C et 0.3 %. L'effet de coefficient de convection thermique a été aussi étudié par Tran Le [8], leur résultat montre que son impact est relativement faible, ou une variation de 25% dans sa valeur engendre une erreur de 0.025% dans l'humidité relative et 0.06 C° dans la prédiction de la température.

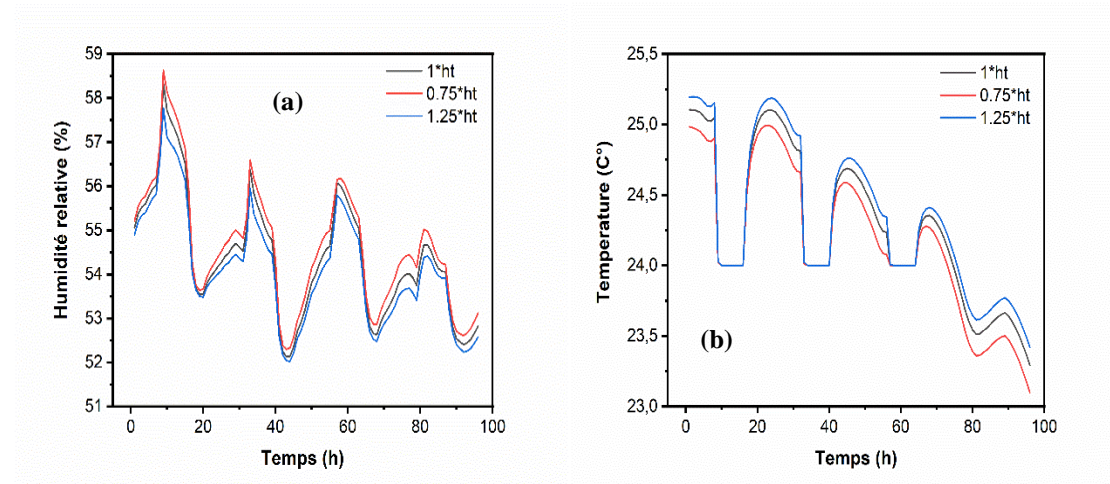


Figure IV.7. Impact de coefficient de convection thermique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.

IV.7. Coefficient de convections massique (h_m)

Les résultats obtenus révèlent que l'humidité relative intérieure et la température sont très proches, de sorte que l'influence des coefficients de convection de masse externe est négligé comme illustré dans la figure IV.8. Les mêmes observations sont contactées par Tran Le [8] lors son étude de sensibilité.

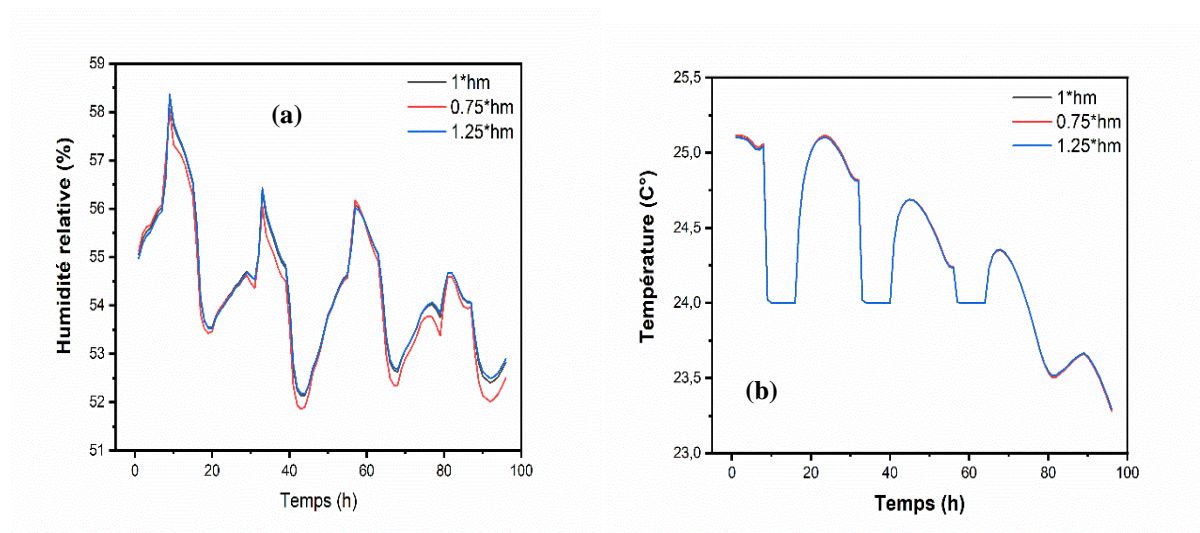


Figure IV.8. Impact de coefficient de convection massique sur : (a) l'humidité relative intérieure, (b) la température de la pièce.

IV.8. Sensibilité relative de la température et de l'humidité relative

Les recherches sur la sensibilité des modèles sont très demandées pratiquement dans tous les thématiques de recherche. L'étude de sensibilité globale (GSA) est préposée pour la détermination de l'erreur dans les données de sortie lors de changement des variables d'entrée, où les indications de sensibilité sont souvent résolus par l'approche de Monte Carlo [9]. L'étude de sensibilité locale (LSA) est préposée pour étudier la sensibilité du modèle pour une variable donnée [10]. Dans cette étude, nous nous intéressons à l'analyse de sensibilité locale (LSA). Pour évaluer l'impact des paramètres de simulation sur les profils numériques de température et d'humidité relative intérieures et sur la consommation d'énergie, la sensibilité relative est calculée à l'aide de la formule suivante [11]:

$$s(\%) = \frac{|X_{y-\Delta y} - X_{y+\Delta y}|}{2X_0} \cdot 100 \quad (1)$$

Où X est la solution du modèle (température, humidité relative ou consommation d'énergie), y représente le paramètre varié et X_0 le résultat obtenu lorsqu'aucun variable n'est modifié (valeurs de référence). La figure IV.9 (a) montre le changement de la sensibilité relative de la température à tous les variables avec un pourcentage de changement de 25 %. On note que la sensibilité relative envers la densité, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et le coefficient convectif de transport de chaleur est plus significative que les autres paramètres.

