



HAL
open science

Optimisation des performances hygrothermiques des matériaux biosourcés pour application dans le bâtiment

Arielle Mélissa Omeme Ada

► **To cite this version:**

Arielle Mélissa Omeme Ada. Optimisation des performances hygrothermiques des matériaux biosourcés pour application dans le bâtiment. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Picardie Jules Verne, 2022. Français. NNT : 2022AMIE0074 . tel-04095081

HAL Id: tel-04095081

<https://theses.hal.science/tel-04095081>

Submitted on 11 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse de Doctorat

*Mention Sciences pour l'ingénieur
Spécialité Génie Civil*

présentée à l'*Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585)*

de l'Université de Picardie Jules Verne

par

Arielle Melissa OMEME ADA

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

Optimisation des performances hygrothermiques des matériaux biosourcés pour application dans le bâtiment

Soutenue le 15/12/2022, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

M. Fabien BOGARD, Professeur à l'URCA	Président
M. Ton Hoang MAI, Professeur à l'URCA	Rapporteur
M. Abderrahim BOUDENNE, Professeur à l'UPEC	Rapporteur
M. Laurent ZALEWSKI, Professeur à l'Université d'Artois	Examineur
M. Thierry LANGLET, Professeur à l'UPJV	Directeur de thèse
M. Anh Dung TRAN LE, Maître de conférences à l'UPJV	Co-Directeur de thèse

Socrate a dit « *Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien* ».

Vu que je ne sais rien, je me demande toujours le pourquoi de chaque chose et pourquoi pas autre chose. Par conséquent, j'espère qu'en parcourant ce mémoire vous trouverez le « Pourquoi » de cette thèse et que vous aurez beaucoup de « Pourquoi pas ». Car, *la connaissance n'est que provisoire et jamais absolue.*

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été réalisés entre 2019 et 2022 au sein de l'équipe Matériaux Habitat et Transfert du Laboratoire de Technologie Innovantes (LTI) de l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV). Ces travaux s'inscrivant dans la liste des travaux de l'A2U (union de trois universités : Université d'Artois, Université du Littoral Côte d'Opale et Université de Picardie Jules Verne) ont été réalisés en collaboration avec le Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnemental (LGCgE) de l'Université d'Artois.

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Pr Thierry LANGLET et Dr Anh Dung TRAN LE, qui ont eu confiance en moi en me permettant de travailler sur ce projet. Je leurs suis reconnaissante pour : tous les conseils avisés, corrections, relectures, encouragements, Etc. Malgré les aléas et difficultés, ils étaient toujours disponibles et m'apportaient toujours le soutien nécessaire pour que je puisse avancer dans mes travaux. Merci, de m'avoir transmise votre rigueur et enthousiasme face au travail, de m'avoir amenée à développer mon esprit critique, surtout d'avoir su communiquer et partager votre passion pour la recherche avec moi.

Un merci particulier à l'équipe du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnemental (LGCgE) de l'Université d'Artois qui m'a aidée à réaliser toutes les études thermiques sur les matériaux étudiés. Pr. Laurent ZALEWSKI et Dr. Pierre TITTELEIN, Merci d'avoir fait de cette collaboration un succès.

Les travaux expérimentaux de cette thèse n'auraient pas abouti sans l'aide des membres de l'équipe MHT et des personnels techniques du département de Génie Civil Construction Durable de l'IUT d'Amiens. J'exprime tous mes remerciements et toute ma reconnaissance à tous pour : leur disponibilité, leurs compétences, leurs aides et leur sympathie.

Un Merci chaleureux aux anciens et actuels doctorants avec lesquels j'ai partagé : moments de convivialité, franches rigolades et discussions enflammées sur les méthodes de mesures, Etc.

Je dis Merci aux enseignants du département de Génie Civil Construction Durable de l'IUT d'Amiens qui m'ont immédiatement intégrée à l'équipe pédagogique et avec lesquelles j'ai appris et travaillé durant mon année d'ATER.

Je remercie particulièrement les membres du jury d'avoir accepté d'expertiser ma thèse : Pr. Fabien BOGARD, Pr. Ton Hoang MAI, Pr. Abderrahim BOUDENNE et Pr. Laurent ZALEWSKI.

Je saisis l'occasion pour remercier particulièrement le Dr Jesús Gumersindo NVE MITOGO de m'avoir toujours : soutenue, conseillée, orientée et encouragée tout au long de mon parcours universitaire.

A mes amis qui ont toujours été présent durant les hauts et bas de cette thèse. Merci de : ne pas vous être lassés de moi, d'avoir toujours été l'épaule, la voix et l'oreille dont j'avais toujours eu besoin. Dr. Harlyne MPWEME BANGANDO, Ing. Oussama SALIH, Ing. Sebastiao MANUEL VELOSO et Ing. Nour-El-Houda MIMOUNI; Merci pour toutes les folies et virées pour décompresser.

Enfin, mes remerciements à ma famille, ma mère, mes sœurs et mon père pour qui les mots seraient superflus. Leur soutien et amour m'ont permis d'avancer et de tenir le coup tout au long de ma thèse. Merci de m'avoir toujours encouragée et soutenue inconditionnellement. A ma grand-mère Isabél MEDZA NGUEMA NFONO, dont le rêve devient réalité à travers moi, MERCI.

Merci à tous de m'avoir accompagné jusqu'au bout.

Université de Picardie Jules Verne

Laboratoire des Technologies Innovantes (EA 3899)

IUT d'Amiens, département de génie-civil,
Avenue des Facultés 80025 Amiens Cedex 1 (France)
☎ 33 (3) 22 53 40 44 📠 33 (3) 22 95 17 51

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIERES	V
TABLE DES FIGURES.....	IX
TABLE DE TABLEAUX.....	XV
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I ETAT DE L'ART	4
I.1 MATERIAUX BIOSOURCES (MBS) : UNE SOLUTION FACE AUX PREOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES.....	5
I.1.1 <i>Les matériaux biosourcés dans le bâtiment</i>	6
I.1.2 <i>Le chanvre : matériau biosourcé très utilisé dans le bâtiment</i>	8
I.2 BETON DE CHANVRE	11
I.2.1 <i>Propriétés physiques</i>	12
I.2.2 <i>Propriétés mécaniques</i>	14
I.2.3 <i>Propriétés hydriques</i>	19
I.2.3.1 Sorption	19
I.2.3.2 Perméabilité à la vapeur d'eau.....	22
I.2.3.3 Valeur de la capacité tampon hydrique ou Moisture Buffer Value (MBV)	24
I.2.4 <i>Propriétés thermiques</i>	26
I.3 MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP)	30
I.3.1 <i>Classification et usage des MCP</i>	30
I.3.1.1 Critères de sélection.....	31
I.3.1.2 Conditionnement des MCP pour l'application au bâtiment	33
I.3.2 <i>Intégration du MCP dans le bâtiment</i>	35
I.3.2.1 Echelle du matériau	35
I.3.2.2 Echelle de la paroi et du local.....	40
CONCLUSION 45	
CHAPITRE II CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANQUES ET THERMIQUES DES MATERIAUX ETUDIES	47
II.1 MATERIAUX ETUDIES	48
II.1.1 <i>Formulation</i>	48
II.1.1.1 Calcul des proportions des composants	48
II.1.1.2 Béton de chanvre	49
II.1.1.3 Enduit de chanvre	50
II.1.2 <i>Fabrication des échantillons</i>	51

II.1.2.1	Processus de fabrication des échantillons	51
II.1.2.2	Observations après ajout du MCP.....	53
II.2	CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANQUES DU BETON DE CHANVRE AVEC ET SANS MCP	55
II.2.1	<i>Mesure des propriétés mécaniques</i>	55
II.2.1.1	Conditionnement des échantillons	55
II.2.1.2	Expérimentation.....	56
II.2.1.3	Caractérisation en compression	57
II.2.2	<i>Comportement des bétons de chanvre avec et sans MCP en compression</i>	60
II.2.2.1	BC+0%MCP.....	60
II.2.2.2	BC+20%MCP.....	64
II.2.2.3	BC+40%MCP.....	67
II.2.3	<i>Evolution du comportement du béton de chanvre en fonction du taux de MCP</i>	70
II.3	CARACTERISATION DES PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX ETUDIES	73
II.3.1	<i>Transfert et stockage de chaleur</i>	73
II.3.1.1	Changement de phase dans un MCP : solidification-fusion.....	73
II.3.1.2	Enthalpie d'un corps	74
II.3.2	<i>Expérimentation</i>	74
II.3.2.1	Méthodologie.....	75
II.3.2.2	Dispositif expérimental.....	76
II.3.3	<i>Modèle thermodynamique</i>	77
II.3.4	<i>Méthode inverse</i>	79
II.3.5	<i>Résultats</i>	81
II.3.5.1	Bétons de chanvre avec et sans MCP.....	81
II.3.5.2	Enduits de chanvre sans MCP	82
II.3.5.3	Enduit de chanvre avec MCP.....	83

CONCLUSION 87

CHAPITRE III CARACTERISATION DES PROPRIETES HYDRIQUES DES MATERIAUX..... 89

III.1	STOCKAGE ET TRANSFERT D'HUMIDITE EN MILIEU POREUX	90
III.1.1	<i>Stockage d'humidité</i>	90
III.1.2	<i>Transfert d'humidité</i>	92
III.1.3	<i>Diffusion hydrique isotherme</i>	97
III.2	ISOTHERMES DE SORPTION	99
III.2.1	<i>Méthodologie expérimentale</i>	99
III.2.1.1	Méthode de mesure des isothermes	99
III.2.1.2	Modélisation des isothermes de sorption	101
III.2.2	<i>Résultats</i>	102
III.2.2.1	Bétons de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP).....	102
III.2.2.2	Enduits de chanvre avec et sans MCP (HLCcoat+%MCP)	106
III.3	PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU.....	110