La sensibilité relative de l'humidité de l'air intérieur aux différents paramètres est représentée sur la figure IV.9 (b). Il faut noter que la sensibilité relative envers de la densité, de l'isotherme de sorption et du facteur de résistance à la vapeur est plus importante que les autres. Donc, dans ce cas, la sensibilité relative pour les paramètres λ , C_p et les coefficients de convection est négligeable.

Les résultats de Tran Le [8] montrent la sensibilité réduite de la température interne à λ , ρ , C_p sont plus importante par rapport aux autres. De plus, il a trouvé que la sensibilité réduite à $W(\text{hr})$ et au taux d'infiltration d'air, à λ , C_p et à ρ sont considérables par rapport aux autres paramètres.

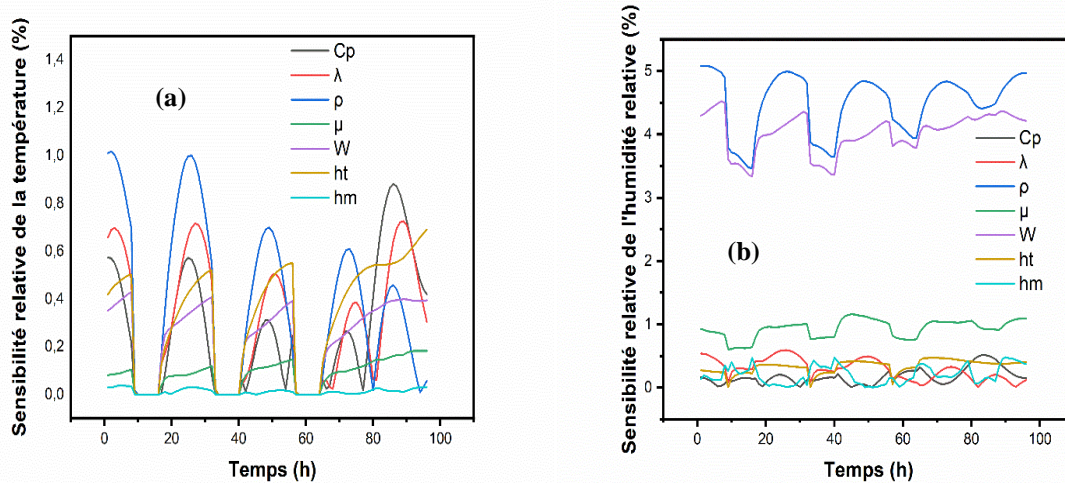


Figure IV.9. Evolution de la sensibilité relative de : (a) la température et (b) l'humidité relative pour tous les paramètres étudiés.

IV.9. Sensibilité de la consommation énergétique du bâtiment

Le tableau IV.2 montre l'impact des paramètres du modèle sur les besoins de refroidissement nécessaire pour maintenir la température de l'air intérieur à 24°C en période estivale. La sensibilité relative des besoins de refroidissement de la pièce aux différents propriétés a été étudiée en détail. On note qu'il est très sensible aux paramètres suivants (par ordre décroissant) : coefficients de convection de la chaleur, isotherme de sorption, chaleur spécifique, facteur de résistance à la vapeur, densité et conductivité thermique.

D'une part, l'augmentation de l'isotherme de sorption conduit à plus de consommation d'énergie en raison de l'accumulation d'humidité dans le matériau hygroscopique qui libère de l'énergie thermique dans la pièce. D'une autre part, la conductivité thermique plus élevée due à ce processus entraînera plus de gain de chaleur à travers les parois donc plus de consommation d'énergie. Ainsi, nous concluons que non seulement les paramètres thermiques ont une influence sur la consommation énergétique du bâtiment ; les paramètres hydriques ont également un impact important sur la consommation d'énergie.

Table IV.2 : Impacts des paramètres hygrothermiques du DPC sur la consommation d'énergie.

	Besoins de climatisation [W]		
	1×X	0.75×X	1.25×X
λ	149.26	144.84	150.44
ρ	149.26	154.01	142.47
C_p	149.26	133.17	160.14
μ	149.26	141.77	153.42
W	149.26	129.60	165.58
h_t	149.26	122.28	168.56
h_m	149.26	149.19	149.38

V. Etude paramétrique

V.1. Effet de la stratégie de ventilation

L'humidité dans le bâtiment dépend d'une combinaison de nombreux facteurs comme les sources d'humidité, les renouvellement d'air, le chauffage et la climatisation, les performances thermiques des enveloppes, les conditions extérieures et les occupants. Parmi les facteurs les plus important, l'effet tampons hydrique des matériaux de construction. Cependant, pour les espaces résidentiels, il a été rapporté dans la littérature que le l'effet tampon d'humidité des matériaux de construction diminue avec des taux de ventilation croissants [12]. Donc, il sera nécessaire d'étudier la relation entre le tampon d'humidité du DPC et le taux de ventilation.

En été et en périodes de transition, les conditions intérieures sont désagréables. Donc, pour améliorer la qualité de l'air l'intérieur, les gens remplacent souvent l'air intérieur par une ventilation naturelle, en ajustant l'humidité relative intérieure. Dans ce cas, la capacité du tampon hydrique des matériaux sera inévitablement affectée [7]. Dans cette étude on a établi différents types de stratégies de ventilation, en modifiant le taux de changement de l'air sur 0.25, 0.5, 1 et 2 ACH. Les figures IV.10 et IV.11 montrent les variations de l'humidité de l'air intérieur dans le bureau sous différents taux de renouvellement d'air pour une enveloppe

hygroscopique construite en DPC et un autre non-hygroscopique (DPC avec blocage du transfert massique), respectivement.

Pour l'enveloppe hygroscopique, on constate que plus la valeur de taux de ventilation est élevée, plus les valeurs de l'humidité relative intérieure sont proches à ceux de l'extérieur. Car, durant l'été, le matériau hygroscopique était dans un état de désorption de l'humidité. Avec l'air sèche entrant dans la pièce, les conditions intérieures deviennent de plus en plus sèches. En outre, La fluctuation d'humidité avec le petit taux de renouvellement de l'air (0.25 ACH) était la plus atténuée, proche de 55 %. Les performances hydriques de l'enveloppe hygroscopique étaient la plus élevée dans ce cas. Avec l'augmentation de la valeur de taux de ventilation, les fluctuations de l'humidité relative intérieure augmentent, diminuant les performances de désorption du matériau. Des résultats similaires sont rapportés par Yu *et al* [7] où l'humidité relative intérieure d'une enveloppe hygroscopique multicouche reste toujours la plus proche de 50% dans le cas sans ventilation. Cela signifiait que les performances hydriques sont les plus importantes dans ce cas. Les auteurs ont remarqué que l'augmentation de la valeur du taux de renouvellement d'air permet de diminuer l'humidité intérieure et d'augmenter les fluctuations d'humidité relative, donc, une diminution de la capacité d'absorption d'humidité des matériaux hygroscopique.

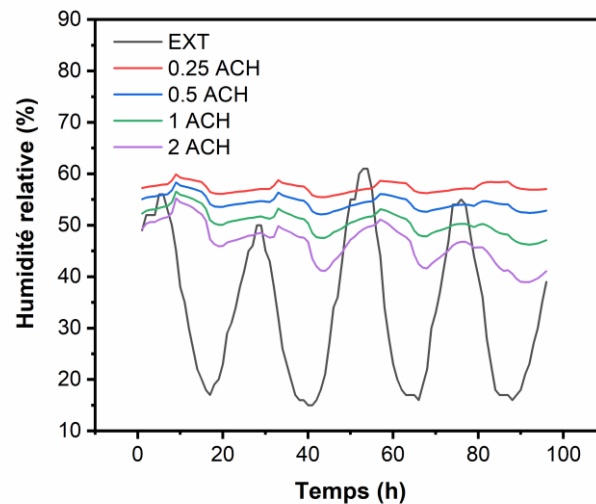


Figure IV.10. Variation de l'humidité relative intérieure avec le taux de renouvellement d'air une l'enveloppe hygroscopique.

La figure IV.11 montre que l'humidité intérieure pour une enveloppe non hygroscopique présente la même allure de changement que l'humidité relative extérieure, avec un peu de retard. On constate que : en augmentant le taux de renouvellement d'air, l'humidité relative intérieure reste quasiment là même pour tous les cas. La fluctuation d'humidité avec le petit taux de renouvellement de l'air (0.25 ACH) augmente au cours du temps en raison de l'accumulation de l'humidité produite dans la pièce et l'absence de l'échange avec l'enveloppe.

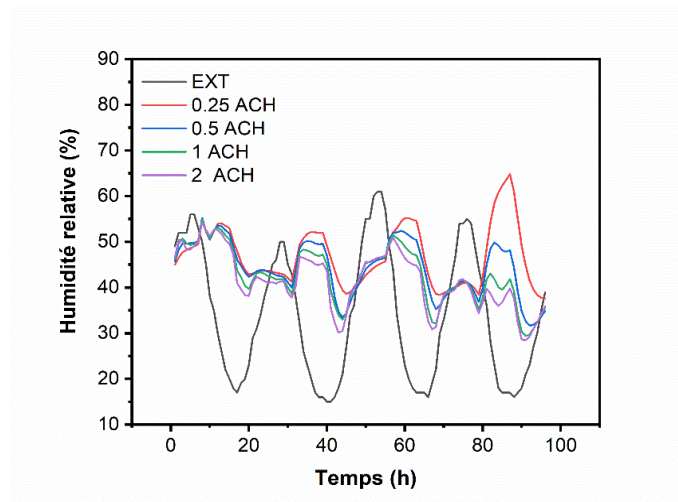


Figure IV.11. *Variation de l'humidité relative intérieure avec le taux de renouvellement d'air pour une l'enveloppe non-hygroscopique.*

On peut conclure que pour une enveloppe hygroscopique en DPC, on n'a pas besoin d'un taux de ventilation élevé pour obtenir des valeurs d'humidité relative intérieure qui satisfait les exigences du confort intérieur, fixées par les normes qui sont aux environs de 50% (ASHRAE (2013)). Car le DPC a la capacité de réguler l'humidité à l'intérieur du bâtiment. En revanche, en cas d'une enveloppe non-hygroscopique (construction traditionnel), la ventilation naturelle ne permet pas d'assurer les besoins du confort donc le recours vers la ventilation mécanique et les systèmes de climatisation est nécessaire. Donc, une consommation énergétique supplémentaire.

V.2. Effet des conditions initiales

Une grande différence dans certains paramètres initiaux des matériaux de construction peut y avoir lieu en raison de différentes raisons comme : la fabrication des matériaux, l'environnement de l'atelier et de production ainsi que le climat et les saisons. Les performances hydriques des matériaux dépendent du gradient d'humidité entre le matériau lui-même et l'air

intérieur. Une fois le matériau est transporté du lieu de production au bâtiment, l'échange d'humidité entre les matériaux et l'environnement intérieur ne cesse pas jusqu'à l'équilibre. Par conséquent, il y avait un impact significatif de la teneur en humidité initiale du matériau sur les performances des matériaux [13]. Dans ce travail nous avons étudié l'effet des conditions initiales. Pour cela, différentes teneurs initiales en humidité massique, particulièrement 0 kg/kg, 0.02 kg/kg, 0.04 kg/kg, 0.06 kg/kg et 0.08 kg/kg ont été considérées. La figure IV.12 montre que la condition initiale a un effet très significatif sur le profil d'humidité relative intérieure. Nous pouvons voir que plus l'humidité relative initiale est élevée, plus l'humidité relative intérieure sera élevée. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le matériau libère plus de vapeur d'eau dans l'air intérieur. Nos résultats révèlent que l'humidité relative de la pièce est très sensible aux conditions initiales ce qui indique que le DPC nécessitent un pré-séchage ou une pré-humidification avant d'être utilisé. En revanche les résultats rapportés par Yu *et al* [7] montrent l'humidité relative de l'air intérieur s'influe légèrement par le changement de la teneur en eau initiale.

La figure IV.13 montre la variation de la température du local lorsque la teneur en eau initial varie de 0 à 0.8 kg/kg. Lorsqu'on passe d'une teneur initiale en eau de 0.02 kg/kg à 0.08 kg/kg, l'erreur dans la température ne dépasse pas 0.5 C°. Pour une teneur initiale en eau de 0 kg/kg une légère erreur de l'ordre de 1C° peut apparaitre par rapport au cas de référence (0.02 kg/kg). Les résultats de la consommation d'énergie (figure IV.14) confirment ceux de la température, pour une plage de 0.04 kg/kg à 0.08 kg/kg une erreur relativement faible dans les résultats est produite. Cependant, la supposition des teneurs initiales plus faibles en eau engendre des erreurs importantes dans l'estimation de la consommation d'énergie.