<i>III.3.1 Expérimentation</i>	110
III.3.1.1 Méthodologie expérimentale	110
III.3.1.2 Expérimentation.....	112
<i>III.3.2 Résultats</i>	113
III.3.2.1 Bétons de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP).....	113
III.3.2.2 Enduits de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP)	115
<i>III.3.3 Diffusivité hydrique</i>	117
III.3.3.1 Bétons de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP).....	117
III.3.3.2 Enduits de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP)	118
III.4 CAPACITE TAMPON HYDRIQUE (MBV)	121
<i>III.4.1 Méthodologie expérimentale</i>	121
III.4.1.1 Conditionnement des échantillons	121
III.4.1.2 Expression de la MBV.....	123
<i>III.4.2 Résultats expérimentaux</i>	123
III.4.2.1 Béton de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP)	123
III.4.2.2 Enduit de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP).....	129
<i>III.4.3 Capacité tampon hydrique idéale (MBV_{idéale})</i>	135
III.4.3.1 Effusivité hydrique (b _m).....	136
III.4.3.2 Valeur de la capacité tampon hydrique idéale (MBV _{idéale})	139

CONCLUSION 140

CHAPITRE IV ETUDE NUMERIQUE DE L'IMPACT DES MATERIAUX ETUDIES SUR LA PERFORMANCE ENERGETIQUE ET LE CONFORT HYGROTHERMIQUE D'UNE MAISON. 142

IV.1 IMPACT DES ENDUITS ETUDIES SUR LE CONFORT THERMIQUE ET LES BESOINS ENERGETIQUES D'UNE MAISON INDIVIDUELLE	143
<i>IV.1.1 Présentation du logiciel PLEIADES</i>	143
<i>IV.1.2 Maison individuelle étudiée</i>	144
<i>IV.1.3 Résultats</i>	150
IV.1.3.1 Impact de l'enduit avec MCP sur le confort thermique de la maison	151
IV.1.3.2 Impact des enduits utilisés sur les besoins en chauffage de la maison.....	156
IV.2 IMPACT DES ENDUITS ETUDIES SUR LE CONFORT HYGRIQUE.....	158
<i>IV.2.1 Modélisation</i>	158
IV.2.1.1 Logiciel SPARK.....	158
IV.2.1.2 Description du modèle physique : Modèle de la capacité effective	161
IV.2.1.3 Description du cas étudié.....	161
<i>IV.2.2 Résultats</i>	162

CONCLUSION 163

CONCLUSION GENERALE.....XXI

PERSPECTIVES XXIV

BIBLIOGRAPHIE.....XXV

RESUME XXXV

ABSTRACT XXXV

Table des figures

Figure I-1 : Consommation d'énergie finale (« Global Status Report » 2018) et émission de de CO ₂ (Raynal et Tebianian 2020b) des secteurs bâtiment et résidentiel.	5
Figure I-2 : Dépense et investissement mondiale dans l'efficacité énergétique des bâtiments en 2017 (« Global Status Report » 2018).....	6
Figure I-3 : Synthèse bibliographique récapitulative des valorisations de certains MBS.	7
Figure I-4 : Différentes transformations du chanvre pour un usage dans le bâtiment.....	8
Figure I-5 : Vue microscopique d'une particule de chanvre (a) et de son tissu conducteur (b) (Sedan 2007).	9
Figure I-6 : Saturation (a), gain massique (b) de la particule de chènevotte sèches et (c) isotherme de sorption et désorption des particules de chanvre à T = 20 °C (Cerezo 2005).	10
Figure I-7 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse des chènevottes en vrac (Cerezo 2005).	10
Figure I-8 : Cycle de production de la chaux (Herrier, Pelletier, et Puiatti 2010) à gauche et comportement en compression mécanique des liants à droite (Nguyen 2010).	11
Figure I-9 : Evolution de la structure du béton de chanvre en fonction du dosage (synthèse bibliographique).	13
Figure I-10 : Evolution du module de Young en fonction de la concentration volumique en liant (Cerezo 2005).	15
Figure I-11 : Influence de la taille des granulats sur les caractéristiques mécaniques en compression (Nguyen 2010).	16
Figure I-12 : Moyenne de la contrainte de cisaillement (τ) à gauche et Module de cisaillement apparent moyen à droite : essaie parallèle aux plans d'anisotropie ($C_{//}$ perpendiculaire au sens de compactage) et perpendiculaire aux plans d'anisotropie (S_{\perp} parallèle au sens de compactage) (Youssef 2017)	16
Figure I-13 : Module d'élasticité et Résistance à la compression du béton de chanvre [(a et c : à 14 et à 56 jours) et (b et d : à 20, 300 et 600 °C)] (Kristombu Baduge et al. 2019).....	17
Figure I-14 : Corrélation entre l'indice de cristallinité et du PH des solutions interstitielles durant les cycles de vieillissement (a) et corrélation entre l'indice de cristallinité des particules de chanvre et le comportement mécanique du béton de chanvre (b et c) (Zerrouki et al. 2022).	18
Figure I-15 : Courbes d'adsorption/désorption du béton de chanvre à 20 °C avec lissage de l'isotherme par le modèle GAB et de BET (à gauche) et Isotherme de sorption de différents matériaux (à droite) (Samri 2008).	19
Figure I-16 : Isotherme de sorption de deux formulations de bétons de chanvre SI2C : à gauche formulation dalle et à droite formulation toiture (Chamoïn 2010).	20
Figure I-17 : Isotherme de sorption de bétons de chanvre pour chaque procédé de mise en œuvre : les points représentent les données expérimentales et les lignes les modèles (Collet et al. 2013).	21

Figure I-18 : Mesures expérimentales de désorption primaire et d'adsorption secondaire (traits pointillés et croix) et mesures expérimentales d'adsorption principale (traits pleins et cercles pleins) (Aït Oumeziane et al. 2016).	..22
Figure I-19 : Evolution de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre en fonction de la formulation à gauche (Chamoin 2010) et de la mise en œuvre à droite (Collet et al. 2013).	.....23
Figure I-20 : Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau à gauche obtenue par (Chamoin 2010) et à droite obtenue par (Collet et al. 2013).	.....24
Figure I-21 : Valeur de la capacité tampon hydrique des matériaux usuels et du béton de chanvre moulé avec et sans enduit (Collet, Pretot, et Lanos 2013).	.....25
Figure I-22 : Influence du compactage (à gauche) et du rapport liant/granulat (à droite) sur la conductivité thermique du béton de chanvre fabriqué avec des particules de chanvre (Nguyen 2010).	.....27
Figure I-23 : Comparaison entre la conductivité thermique verticale et horizontale dans le cas du béton de chanvre fabriqué avec les granulats de chanvre (Nguyen 2010).	.....27
Figure I-24 : Types des matériaux à changement de phase (Guichard 2013).	.....31
Figure I-25 : Exemple de microcapsules de MCP.	.....33
Figure I-26 : (a) Vue microscopique de la microencapsulations d'une microbille de MCP, (Laurence Le Stum 2006) et (b) MCP confiné dans une capsule (Bricard et Gobin 2001)	.....34
Figure I-27 : Poche contenant du MCP (Mathis 2019).	.....34
Figure I-28 : Comparaison de la chaleur latente prédite à celle obtenue sur le composite GF:MEPCM (à gauche) et de la comparaison de la conductivité thermique (à droite) du composite GF:MEPCM par rapport au matériau de base (GF) au MEPCM (à droite) (Z. Wang et al. 2022).	.....37
Figure I-29 : Température de surface de l'échantillon du côté du caisson chaud dans l'intervalle de changement de phase pour différentes proportions de MCP (a) et limite élastique en fonction du taux de MCP ajouté au mortier (b)(Bahrar 2018).	.....37
Figure I-30 : Vues microscopiques des deux MCP utilisés et celles des bétons de chanvre incorporant ces MCP, (Abdellatef et Kavgic 2020).	.....38
Figure I-31 : Capacité calorifique des échantillons de béton de chanvre avec MCP (HPCM) (Abdellatef et Kavgic 2020).	.....39
Figure I-32 : Conductivité thermique des échantillons de béton de chanvre avec et sans MCP (HPCM et Hempcrete) (Abdellatef et Kavgic 2020).	.....39
Figure I-33 : Evolution de la température dans les cellules jumelées au cours d'une journée d'été ensoleillée (de Barquin et Flamant 2010).	.....41
Figure I-34 : Diagramme psychométrique de confort de la cellule avec et sans MCP(Guichard 2013).	.....41
Figure I-35: Impact de l'épaisseur du MCP sur l'économie d'énergie (Rawa et al. 2022) à gauche ; Impact de des MCP utilisés sur l'économie d'énergie (Almitani et al. 2022) à droite.	.....42