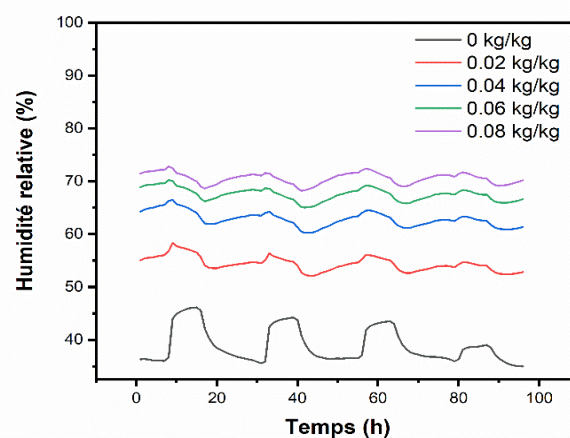


Figure IV.12. Effet de la teneur initiale en eau du DPC sur l'humidité relative intérieure.

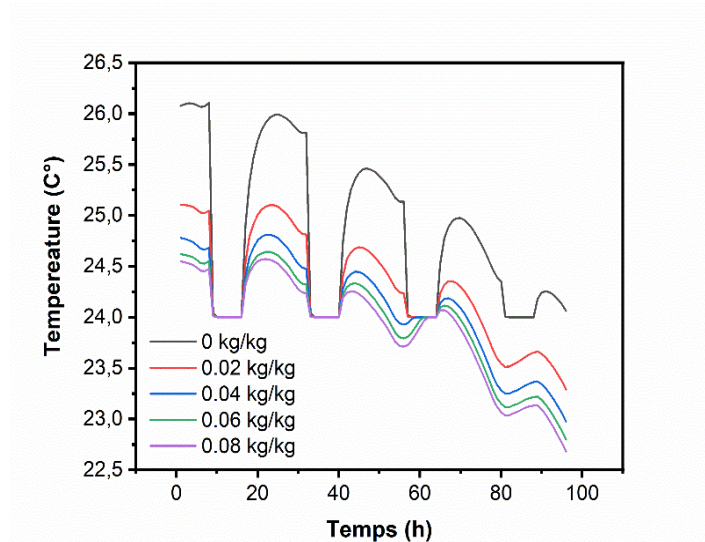


Figure IV.13. *Effet de la teneur initiale en eau du DPC sur la température intérieure.*

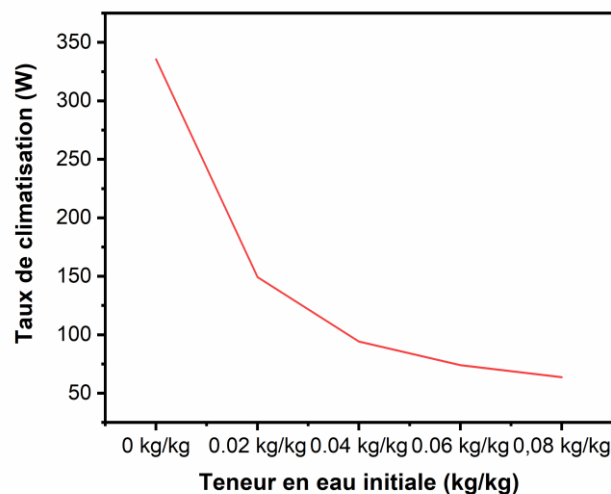


Figure IV.14. *Effet de la teneur initiale en humidité du DPC sur la consommation d'énergie.*

On peut conclure que la mauvaise estimation des conditions initiales du matériau entraîne des erreurs importantes dans les calculs des conditions intérieures, il est donc nécessaire de préciser ces informations avant d'effectuer une simulation. Ainsi, un pré-séchage ou une pré-humidification des matériaux de construction hygroscopique s'avère indispensable.

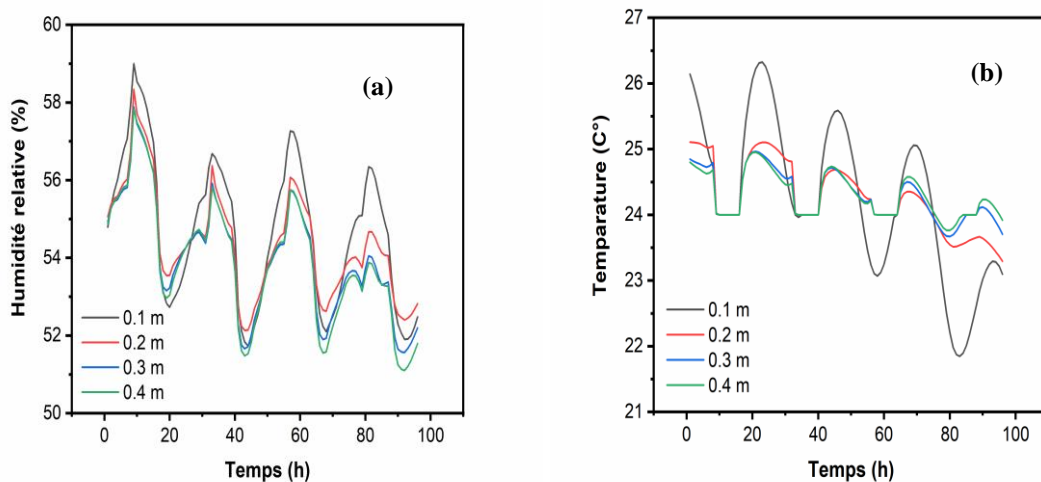
V.3. Effet de l'épaisseur de l'enveloppe

Les épaisseurs des couches des matériaux de construction peuvent être différentes en raison de différences entre les fabricants ainsi que dans les propriétés des matériaux. Selon la littérature, plus la surface des matériaux hygroscopiques dans la pièce est élevée, plus la performance du

bâtiment est élevée [14]. Par conséquent, de nombreux usagers pensent que si les matériaux hygroscopiques sont plus épais, ils auront des conditions hygrothermiques meilleures. Pour vérifier cette supposition, nous avons établi plusieurs épaisseurs de l'enveloppe, en l'occurrence : 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m et 0.4 m.

La figure IV.15 (a) montre les fluctuations de l'humidité relative intérieure en utilisant différentes épaisseurs de l'enveloppe en DPC. Les résultats montrent que l'épaisseur a un faible impact sur les performances hydriques des matériaux hygroscopiques. Cependant, en doublant l'épaisseur des matériaux hygroscopiques, la différence en termes de la performance hydrique sera négligeable. Les résultats de Yu et al [7] montrent que l'épaisseur de l'enveloppe a un faible impact sur les performances de tampon hydrique des matériaux hygroscopiques, ce qui confirme nos résultats.

La variation de la température pour différentes épaisseurs de l'enveloppe est illustrée dans la figure IV.15 (b). On constate que pour une épaisseur de 0.1 m les fluctuations de la température sont plus importantes. Cette observation peut être expliquée par la diminution de l'inertie thermique du bâtiment. L'inertie thermique est le résultat de la masse de l'enveloppe du bâtiment. Plus l'enveloppe est lourde, plus son inertie thermique est significative et son aptitude de stocker l'énergie thermique est importante et elle se chauffe et se refroidit progressivement. En doublant l'épaisseur, la température suit presque la même variation pour les trois cas considérés (0.2 m, 0.3 m et 0.4 m). La même observation est constatée pour la consommation énergétique du bâtiment (figure IV.15 (c)).



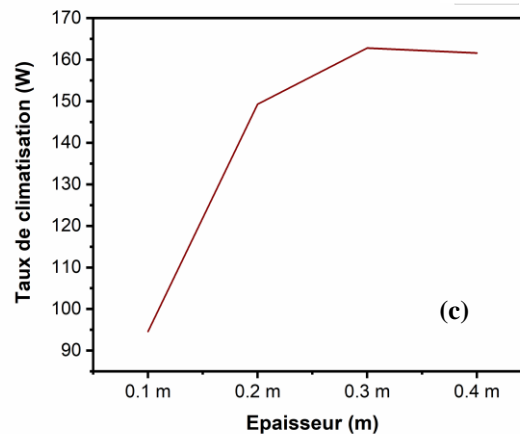


Figure IV.15. Effet de l'épaisseur de l'enveloppe sur : (a) l'humidité relative, (b) la température et (c) la consommation d'énergie du bâtiment.

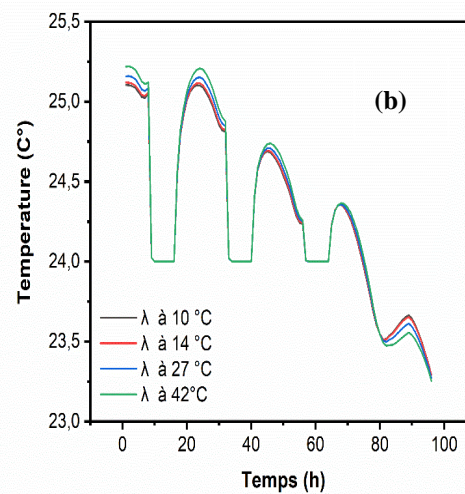
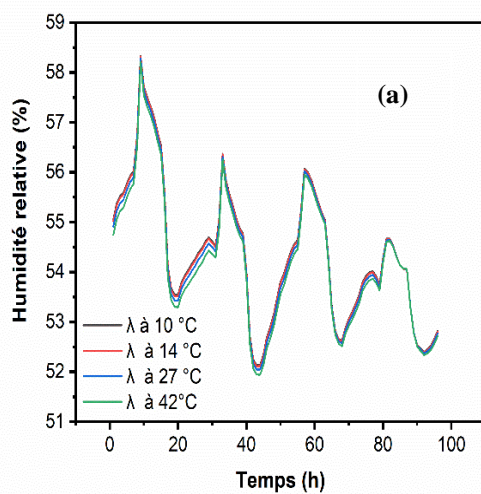
V.4. Effet de la thermo-dépendance et de la dépendance à l'humidité des paramètres hygrothermiques

La valeur précise des propriétés thermo-hydrrique des matériaux de construction des bâtiments et le calcul du transfert hygrothermique sont cruciaux pour l'analyse de la consommation énergétique du bâtiment et le dimensionnement des équipements de climatisation. Généralement, les simulations s'effectuent pour des propriétés indiquées dans les manuels correspondants a des valeurs fixes de température et d'humidité relative normale. Des recherches ont montré que la température et la teneur en eau sont des facteurs clés influençant les propriétés thermo-hydrrique des matériaux de construction. Le transfert hydrrique dans l'enveloppe du bâtiment a un impact significatif sur le transfert de thermique, en particulier dans les zones extrêmement chaudes et humides [15]. Les travaux de Haba [16] montrent que la conductivité thermique du DPC est très sensible à la variation de la température et de l'humidité relative extérieure ; à cause de sa structure poreuse (plus d'informations se trouve dans le chapitre II). Néanmoins, si la littérature offre suffisamment de références sur cet aspect à l'échelle de matériaux, rares sont les travaux effectués à l'échelle du local, surtout celles qui traitent les effets des transferts de mass et de chaleur sur les conditions hygrothermiques et des consommations d'énergie associées. Donc, cette partie de l'étude est consacrée à étudier la thermo-dépendance et la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique du DPC ainsi que les effets produits sur le confort hygrothermique et les consommations énergétiques d'un bâtiment. La conductivité thermique du DPC est le paramètre choisi pour l'étude car c'est la propriété hygrothermique mesurée pour différentes températures et humidités relatives dans des travaux antérieurs.

L'erreur de l'humidité relative, de la température et de la consommation d'énergie due à la thermo-dépendance de la conductivité thermique est illustrée dans la figure IV.16. Un effet insignifiant de la thermo-dépendance de la conductivité thermique sur l'humidité relative intérieure a été constatée. Cependant, une petite augmentation de la température (0.1 C°) due à l'augmentation de la conductivité thermique à des températures élevées est observée. Pour la consommation d'énergie, des résultats similaires sont obtenus où la thermo-dépendance de la conductivité thermique montre un effet insignifiant sur la prédiction des besoins énergétiques.