Figure II-1 : Composants des bétons et enduits étudiés.	49
Figure II-2 : Etapes de fabrication des échantillons étudiés : exemple du BC+%MCP.	52
Figure II-3 : Moulage, tassage et exposition des échantillons étudiés.	53
Figure II-4 : Infiltration des MCP dans les pores de chènevottes.	53
Figure II-5 : Tenue des enduits sur un support en béton de chanvre.	54
Figure II-6 : Conditionnement des échantillons pour la caractérisation mécanique.	55
Figure II-7 : Presse électromécanique H50KS de TINIUS OLSEN.	56
Figure II-8: Directions de sollicitation en compression en fonction du sens de compactage.	57
Figure II-9 : Essais de compression monotone et Cyclique sur du béton de chanvre (Cerezo 2005).	59
Figure II-10 : Comportement d'un béton de chanvre dans deux directions de sollicitation : (a) compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie (\perp ou dans le sens du compactage) ; (b) compression parallèle aux plans d'anisotropie (\parallel ou perpendiculaire au sens du compactage) (Youssef 2017).	60
Figure II-11 : Evolution de la déformation du BC+0%MCP durant la compression.	60
Figure II-12 : Comportement du BC+0%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie.	61
Figure II-13 : Comportement du BC+0%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.	62
Figure II-14 : Contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie du BC+0%MCP.	63
Figure II-15 : Evolution des fissurations dans un BC+20%MCP en compression.	64
Figure II-16 : Comportement du BC+20%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie.	65
Figure II-17 : Comportement du BC+20%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.	65
Figure II-18 : Contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie du BC+20%MCP.	66
Figure II-19 : Déformation du BC+40%MCP en compression.	67
Figure II-20 : Comportement du BC+40%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie.	68
Figure II-21 : Comportement du BC+40%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.	68
Figure II-22 : Contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie du BC+40%MCP.	69
Figure II-23 : Résidus des matériaux après la compression.	70
Figure II-24 : Contrainte-déformation des BC+%MCP en compression parallèle.	71
Figure II-25 : Contrainte-déformation des BC+% MCP en compression perpendiculaire.	72
Figure II-26 : Principe de fonctionnement des MCP,(Kodjo 2019).	73

Figure II-27 : Thermogramme d'un échantillon de Micronal PCM® DS 5001 X de 5,78 mg obtenu avec une DSC, (Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014).....	75
Figure II-28 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des flux thermiques et des températures sur les deux faces des échantillons (Franquet, Gibout, Zalewski, et al. 2014).	76
Figure II-29 : Schéma du principe d'instrumentation (Joulin et al. 2014).	77
Figure II-30 : $h(T)$ d'un matériau composite avec MCP (Tittlein, Gibout, Franquet, Johannes, et al. 2015).....	79
Figure II-31 : Diagramme de synthèse de la méthode inverse (Zalewski et al. 2019).	80
Figure II-32 : Evolution du flux thermique pour l'essai de la capacité thermique sur les BC+%MCP (Toifane et al. 2019).	81
Figure II-33 : Evolution des flux de chaleur et de la température en fonction du temps pour le HLCcoat+0%MCP.	83
Figure II-34 : Evolution des flux de chaleur et de la température imposée en fonction du temps pour le HLCcoat+23%MCP.	84
Figure II-35 : Evolution de la capacité thermique en fonction du taux de MCP dans l'enduit.	85
Figure II-36 Evolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de MCP dans l'enduit.	86
Figure II-37 : Evolution de l'enthalpie en fonction de température pour des HLCcoat+%MCP.....	86
Figure III-1 : Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore (Collet 2004)...	90
Figure III-2 : Dispositif expérimental de mesure de sorption et système de contrôle des humidités de consigne.	100
Figure III-3 Evolution de la teneur en eau dans les BC+%MCP en adsorption.	103
Figure III-4 : Isothermes d'adsorption des bétons de chanvre avec et sans MCP.	105
Figure III-5 : Evolution de la teneur en eau dans les enduits de chanvre avec et sans MCP en adsorption.	107
Figure III-6 : Isothermes d'adsorption des enduits de chanvre avec et sans MCP ajusté avec le modèle GAB. .	109
Figure III-7 : Schéma de l'assemblage de la coupelle sèche pour la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau (Seng, Magniont, et Lorente 2019b).	111
Figure III-8 : Dispositif expérimental de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau.....	112
Figure III-9 : Cinétique d'évolution de la masse des échantillons de BC+%MCP en coupelle sèche «0 à 50%HR».	113
Figure III-10 : Perméabilité à la vapeur d'eau des BC+%MCP et comparaison avec d'autres matériaux.	115
Figure III-11 Evolution de la perméabilité à la vapeur d'eau des HLCcoat+%MCP et comparaison avec celle de la plaque de plâtre.	116
Figure III-12 : Variation de la diffusivité à la vapeur d'eau des bétons de chanvre avec et sans MCP	117
Figure III-13 : Evolution de la diffusivité à la vapeur d'eau des enduits de chanvre avec et sans MCP.....	119

Figure III-14 : Créneau de température et d'humidité relative en fonction du temps utilisé par le Nordtest.....	121
Figure III-15 : Processus du protocole d'essai du Nordtest projet pour l'évaluation de la MBV	122
Figure III-16 : Evolution de la masse en adsorption/désorption en fonction du créneau d'humidité relative : BC+%MCP.	123
Figure III-17 : Evolution des MBV des bétons de chanvre avec et sans MCP tout au long de l'essai.....	124
Figure III-18 : Classification des bétons de chanvre avec et sans MCP.....	128
Figure III-19 : Evolution du classement des MBV en fonction des températures pour les trois bétons de chanvre.	128
Figure III-20 : Evolution de la masse en adsorption/désorption en fonction du créneau d'humidité relative : HLCoat+%MCP.....	129
Figure III-21 : Evolution de la MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP tout au long de l'essai.	130
Figure III-22 : Evolution de la MBV expérimentale en fonction du pourcentage de MCP ajouté dans l'enduit de chanvre.....	131
Figure III-23 : Evolution de la MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP en fonction de la température..	132
Figure III-24 : Classification des enduits de chanvre avec et sans MCP.....	134
Figure III-25 : Classification de l'évolution de la MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP.....	134
Figure III-26 : Evolution des effusivités hygriques des bétons de chanvre avec et sans MCP.	137
Figure III-27 : Evolution des effusivités des enduits de chanvre avec et sans MCP.....	138
Figure IV-1 : Schéma du fonctionnement de PLEIADES_STD_COMFIE	143
Figure IV-2 : Vue 3D et Vue plan de la maison étudiée.	145
Figure IV-3 : Configuration des parois verticales de l'enveloppe de la maison.	145
Figure IV-4 : Zone climatique d'hiver (a) et zone climatique d'été (b) (Cron et Inard 2003).	148
Figure IV-5 : Rayonnements solaires directs et diffus annuels de Trappes.	148
Figure IV-6 : Evolution annuelle de la température extérieure de Trappes	149
Figure IV-7 : Zonage thermique et température de consigne fixée dans chaque zone.....	150
Figure IV-8 : Evolution de la température des zones thermiques : Cas 1.	151
Figure IV-9 : Apport solaire du 13 au 20/08 dans la PiècesNord, le Salon et la Chambre.	152
Figure IV-10 : Evolution de la température des zones thermiques : Cas 2.	152
Figure IV-11 : Evolution de la température des zones thermiques : Cas 3.	153
Figure IV-12 : Température opérative des pièces : Salon (a), PiècesNord (b) et Chambre (c) en fonction de l'enduit HLCoat+%MCP.....	155
Figure IV-13 : Evolution du nombre d'heures d'inconfort en fonction de l'enduit utilisé.....	156

Figure IV-14 : Evolution des besoins en chauffage en fonction du HLCcoat+%MCP appliqué.	157
Figure IV-15 : Classes macroscopique et microscopique représentant le transfert de chaleur radiatif et celui convectif dans SPARK (Nataf et Winkelmann 1994).	159
Figure IV-16 : Diagramme de la librairie des modèles de SPARK, (Anh Dung Tran Le 2010; Mendonça et al. 2002).	160
Figure IV-17 Evolution de l'humidité relative intérieure en fonction de la MBV des HLCcoat+%MCP.	162

Table de tableaux

Tableau I-1 : Synthèse bibliographique des avantages et inconvénients des matériaux biosourcés.....	7
Tableau I-2 : Formulations du béton de chanvre en fonction de l'usage (synthèse bibliographique).....	12
Tableau I-3 : Variation des propriétés physiques du béton de chanvre en fonction de la masse volumique (synthèse bibliographique).	14
Tableau I-4 : Evolution des propriétés mécaniques, en fonction de la masse volumique et du rapport eau/liant, obtenue en compression parallèle au sens de compactage du béton de chanvre (synthèse bibliographique).	18
Tableau I-5 : Synthèse bibliographique de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre.	23
Tableau I-6 : Variation de la MBV du béton de chanvre en fonction de la masse volumique et la formulation (synthèse bibliographique).	25
Tableau I-7 : Evolution des propriétés thermiques du béton de chanvre en fonction de la masse volumique (synthèse bibliographique).	28
Tableau I-8 : Caractéristiques de différents MCP utilisés dans le bâtiment (synthèse bibliographique).	32
Tableau I-9 : Synthèse bibliographique des caractéristiques des différents MCP appliqués dans le bâtiment et certains matériaux intégrant un MCP.	44
Tableau II-1 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la fabrication des échantillons.	49
Tableau II-2 : Formulations de béton de chanvre avec et sans MCP utilisées pour les études.	50
Tableau II-3 : Formulations d'enduit de chanvre avec et sans MCP utilisées pour les études.	51
Tableau II-4 : Masses volumiques des éprouvettes et paramètres utilisés pour les essais de compression.	57
Tableau II-5 : Dénomination et masse des échantillons pour chaque direction de sollicitation.	58
Tableau II-6 : Grandeurs caractéristiques du BC+0%MCP en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie.	63
Tableau II-7 : Grandeurs caractéristique du BC+20%MCP en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie.	66
Tableau II-8 : Caractéristiques mécaniques des échantillons de BC+40%MCP en compression.	69
Tableau II-9 : Propriétés mécaniques des BC+%MCP en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie.	70
Tableau II-10 : Propriétés thermiques des trois bétons de chanvre étudiés (Toifane et al. 2019).	82
Tableau II-11 : Propriétés thermiques des enduits de chanvre avec et sans MCP.	84
Tableau III-1 : Synthèse des modèles pour le lissage des courbes de sorption.	91
Tableau III-2 : Teneur en eau d'adsorption expérimentale des bétons de chanvre avec et sans MCP.	102