L'effet de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique sur les résultats numériques est montré dans la figure IV.17. Une erreur de 0.5% dans la prédiction de l'humidité relative est trouvée si les simulations s'effectuent avec la conductivité thermique pour le matériau sec, par contre la température montre une cohérence des courbes pour les valeurs de la conductivité thermique à l'état sec et humide. Cependant, une erreur relative de 2.5% dans la prédiction du taux de climatisation est constatée (Tableau IV.3). Ces résultats montrent le fort couplage entre le transfert thermique et massique ainsi que la faible sensibilité de modèle à la thermo-dépendance et de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique.

Des observations similaires sont rapportées dans les travaux de Costantine *et al.* [17], leur recherche montre une cohérence des résultats entre le modèle HAMT standards et le modèle qui considère la thermo-dépendance de l'isotherme de sorption. De faibles erreurs sont aperçus pour la température, l'humidité relative et les besoins de chauffage et de climatisation.



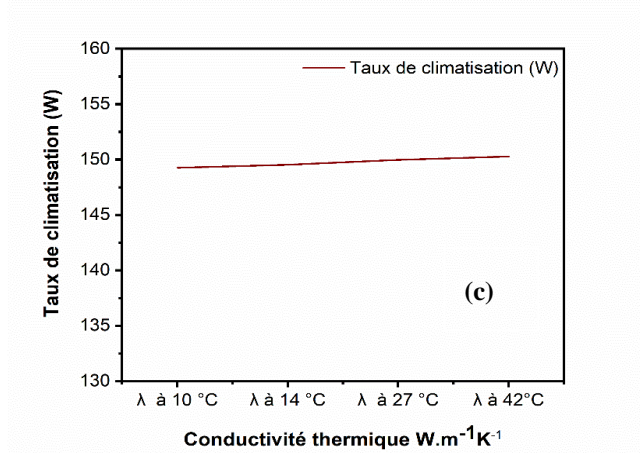


Figure IV.16. Effet de la thermo-dépendance de la conductivité thermique sur la prédiction de : (a) l’humidité relative, (b) la température et (c) les besoins de climatisation.

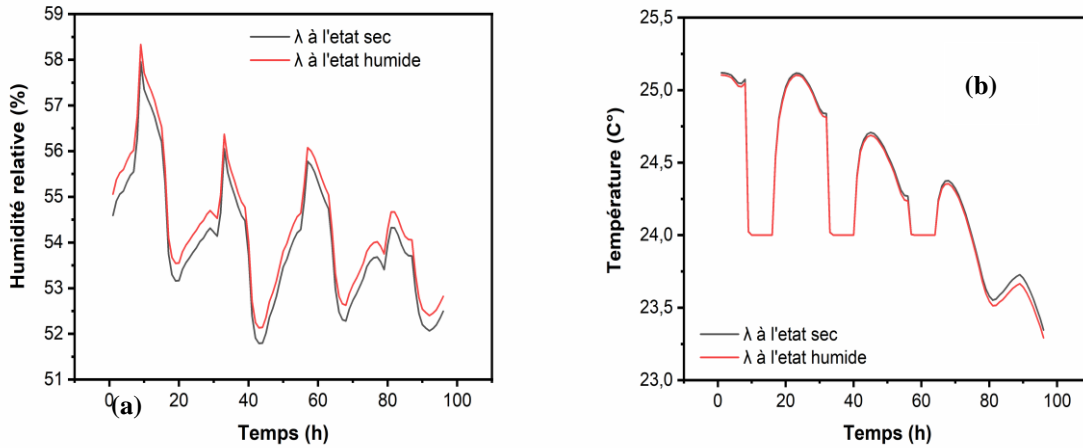


Figure IV.14. Effet de la dépendance à l’humidité de la conductivité thermique sur la prédiction de : (a) l’humidité relative et (b) la température.

Tableau IV.3 : Effet de la dépendance à l’humidité de la conductivité thermique sur les besoins de climatisation

	λ a l'état sec	λ a l'état humide	Erreur relative (%)
Besoins de climatisation (w)	153	149.26	2.5

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude paramétrique détaillée sur le comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques a été effectuée. Dans un premier temps, une analyse de sensibilité du modèle HAMT envers la variation des propriétés hygrothermiques du matériau a été réalisée. Cette étude a montré que l'humidité relative intérieure est très sensible à l'isotherme de sorption et à la masse volumique du DPC. De même, la température intérieure est sensible à la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité calorifique et au coefficient de transport de chaleur par convection. La consommation énergétique est très sensible au coefficient de transport de chaleur par convection extérieure, à l'isotherme de sorption et à la capacité calorifique du matériau hygroscopique. Par conséquent, une attention spécifique doit être portée lors de la mesure de ces paramètres. Ensuite, en simulant différents taux de renouvellement d'air, différentes épaisseurs et différentes teneurs initiales en humidité, et en comparant les conditions intérieures, nous avons montré la complexité des applications des matériaux hygroscopiques. Les résultats montrent que des taux faibles d'échange d'air peuvent améliorer les performances du béton de palmier dattier (DPC). La teneur initiale en humidité de l'enveloppe en DPC a un impact important, tandis que son épaisseur a peu d'impact sur les performances hydriques du bâtiment en DPC et son effet pourrait être négligé. Enfin, étude de l'impact de la thermo-dépendance et de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique à l'échelle du bâtiment a été abordée. Les résultats montrent une cohérence des courbes pour les valeurs de la conductivité thermique à différentes températures. Des petites erreurs sont détectées pour l'humidité relative et pour les besoins de climatisation si on néglige la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique. Les résultats mettent en évidence la faible sensibilité du modèle à la thermo-dépendance et de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique.

References

- [1] F. Collet-Foucault, "Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux," Rennes, INSA, 2004.
- [2] A. Evrard, "Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials," *Université catholique de Louvain*, 2008.
- [3] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 348-356, 2018.
- [4] 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.
- [5] T. Alioua, B. Agoudjil, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Sensitivity analysis of transient heat and moisture transfer in a bio-based date palm concrete wall," *Building and Environment*, p. 108019, 2021.
- [6] A. T. Le *et al.*, "Effect of simulation parameters on the hygrothermal behaviour of a wall and a room made of hemp-lime concrete," *Int. J. Math. Model. Methods*, vol. 8, pp. 521-528, 2014.
- [7] S. Yu, Y. Cui, Y. Shao, and F. Han, "Research on the comprehensive performance of hygroscopic materials in an office building based on energyplus," *Energies*, vol. 12, no. 1, p. 191, 2019.
- [8] L. TRAN and A. Dung, "Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment," Thèse de doctorat, Université de Reims, 2010.
- [9] H. M. Wainwright, S. Finsterle, Y. Jung, Q. Zhou, and J. T. Birkholzer, "Making sense of global sensitivity analyses," *Computers & Geosciences*, vol. 65, pp. 84-94, 2014.
- [10] J. Morio, "Global and local sensitivity analysis methods for a physical system," *European journal of physics*, vol. 32, no. 6, p. 1577, 2011.
- [11] A. Boudenne, L. Ibos, and Y. Candau, "Analysis of uncertainties in thermophysical parameters of materials obtained from a periodic method," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 7, p. 1870, 2006.
- [12] H. Yoshino, T. Mitamura, and K. Hasegawa, "Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions," *Building and environment*, vol. 44, no. 7, pp. 1418-1425, 2009.
- [13] O. F. Osanyintola and C. J. Simonson, "Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact," *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 10, pp. 1270-1282, 2006.
- [14] S. Melero Tur, S. García Morales, and F. J. Neila González, "Design and evaluation of a dehumidifying plaster panel for passive architecture integration," *Revista de la Construcción*, vol. 14, no. 2, pp. 21-28, 2015.
- [15] Y. Wang, K. Liu, Y. Liu, D. Wang, and J. Liu, "The impact of temperature and relative humidity dependent thermal conductivity of insulation materials on heat transfer

- through the building envelope," *Journal of Building Engineering*, vol. 46, p. 103700, 2022.
- [16] B. Haba, "Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques des matériaux biosourcés et locaux," UB1, 2017.
- [17] G. Costantine, C. Maalouf, E. Kinab, and G. Polidori, "Numerical Investigation of the Hygrothermal Behaviour of a Hemp-Concrete Room: Hysteresis Effect of the Sorption Isotherm and its Temperature Dependency," *Building Simulation*, vol. 201, 2017.

Conclusion générale et perspectives

L'étude du comportement hygrothermique de béton de bois de palmier dattier (DPC) à l'échelle du bâtiment constitue le but principal de cette thèse. L'objectif c'était de mettre en évidence les performances de ce matériau en terme de régulation des conditions intérieures et d'économie d'énergie, ainsi que d'optimiser son utilisation à grande échelle à travers une étude paramétrique.

Les travaux de cette thèse s'articulent autour de trois parties principales :

- La modélisation des phénomènes de transfert hygrothermique et la validation du modèle HAMT pour l'étude du DPC.
- L'étude de l'effet du transfert massique sur le comportement hygrothermique d'un bâtiment en DPC ainsi que la comparaison des performances de ce matériau avec un matériau de construction conventionnel.
- L'étude de l'influence de plusieurs paramètres de simulation sur la prédiction du comportement thermo-hydrigue des enveloppes hygroscopiques.

Dans le premier chapitre, l'étude réalisée a permis de mettre en évidence la nécessité de la transition vers l'utilisation des matériaux de construction biosourcés afin de réduire les charges de chauffages et de climatisation, les émissions de CO₂ et d'assurer un confort hygrothermique dans l'habitat et une bonne qualité de l'air intérieur. Nous avons également présenté les travaux effectués sur le DPC à l'échelle de la paroi et de mur et nous avons montré la nécessité des recherches à l'échelle du bâtiment surtout celles qui s'intéressent au confort ressenti à l'intérieur des logements construits en DPC. La dernière partie du chapitre I a été consacré à la présentation des modèles et des approches de modélisation des transferts hygrothermiques dans les enveloppes hygroscopiques afin de choisir un modèle convenable pour l'étude du DPC.

Dans le deuxième chapitre, la présentation du modèle décrivant le transfert de masse et de chaleur au seins des enveloppes hygroscopiques a été effectuée. Cette étape nous a permis de choisir un outil de simulation adéquat ainsi que de comprendre sa méthode de discrétisation spatiale et temporelle des équations des transferts hygrothermiques. Dans la dernière partie de ce chapitre, la validation du modèle hygrothermique choisi a été effectuée expérimentalement et analytiquement. Les résultats ont montré que la précision du modèle HAMT était suffisante et l'outil de simulation pourrait être appliqué pour l'étude des matériaux hygroscopiques comme le DPC à l'échelle du bâtiment.

Le troisième chapitre de cette thèse a été consacré à l'étude des performances hygrothermiques du bâtiment en DPC. Dans un premier temps, le modèle HAMT a été utilisé pour étudier

l'influence du transfert de masse à travers l'enveloppe du bâtiment sur les conditions hygrothermiques et la consommation énergétique du bâtiment en DPC pour différents cas. Les résultats révèlent que l'effet principal du transfert de masse sur les résultats numériques apparaît en été, où une inexactitude de 37% dans le taux de refroidissement a été trouvée. En outre, cette étude souligne la capacité de l'enveloppe de DPC à réguler l'humidité intérieure dans une plage de (50-60%) et à améliorer la qualité de l'air intérieur. Finalement, les performances hygrothermiques du DPC et des matériaux de construction conventionnels (béton cellulaire autoclavé, AAC) ont été comparées en termes d'inertie thermique et hydrique, d'économie d'énergie et de risque de condensation. Les résultats montrent que le DPC atténue et retarde considérablement les pics de la température extérieure, atténue les variations d'humidité relative et réduit les charges de refroidissement, en particulier dans les climats humides et semi-arides. De plus, DPC garantit qu'il n'y a aucun risque de condensation de vapeur se produisant sur les surfaces de l'enveloppe.