Tableau III-3 : Paramètres de lissage du modèle de GAB pour les BC+%MCP.....	103
Tableau III-4 : Evaluation de la cohérence entre l'ajustement de GAB et les résultats expérimentaux des BC+%MCP.	104
Tableau III-5 : Teneur en eau expérimentale des HLCoat+%MCP en adsorption.....	106
Tableau III-6 : Paramètres d'ajustement par le modèle de GAB des isothermes d'adsorption des enduits étudiés.	108
Tableau III-7 : Evaluation de la cohérence entre l'ajustement de GAB et les résultats expérimentaux des HLCoat+%MCP.....	108
Tableau III-8 : Résultats expérimentaux de la coupelle sèche (0 à 50%HR) sur les bétons de chanvre étudiés. .	114
Tableau III-9 : Résultats expérimentaux de la coupelle sèche (0 à 50%HR) sur les enduits de chanvre étudiés. .	115
Tableau III-10 Diffusivité hydrique des bétons de chanvre avec et sans MCP à 50% HR.	118
Tableau III-11 : Diffusivité à la vapeur d'eau des enduits de chanvre avec et sans MCP à 50% HR.	119
Tableau III-12 : Valeurs des MBV expérimentales des bétons de chanvre avec et sans MCP.	125
Tableau III-13 : Récapitulatif des valeurs des MBV obtenues en fonction des températures pour chaque formulation de béton de chanvre.....	126
Tableau III-14 : MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP obtenue après application du Nordtest protocole.	131
Tableau III-15 : MBV obtenue en faisant varier la température de consigne sur les enduits avec et sans MCP .	133
Tableau III-16 : Effusivité hydrique (b_m) du BC+0%MCP, BC+20%MCP et BC+40%MCP.....	137
Tableau III-17 : Effusivité hygrique des enduits de chanvre avec et sans MCP.	138
Tableau III-18 : Comparaison des MBV expérimentales aux MBV idéales pour tous les matériaux étudiés.....	139
Tableau III-19 : Synthèse des propriétés hygrothermiques des matériaux étudiés.....	141
Tableau IV-1 : Rappel des caractéristiques thermiques des matériaux étudiés.....	146
Tableau IV-2 : Configurations des murs extérieurs utilisés.	146
Tableau IV-3 : Composition des parois verticales et horizontales de la maison étudiée.....	147
Tableau IV-4 : Caractéristiques des fenêtres du logement étudié.	147
Tableau IV-5 : Résultats obtenus de la maison en fonction de l'enduit utilisé.	157
Tableau IV-6 Valeurs des MBV des matériaux utilisés pour la simulation.	162

Introduction générale

De la réglementation thermique française de 1974 (RT1974) à celle de 2005 (RT2005) l'exigence réglementaire sur les besoins énergétiques en chauffage du bâtiment était passée de 225 à 90 kWh/m².an. Cette diminution de 80%, sur une estimation de 300 kWh/m².an en besoin de chauffage en 1974, laisse place à la création de cinq labels pour attester de la performance énergétique des bâtiments neufs. Le plus exigeant d'entre eux est le label BBC (Bâtiment Basse Consommation) pour les constructions aux consommations énergétiques inférieures ou égales à 50 kWh/m².an. De plus, après la RT2005, le Grenelle de l'environnement de 2007 va aboutir à la publication de la RT2012 qui vient renforcer le label BBC en imposant à tous les bâtiments neufs sans distinction ce même seuil de 50 kWh/m².an à ne pas dépasser. Cette RT2012 visait aussi entre 13 et 15 millions de tonnes de diminution d'émission de CO₂ et jusqu'à 150 milliards de kWh économisés. Cette dernière imposait aussi de nouvelles contraintes en termes de : étanchéité, traitement des ponts thermiques, et isolation thermique intérieure et extérieure dans le logement.

Aujourd'hui, comme l'ensemble des projets de réglementation du secteur du bâtiment, la réglementation environnementale (RE2020) s'inscrit dans le contexte de la Stratégie Nationale Bas Carbone publiée en 2020. L'heure est donc à la construction de bâtiments qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Pour répondre à ces exigences, les experts de la construction ainsi que les chercheurs orientent leurs travaux vers la mise au point de matériaux de plus en plus performants. Course qui conduit à l'utilisation de divers produits issus de la biomasse et renforçant la liste des matériaux de construction connus sous l'appellation de matériaux biosourcés. Ces extraits végétaux, ayant une capacité d'absorption naturelle du dioxyde de carbone (notamment lors de la croissance de la plante) et un caractère renouvelable, permettent d'améliorer l'emprunte carbone et de limiter ainsi l'impact environnemental du bâtiment. Parmi ces derniers, on retrouve les co-produits issus de l'agriculture utilisés en vrac pour l'isolation thermique ou incorporés dans des bétons (bétons biosourcés ou agro-sourcés). Ces derniers sont de plus en plus développés et commercialisés sur le marché des matériaux de construction. L'émergence de ces matériaux dans le bâtiment est une conséquence directe de la mise en valeur des performances (thermiques, hydriques, acoustiques et hygroscopiques) de ces bétons en s'appuyant sur des études scientifiques. Cependant, ces mêmes études scientifiques

font état de leurs faibles propriétés mécaniques, de leurs médiocres inerties thermiques ainsi que d'autres faiblesses qui limitent leur utilisation. Comme exemple de faiblesses, on a : la régularité de la qualité des ressources végétales, la compétitivité économique, l'information du public et des donneurs d'ordre, l'organisation de la filière ou la formation des applicateurs.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ces travaux de thèse qui ont pour objectif de développer un nouveau matériau de construction performant associant les propriétés de régulation hydrique des bétons biosourcés aux performances de régulation thermique des matériaux à changement de phase. En particulier, l'étude se focalise sur l'évolution des propriétés hygrothermiques d'un béton de chanvre et d'un enduit de chanvre intégrant un matériau à changement de phase déjà commercialisé : le Micronal PCM[®] DS 5001 X.

Ces matériaux à changement de phase sont en effet capables d'échanger de l'énergie sous forme de chaleur avec leur environnement immédiat en fonction des températures ambiantes. Ce qui a valu leur regain d'intérêt dans l'isolation de bâtiment ces 20 dernières années. Ainsi, ils représentent d'excellents renforts en isolation et en climatisation passive.

Afin de mieux orienter le lecteur, la première partie de ce mémoire fait une synthèse bibliographique des travaux menés sur le béton de chanvre (BC) et ceux relatifs aux matériaux à changement de phase (MCP) dans le bâtiment au cours de ces dernières années. Les intérêts que présentent chacun de ces matériaux dans la construction y sont mis en avant. Après cet état de l'art, le deuxième et le troisième chapitre présentent de façon détaillée l'évolution des propriétés mécaniques, thermiques et hydriques d'un béton et d'un enduit de chanvre sans et avec différentes proportions de MCP. Enfin, un dernier chapitre est consacré à l'impact du matériau à changement de phase sur l'évolution de la capacité de régulation hygrothermique du béton ou de l'enduit intégré dans la construction à l'échelle d'un local ou d'un logement. Une conclusion avec des perspectives termine le mémoire.

Chapitre I Etat de l'art

Ce chapitre est consacré à l'état de l'art relatif aux matériaux biosourcés et à l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) dans le bâtiment. Il a d'abord pour objectif de présenter les caractéristiques et propriétés des matériaux biosourcés en général avant d'appréhender de façon plus détaillée les derniers travaux portant sur les performances des bétons et enduits de chanvre. Puis, nous poursuivons cette investigation avec les études réalisées sur les matériaux à changement de phase, particulièrement ceux qui ont vocation à être incorporés dans les matériaux de construction. Plus précisément, dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous focaliserons sur les bétons biosourcés intégrant un matériau à changement de phase.

I.1 Matériaux biosourcés (MBS) : une solution face aux préoccupations environnementales.

Depuis le début du XXe siècle aucun pays n'est épargné par les méfaits du réchauffement climatique. Ce phénomène d'augmentation des températures océaniques et atmosphériques due aux émissions de gaz à effet de serre (GES) est parmi les défis et priorités actuelles du monde. Car, l'impact de l'augmentation progressive des émissions de ces GES s'accroît au fil des années et leurs méfaits se font de plus en plus ressentir. Cependant, parmi les plus émis de ces gaz, on retrouve le dioxyde de carbone (CO₂) dont la troisième position des émissions mondiale est détenue par le secteur du bâtiment. Sur la [Figure I-1], on peut voir qu'en 2017, le secteur du bâtiment (construction et résidentiel) représentait 14% des émissions de GES dû au fait qu'il consomme plus de 30% de l'électricité produite (Raynal et Tebianian 2020b; 2020a).