Dans le dernier chapitre de cette thèse, une étude paramétrique détaillée sur le comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques a été effectuée. Dans un premier temps, l'analyse de sensibilité du modèle HAMT montre que l'humidité relative intérieure est très sensible à l'isotherme de sorption et à la masse volumique du DPC. De même, la température intérieure est sensible à la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité calorifique et au coefficient de transport de chaleur par convection. La consommation d'énergie est très sensible au coefficient de transport de chaleur par convection extérieure, à l'isotherme de sorption et à la capacité calorifique du matériau hygroscopique. Par la suite, l'étude paramétrique nous a montré la complexité des applications des matériaux hygroscopiques. Les résultats montrent que des taux faibles d'échange d'air peuvent améliorer les performances du béton de palmier dattier (DPC). La teneur initiale en humidité de l'enveloppe en DPC a un impact important, tandis que son épaisseur a peu d'impact sur les performances hydriques et son effet pourrait être négligé. Enfin, Les résultats de ce chapitre mettent en évidence la faible sensibilité du modèle à la thermo-dépendance et de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique.

En résumé, cette thèse a permis de mettre en exergue les performances prometteuses du béton de bois de palmier dattier surtout dans les climats humides et semi-arides. De plus, l'étude paramétrique a fournie une analyse théorique et des conseils techniques pour la recherche, l'ingénierie et la fabrication afin d'améliorer les résultats numériques et optimiser l'utilisation du DPC comme enveloppe du bâtiment.

Perspectives :

Les travaux effectués dans cette thèse ouvrent plusieurs perspectives de recherches futures, particulièrement :

Sur le plan numérique, les travaux effectués ne prennent en compte que la courbe d'adsorption à température fixe sans considération du phénomène d'hystérésis entre la phase d'adsorption et de désorption. Donc, pour une prédiction précise du comportement hygrothermique du DPC, il serait nécessaire de :

- Prendre en considération du phénomène d'hystérésis par le biais d'une approche numérique adéquate.
- Modélisation de la thermo-dépendance de la courbe de sorption et la prise en compte de ce phénomène lors de la simulation.

Sur le plan expérimental, il est important de :

- Réaliser un prototype à l'échelle du locale en DPC, qui serait nécessaire pour la validation des modèles améliorés et pour le traitement des problèmes apparus dans les bâtiments comme les pentes thermiques.
- Améliorer les performances thermiques et mécaniques du DPC par des techniques comme le traitement chimique des fibres de bois de palmier dattier.

Titre de la thèse : Contribution à l'étude du comportement thermo-hydrigue dans des enveloppes de bâtiments à fort hygroscopie.

Auteur : Belloum Rahma

Mots clés : Matériaux biosourcés, transfert de chaleur et de masse, sollicitation thermique dynamique, échelle bâtiment, DPC.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre général de l'élargissement et le développement des matériaux biosourcés comme matériaux de construction isolants et à faible coût. Dans cette thèse, une étude numérique détaillée du comportement hygrothermique de béton de bois de palmier dattier (DPC) à l'échelle du bâtiment a été réalisée. Premièrement, le modèle du transfert de masse et de chaleur à l'échelle du local a été présenté et validé avec des données expérimentales et analytiques. Par ailleurs, l'effet du transfert massique à travers l'enveloppe sur les conditions hygrothermiques intérieures a été étudié. Les résultats indiquent que le transfert de masse influence de manière significative l'humidité relative intérieure et la consommation d'énergie des bâtiments, notamment en période estivale. En revanche, la température intérieure reste moins influencée par le transport de masse à travers les murs du bâtiment. Par la suite, les performances hygrothermiques du DPC et d'un matériau de construction conventionnel (béton cellulaire autoclavé, AAC) ont été comparées en termes d'inertie thermique et hydrique, d'économie d'énergie et de risque de condensation. Les résultats montrent que le DPC atténue et retarde considérablement les variations de température et d'humidité relative et réduit les charges de climatisation, en particulier dans les climats humides et semi-arides. De plus, le DPC garantit qu'il n'y a aucun risque de condensation de vapeur se produisant sur les surfaces de l'enveloppe. Dans la dernière partie, une étude paramétrique du comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques a été réalisée. Les résultats de cette étude montrent qu'une attention particulière doit être portée lors de la mesure de certains paramètres comme l'isotherme de sorption, la densité et la conductivité thermique. Car une variation relativement faible dans ces propriétés peut engendrer des erreurs importantes dans la prédiction des conditions hygrothermiques intérieures. Cette étude paramétrique a permis aussi de mettre en évidence l'effet important de taux de ventilation et des conditions initiales sur les performances de l'enveloppe hygroscopique contrairement à l'épaisseur. Par ailleurs, il a été trouvé que la thermo-dépendance et l'hygro-dépendance de la conductivité ont un effet négligeable sur la prédiction des conditions intérieures.

Title: Contribution to the study of thermo-hydric behavior in building envelopes with high hygroscopy.

Keywords: Bio-based materials, heat and mass transfer, dynamic thermal stress, building scale, DPC.

Abstract

This research is part of a larger effort to develop bio-based materials into economical, insulating construction materials. The hygrothermal performance of date palm concrete (DPC) at the building scale was numerically studied in this thesis. First, a heat and mass transfer model was proposed and verified using analytical and experimental data. Following that, the impact of mass transfer through the envelope on the indoor hygrothermal conditions was investigated. The results indicate that mass transfer has a considerable impact on indoor relative humidity and building energy consumption, particularly in the summer. Contrarily, the mass transfer through the building's walls has less of an impact on the interior temperature. The hygrothermal performances of DPC and a traditional building material (autoclaved aerated concrete, AAC) were compared in the following section in terms of thermal and hydric inertia, energy savings, and condensation risk. The findings demonstrate that DPC greatly reduces cooling loads, especially in humid and semi-arid climates, and attenuates and delays fluctuations in temperature and relative humidity. DPC also assures that there is no risk of vapor condensation on the surfaces of the walls. This study's final section included a parametric analysis of the hygrothermal behavior of hygroscopic envelopes. The findings of this study demonstrate the need for additional precautions when measuring specific parameters like sorption isotherm, density, and thermal conductivity. Because even very slight changes in these characteristics can create large inaccuracies in the prediction of interior hygrothermal conditions, this parametric study also highlights the significant effect of the ventilation rate and the initial conditions on the performance of the hygroscopic envelope, unlike the thickness. The thermo- and hygro-dependence of conductivity, on the other hand, was revealed to have a negligible effect on the prediction of interior conditions.