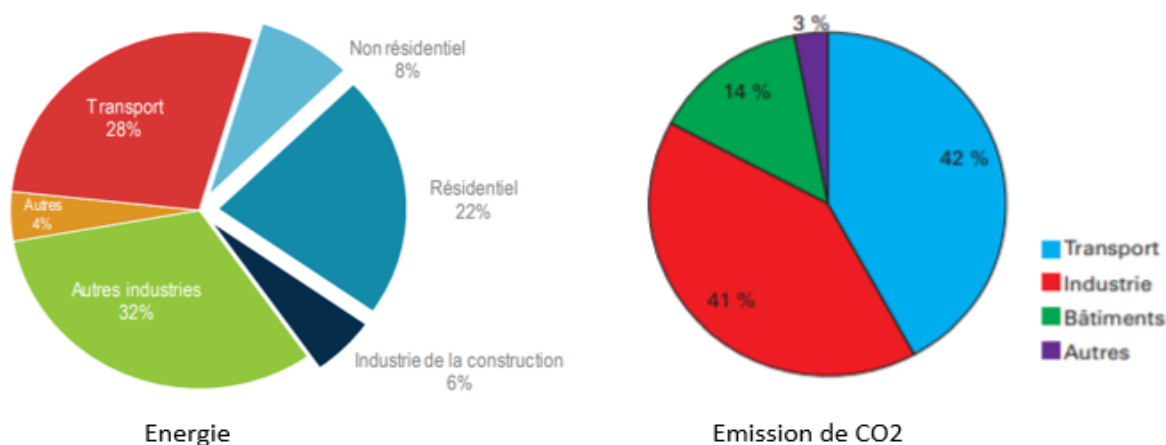


Figure I-1 : Consommation d'énergie finale (« Global Status Report » 2018) et émission de de CO₂ (Raynal et Tebianian 2020b) des secteurs bâtiment et résidentiel.

D'autre part, la [Figure I-2] montre que l'enveloppe des bâtiments résidentiels est responsable de plus de 30% de la dépense d'énergie globale dans le bâtiment alors que pour les non résidentiels elle est de plus de 20% (« Global Status Report » 2018) ; US EPA 2016). Par conséquent, l'augmentation des performances énergétiques de l'enveloppe et des équipements est primordiale pour une réduction plus efficace de la consommation énergétique et des émissions de CO₂ dans la construction.

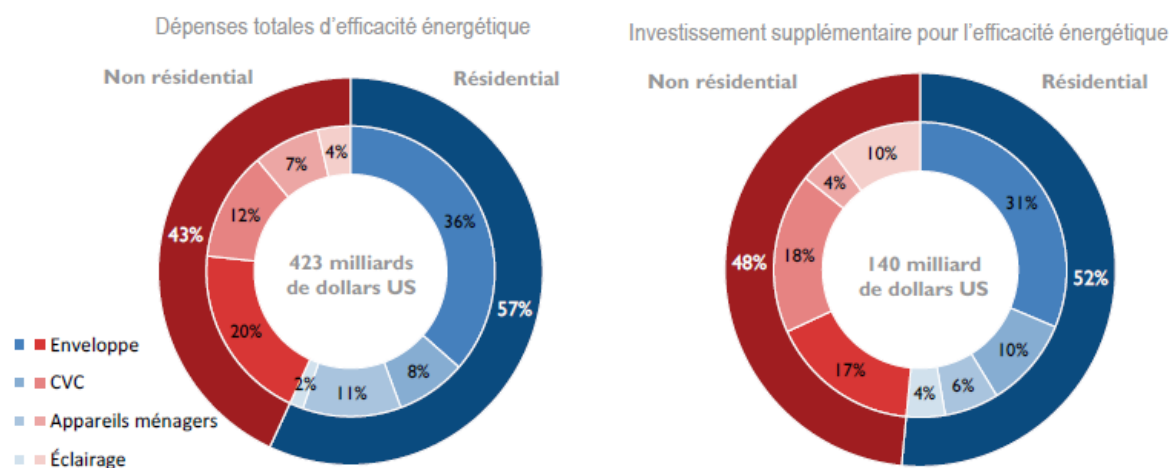


Figure I-2 : Dépense et investissement mondiale dans l'efficacité énergétique des bâtiments en 2017 (« Global Status Report » 2018).

Au vu de ce qui précède, il est donc plus que nécessaire d'adopter des solutions capables d'augmenter les performances énergétiques des bâtiments tout en assurant le bien être des habitants. D'où notre choix pour les matériaux biosourcés permettant de répondre efficacement à la problématique de diminution de la consommation énergétique tout en répondant aux exigences de confort.

Cette section s'articulera d'abord autour des matériaux biosourcés ou encore les matériaux à faible impact environnemental issus de la biomasse. Ensuite, on se concentrera sur le béton et l'enduit de chanvre qui sont les matériaux sur lesquels sont axés nos travaux.

1.1.1 Les matériaux biosourcés dans le bâtiment

Par définition, les matériaux biosourcés sont issus de la matière organique renouvelable (biomasse) d'origine végétale ou animale. Parmi ces matériaux, on retrouve : des ressources agricoles ou sylvicoles, des éco-produits et des sous-produits industriels organiques. Aujourd'hui, ces matériaux couvrent une large gamme de produits rangés dans trois filières différentes : la filière végétale (bois, chanvre, lin, Etc.), la filière animale (laine de mouton, plumes de canard, Etc.) et la filière issue du recyclage (ouate de cellulose, coton recyclé, Etc.). Concernant leur utilisation, les MBS sont utilisés à plusieurs fins [Figure I-3]. Dans le cas de nos travaux, on se concentrera sur leur utilisation dans la conception de l'enveloppe du bâtiment.

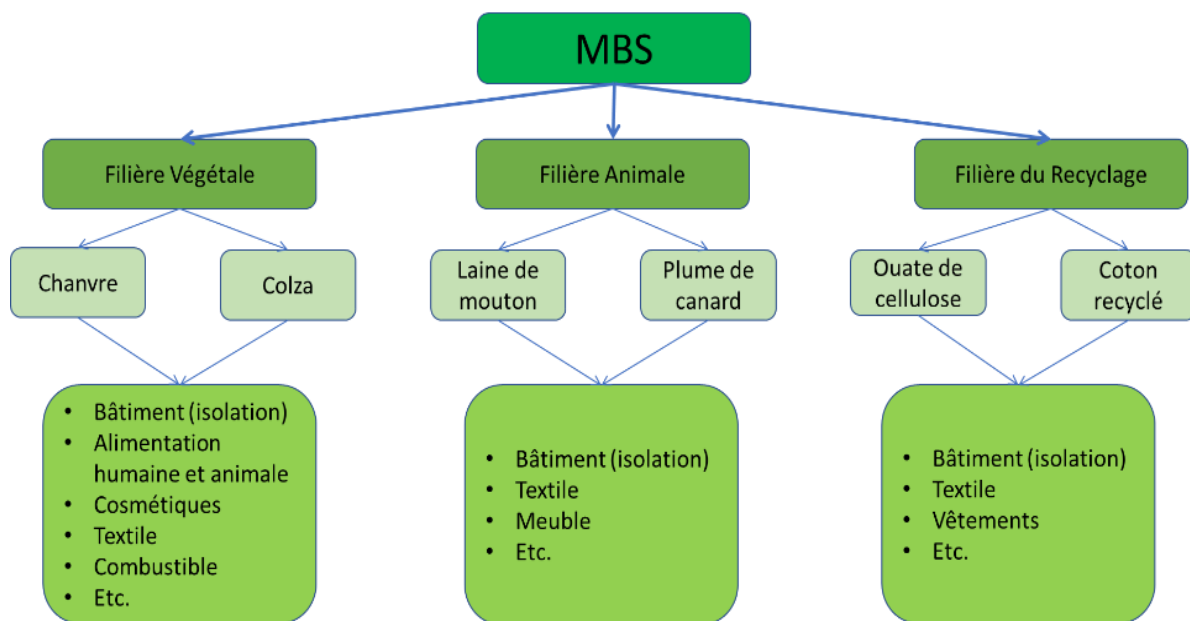


Figure I-3 : Synthèse bibliographique récapitulative des valorisations de certains MBS.

Du fait de leurs caractéristiques intéressantes, très poreux et d'un grand pouvoir isolant, ils sont majoritairement utilisés pour l'isolation intérieure et extérieure sous forme de : panneaux, rouleaux, mortier, béton et particules en vrac. En plus, ils ont un impact économique positif : diminution du coût global de l'énergie de fabrication, valorisation de co-produits et création de nouveaux emplois. Bien qu'ayant tous ces atouts, ces matériaux ont aussi des points faibles tels que, dans certaines circonstances : nécessité d'un traitement contre les moisissures, les attaques d'insectes ou le feu, ressources très localisées ou insuffisantes, faible production générant un prix non compétitif. Sur le [Tableau I-1], on trouve d'autres avantages et inconvénients principaux de ces matériaux.

Avantages	Inconvénients
Bonne performance thermique, hydrique et acoustique	Besoin de masse importante pour atteindre les performances recherchées
Contribution au confort d'été	Vulnérable au feu
Adapté à toute superficie	Très fragile
Facile à mettre en œuvre	Peut dégager des odeurs (pour certains)
Renouvelable, biodégradable et recyclable	Nécessite un traitement antimite (pour certains)

Tableau I-1 : Synthèse bibliographique des avantages et inconvénients des matériaux biosourcés.

Pour les bétons, la substitution des granulats minéraux par des granulats végétaux leur confère un ensemble d'avantages : bonnes performances thermiques et hygriques, et capacité de stockage du dioxyde de carbone. Parmi ces granulats végétaux, on retrouve largement la chènevotte dont l'utilisation sous toutes ses formes a pris une grande place sur le marché du bâtiment au cours des dernières décennies.

Le but étant ici d'optimiser les performances d'un béton de chanvre, il est primordial de connaître : ses diverses propriétés, ses modes d'application, ses avantages et ses inconvénients.

I.1.2 Le chanvre : matériau biosourcé très utilisé dans le bâtiment

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante herbacée annuellement renouvelable de la famille des cannabacées. Il s'agit d'une plante de plus de 2 m de haut qui a connu un essor dans les années soixante et est utilisée dans plusieurs secteurs (Crini et al. 2020). Cette cannabacée a la particularité d'avoir une faible teneur en Tétrahydrocannabinol et une bonne capacité d'absorption de CO₂.

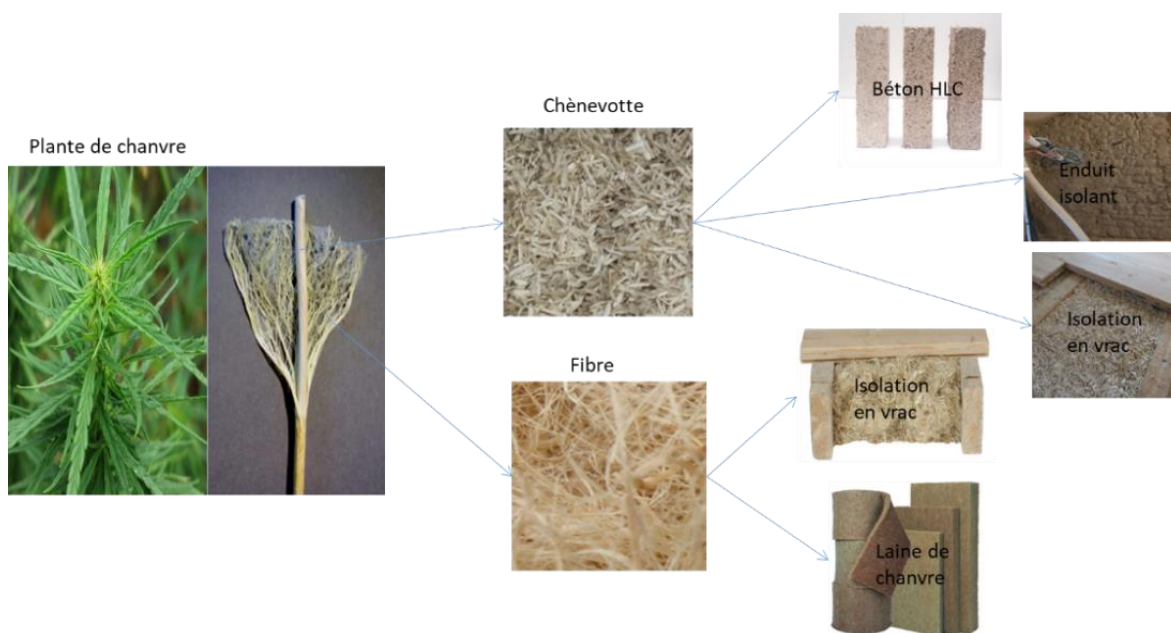


Figure I-4 : Différentes transformations du chanvre pour un usage dans le bâtiment

Cette plante est cultivée et utilisée dans la construction depuis l'antiquité. Ses parties les plus valorisées dans le bâtiment sont l'écorce (fibre et laine) et la tige (chènevotte) pour la fabrication des produits suivants (voir la [Figure I-4]) :

- Laine de chanvre : elle est souvent utilisée sous forme de laine souple, panneaux semi-rigides et en vrac. Sous toutes ces formes, la laine de chanvre peut être utilisée pour l'isolation des : murs, combles perdus et rampants de toitures (Magniont 2010). Mais cette dernière n'est pas soumise aux règles professionnelles de construction.
- Chènevotte en vrac : il s'agit de la partie intérieure de la tige de chanvre. Elle est utilisée pour l'isolation des combles perdus et des murs.
- Mortiers ou bétons de chanvre : il s'agit d'un mélange de chènevotte, de liant et d'eau. Ils sont pour la plupart utilisés en isolation répartie des murs et sols, ou comme complément d'isolation intérieure ou extérieure.

Cependant, les études dans la littérature montrent que les particules de chanvre (chènevotte) possèdent un important réseau poreux justifié par la présence de nombreux capillaires dont les tailles permettent d'expliquer le pouvoir absorbant et la compressibilité des particules de chènevotte [Figure I-5]. Cet important réseau poreux procure donc à la chènevotte un pouvoir absorbant allant de 300 à 400% du poids initial pour un diamètre de pore allant de 0 à 40 μm (Samri 2008; Nguyen 2010). Dans la même direction, Cerezo et d'autres auteurs démontrent que la chènevotte a un fort pouvoir absorbant après avoir étudié : les montées capillaires, les gains massiques et le taux de saturation des chènevottes sèches (Cerezo 2005; Chamoin 2010; Magniont 2010).

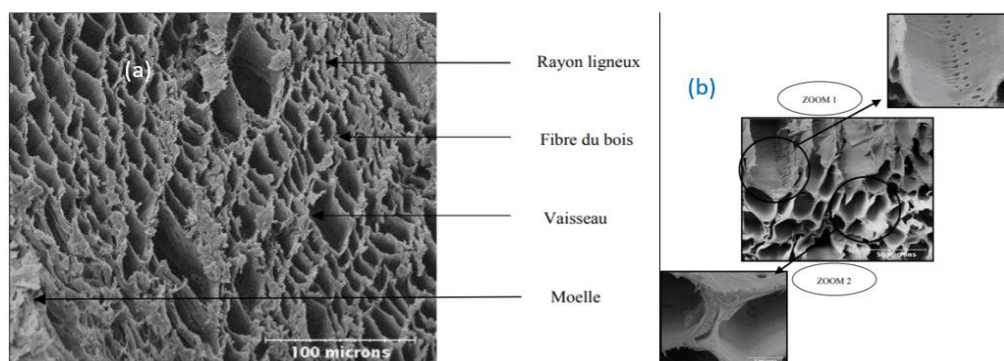


Figure I-5 : Vue microscopique d'une particule de chanvre (a) et de son tissu conducteur (b) (Sedan 2007).

De plus, en connaissant la capillarité de la particule, Cerezo a pu estimer la hauteur de montée capillaire en fonction du diamètre des pores et de l'angle de mouillage du liquide sur la surface de la particule de chanvre (Cerezo 2005). Ses études ont permis de démontrer que grâce

à sa capillarité intéressante, la chènevotte est capable d'absorber très rapidement près de 2 fois sa masse en eau, comme présenté sur la [Figure I-6 b]. De plus, la capillarité et la porosité de la chènevotte lui confèrent une capacité d'adsorption de la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant en quantité variant selon l'hygrométrie du milieu extérieur, comme présenté sur la [Figure I-6 a]. Les isothermes de sorption et désorption de la [Figure I-6 c] permettent à cet auteur de prouver que la teneur en eau de la chènevotte dans un environnement supérieure à 50% HR augmente fortement (>10%) (Cerezo 2005) .

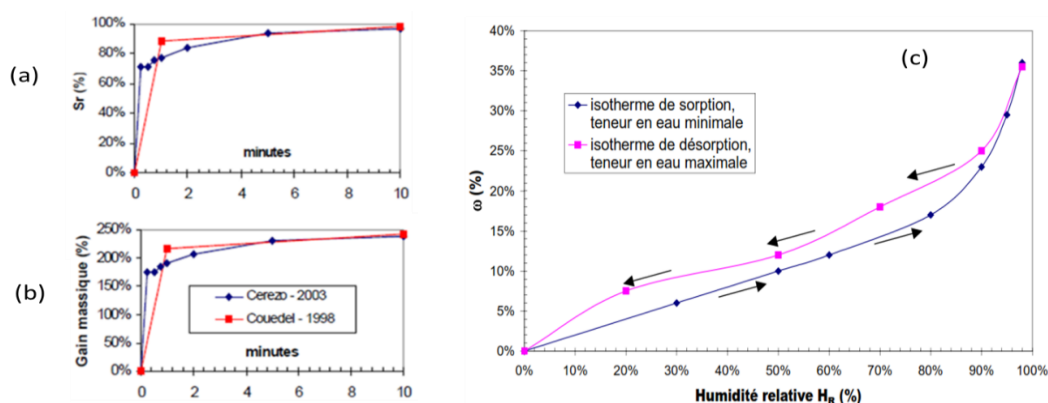


Figure I-6 : Saturation (a), gain massique (b) de la particule de chènevotte sèches et (c) isotherme de sorption et désorption des particules de chanvre à $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Cerezo 2005).

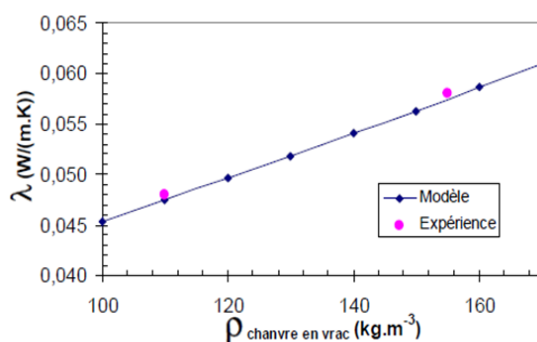


Figure I-7 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse des chènevottes en vrac (Cerezo 2005).

On peut aussi voir sur la [Figure I-7] de Cerezo que la masse volumique du chanvre en vrac a une influence importante sur sa conductivité thermique. Elle montre qu'une augmentation de la masse volumique du chanvre en vrac entraîne automatiquement une augmentation de sa conductivité thermique tout en restant inférieure à celle des matériaux de construction usuels (Cerezo 2005).

Ainsi, l'utilisation du chanvre en vrac ou sous forme de panneau montre qu'il est un bon isolant thermique et qu'il a un bon pouvoir régulant hydrique. Voyons ce qu'il en est pour le béton et l'enduit de chanvre.

I.2 Béton de chanvre

Constitué de granulats d'origine végétale et d'une matrice à base de liant, le béton de chanvre est assez différent des matériaux de construction conventionnels. Sa formulation est en général uniquement constituée de : chènevotte, d'eau et de chaux. Comme évoqué dans la section [I.1.2], la chènevotte permet une adsorption d'humidité dans ce béton alors que la chaux permet une meilleure prise et mise en valeur de ses propriétés hygrothermiques. Plusieurs fournisseurs ont mis au point des liants à base de chaux adaptés spécifiquement au béton de chanvre : Tradical PF70 de Weber Tradical®, NHL 3,5 de Saint-Astier®, Etc.

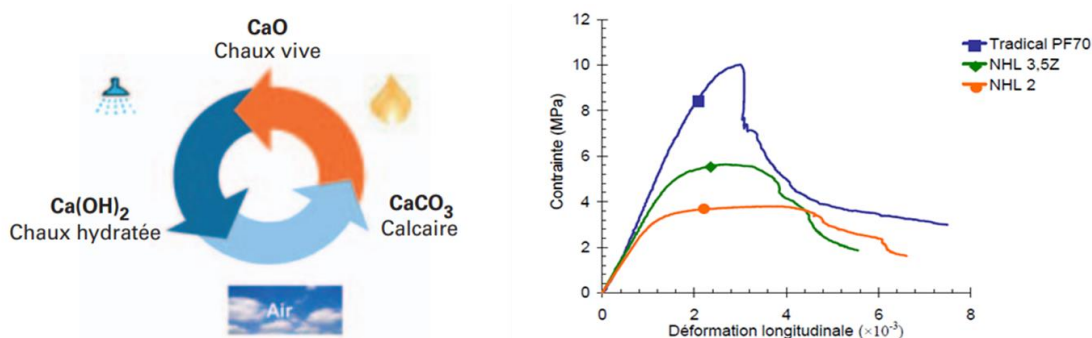


Figure I-8 : Cycle de production de la chaux (Herrier, Pelletier, et Puiatti 2010) à gauche et comportement en compression mécanique des liants à droite (Nguyen 2010).

Pour notre étude, nous utiliserons exclusivement le Tradical PF70. D'après le fabricant, il est constitué de 75% de chaux hydraulique, 15% de chaux aérienne et 10% de pouzzolanes. Plusieurs acteurs et chercheurs dans le domaine de la construction utilisent ce liant spécifique pour différentes raisons : sa perméabilité à la vapeur d'eau, la capacité de la chaux aérienne à améliorer l'ouvrabilité et la rétention d'eau des mortiers, sans oublier la double prise de la chaux hydraulique (Herrier, Lesueur, et Puiatti 2011; Herrier, Pelletier, et Puiatti 2010; Gres-Roque 2016). En plus, Nguyen montre que la chaux aérienne confère un meilleur comportement en compression mécanique comparativement à la chaux hydraulique (NHL 3,5Z ou NHL 2) comme illustré sur la [Figure I-8] (Nguyen 2010). Dans cette étude, l'auteur fait également état

d'une conductivité thermique de 0,373 W/(m.K) pour le Tradical PF70 par rapport à 0,37 W/(m.K) et 0,363 W/(m.K) pour les chaux NHL 3,5Z et NHL 2, respectivement.

D'une part, compte tenu de son caractère poreux, le béton de chanvre fait l'objet de nombreux travaux consacrés à la caractérisation et à la modélisation des transferts de chaleur et d'humidité (sous forme de vapeur et de liquide). D'autre part, durant son cycle de vie, le béton de chanvre est soumis à des variations de température et d'humidité ambiante tels que : le mode de vie des occupants, le climat, Etc. Les sous-sections suivantes seront donc consacrées aux propriétés physiques et thermohydriques du béton de chanvre.

1.2.1 Propriétés physiques

Constitué de plusieurs ingrédients, le béton de chanvre est un matériau composite qui présente des masses volumiques sèches variables et qui dépendent de son utilisation. En se basant sur les travaux existants (Nguyen 2010; Chamoin 2010; Oumeziane 2013), la masse volumique sèche du béton de chanvre est comprise entre 200 et 900 kg/m³ en fonction de la formulation et de son usage (enduit, toit, mur, dalle, isolation rapportée, Etc).

	Chanvre (%)	PF 70 (%)	Eau (%)
Enveloppe	55	23	22
Enduit	43	36	21
Toit	25,1	24,6	50,3
Mur	17,3	29,9	52,8
Dalle	14,3	34,8	50,9

Tableau I-2 : Formulations du béton de chanvre en fonction de l'usage (synthèse bibliographique).

La synthèse des travaux d'autres auteurs permet de présenter les différents dosages de béton de chanvre en pourcentage massique en fonction des utilisations du [Tableau I-2] (Cerezo 2005; Evrard 2008; Samri 2008).

D'autre part, tout comme les formulations varient en fonction de l'usage, la structure du béton de chanvre varie aussi pour chaque formulation comme présenté sur la [Figure I-9]. Cette variabilité dépend de la prédominance de l'un ou l'autre des constituants (liant ou chènevotte) dans le mélange :

- ✓ Si la quantité de particules est supérieure à celle du liant (fortement dosé en chanvre), alors le matériau a la structure d'un assemblage de particules reliées entre elles par des points de liant. Les mélanges avec cette texture sont souvent utilisés pour le remplissage des murs parce qu'ils contribuent à l'isolation thermique, mais possèdent une faible résistance mécanique.
- ✓ Si la quantité de liant est supérieure à celle des chènèvettes (fortement dosé en liant), alors les particules seront noyées dans le liant. Ces mélanges sont souvent mis en œuvre dans le cas d'une exigence de performances mécaniques.

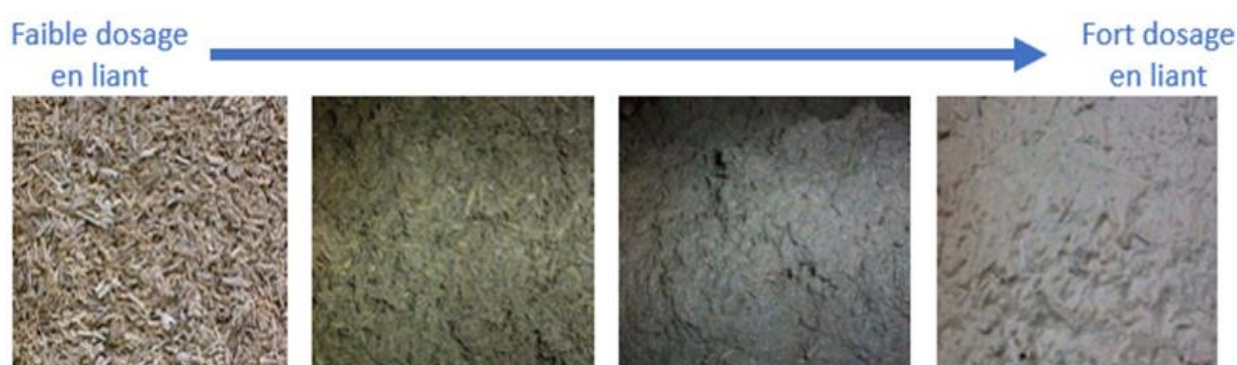


Figure I-9 : Evolution de la structure du béton de chanvre en fonction du dosage (synthèse bibliographique).

Aussi, les études sur la structure du béton de chanvre montrent que ce dernier a une structure poreuse complexe : macroscopique, microscopique et mésoscopique. Les pores microscopiques sont intrinsèques aux particules de chanvre (bois de la tige) alors que les pores mésoscopiques apparaissent dans le liant lors de la formation du carbonate de calcium (CaCO_2) et ceux macroscopiques apparaissent entre le liant et les granulats.

Plus récemment, Wang et collaborateurs évaluent l'influence de différentes chènèvettes sur le temps de prise et la carbonatation du liant à base de chaux. Ces études permettent de démontrer que la qualité des chènèvettes influence la prise du béton de chanvre (L. Wang et al. 2021).

A partir de la synthèse bibliographique du [Tableau I-3] ci-après, il ressort que les propriétés physiques (porosité, teneur en eau de saturation et masse volumique) du béton de chanvre varient en fonction de la formulation. Aussi, d'après plusieurs auteurs (Collet 2004; Cerezo 2005; Samri 2008; Chamoin 2010; Oumeziane 2013), les masses volumiques sèches des bétons

de chanvre varient : de 200 à 250 kg/m³ en isolation de toiture, de 350 à 450kg/m³ en isolation de mur et tournent autour de 500kg/m³ pour l'isolation des sols.

	Formulations	Porosité ouverte (n ₀ = %)	Porosité totale (n = %)	Teneur en eau de saturation (w _{sat})	Rapport G/L	Masse volumique de la matrice (kg/m ³)	Masse volumique sèche (kg/m ³)
(Seng, Magniont, et Lorente 2019b)	PHC	76	78	-	0,134	2 149	466
(Collet et al. 2013)	PHC	68	72	0,010	0,65	1 655	460
	SHC	66	78	0,023	0,5	1 997	430
	MHC	77	79	0,012	0,5	2 002	430
(Chamoïn 2010)	Mur (SI2C)	60,2	78,9	0,013	0,5	1 996,53	421,6
	Enduit (SI2C)	64,2	72	0,005	0,146	2 580,59	880,9

Tableau I-3 : Variation des propriétés physiques du béton de chanvre en fonction de la masse volumique (synthèse bibliographique).

1.2.2 Propriétés mécaniques

Les récentes études autour des caractéristiques mécaniques du béton de chanvre ont mis en lumière le comportement de ce dernier : en compression, en traction et en cisaillement. Tous ces comportements sont liés à une microstructure particulière induite par la concentration volumique en liant. Les bétons à base de chanvre montrent en général un comportement élastoplastique avec des déformations plastiques présentes dès de faibles niveaux de sollicitation. Ainsi, la capacité de déformation importante des particules de chanvre permet au béton saturé en chènevotte de subir de fortes déformations sans rupture brutale et sans présenter de rupture fragile marquée.

Cerezo a étudié le comportement du béton de chanvre en compression. La [Figure I-10] montre que le module de Young du béton de chanvre augmente en fonction de la concentration en liant des échantillons de même que sa résistance mécanique. D'autre part, l'auteur a fait varier la contrainte de compactage du matériau frais et prouve que l'augmentation de cette dernière permet d'obtenir des niveaux de résistance deux fois plus élevés. Néanmoins, une

augmentation de la contrainte de compactage risque d'écraser les particules végétales et réduire les performances thermohydriques du matériau final ; de même qu'une augmentation de la proportion de liant. Le béton de chanvre étant un matériau hétérogène, son comportement varie en fonction de la formulation et du type d'application (enduit, toit, mur et dalle) (Cerezo 2005).

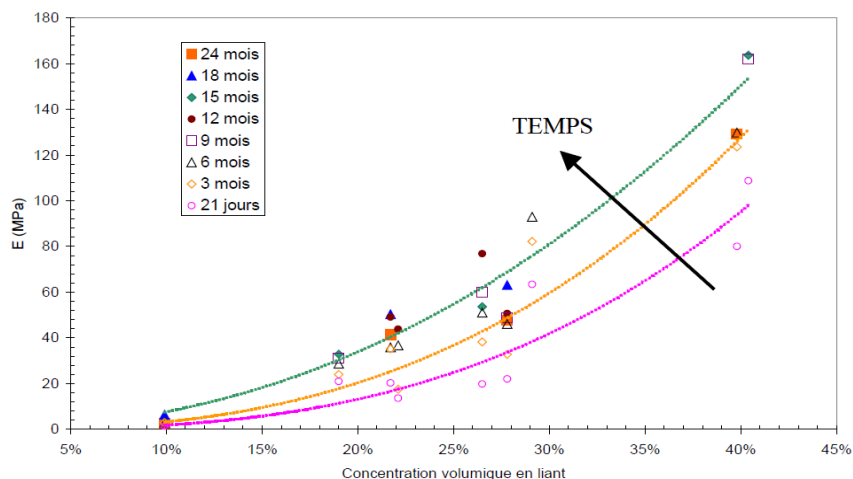


Figure I-10 : Evolution du module de Young en fonction de la concentration volumique en liant (Cerezo 2005).

Dans le même but, Chamoin étudie l'impact de la qualité du liant sur la résistance mécanique du béton de chanvre. En faisant varier la quantité de Microcem (sulfate de calcium) dans la chaux Tradical PF70, celui-ci démontre que la résistance mécanique augmente sensiblement lorsque la quantité de Microcem devient supérieure à la quantité de Tradical PF70. En contrepartie, une augmentation importante de Microcem diminue la perméabilité à la vapeur du matériau (Chamoin 2010).

Nguyen montre que l'évolution des caractéristiques mécaniques du béton de chanvre est d'autant plus importante que le dosage en chènevotte est élevé. Il ajoute à cela que la taille des particules de chanvre influence aussi considérablement les caractéristiques mécaniques du béton. A travers la [Figure I-11], pour une même formulation de béton de chanvre, on peut voir une variation de la résistance à la compression et du module de Young en fonction du taux de compactage et de la taille des granulats (Nguyen 2010).

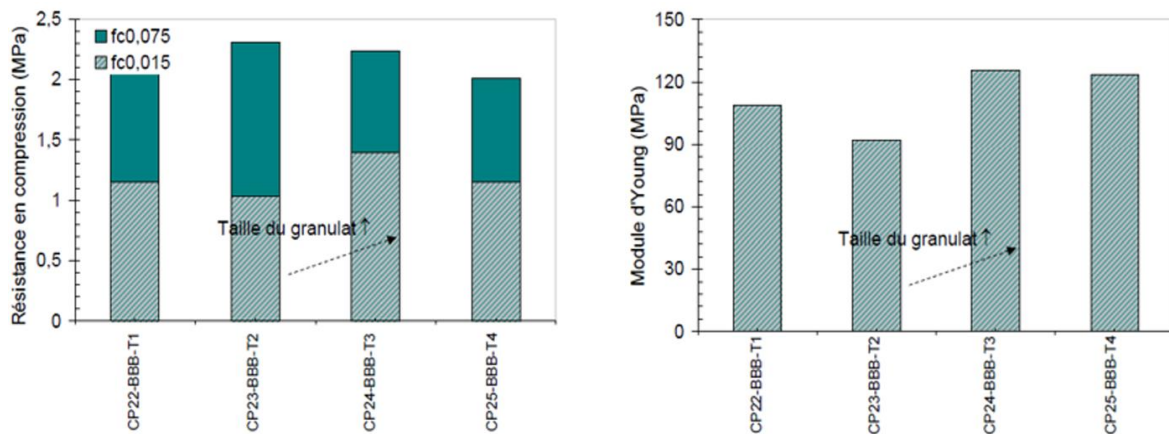


Figure I-11 : Influence de la taille des granulats sur les caractéristiques mécaniques en compression (Nguyen 2010).

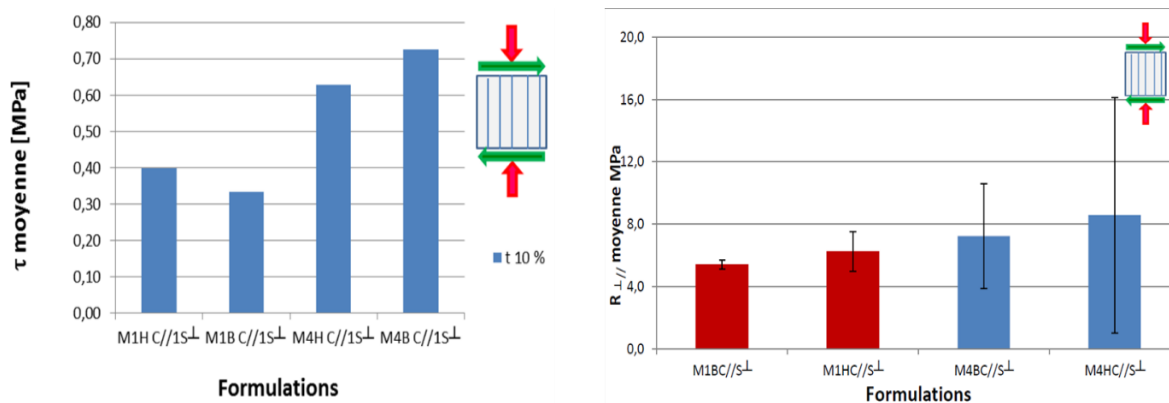


Figure I-12 : Moyenne de la contrainte de cisaillement (τ) à gauche et Module de cisaillement apparent moyen à droite : essai parallèle aux plans d'anisotropie ($C_{//}$ perpendiculaire au sens de compactage) et perpendiculaire aux plans d'anisotropie (S_{\perp} parallèle au sens de compactage) (Youssef 2017)

D'autre part, Youssef et collaborateurs étudient l'impact de la contrainte de compactage sur le comportement en cisaillement du béton de chanvre. Ils démontrent que l'augmentation de la contrainte de compactage du matériau est directement et proportionnellement liée aux contraintes de cisaillement des éprouvettes. Ils démontrent aussi que le module de rigidité au cisaillement n'est pas intrinsèque mais qu'il varie au sein du matériau. A travers la [Figure I-12], on arrive à voir parfaitement que la contrainte et le module de cisaillement de deux différents échantillons de la même éprouvette ont des caractéristiques différentes (M1 et M4 sont les formulations ; pour la partie Basse (B) et Haute (H) de la même éprouvette). Ils viennent donc à conclure que le béton de chanvre est très ductile en cisaillement ; ce qui permet

d'envisager certaines applications dans les zones parasismiques. De plus, la résistance en cisaillement du béton augmente en même temps que la contrainte appliquée sur l'éprouvette (Youssef et al. 2015).

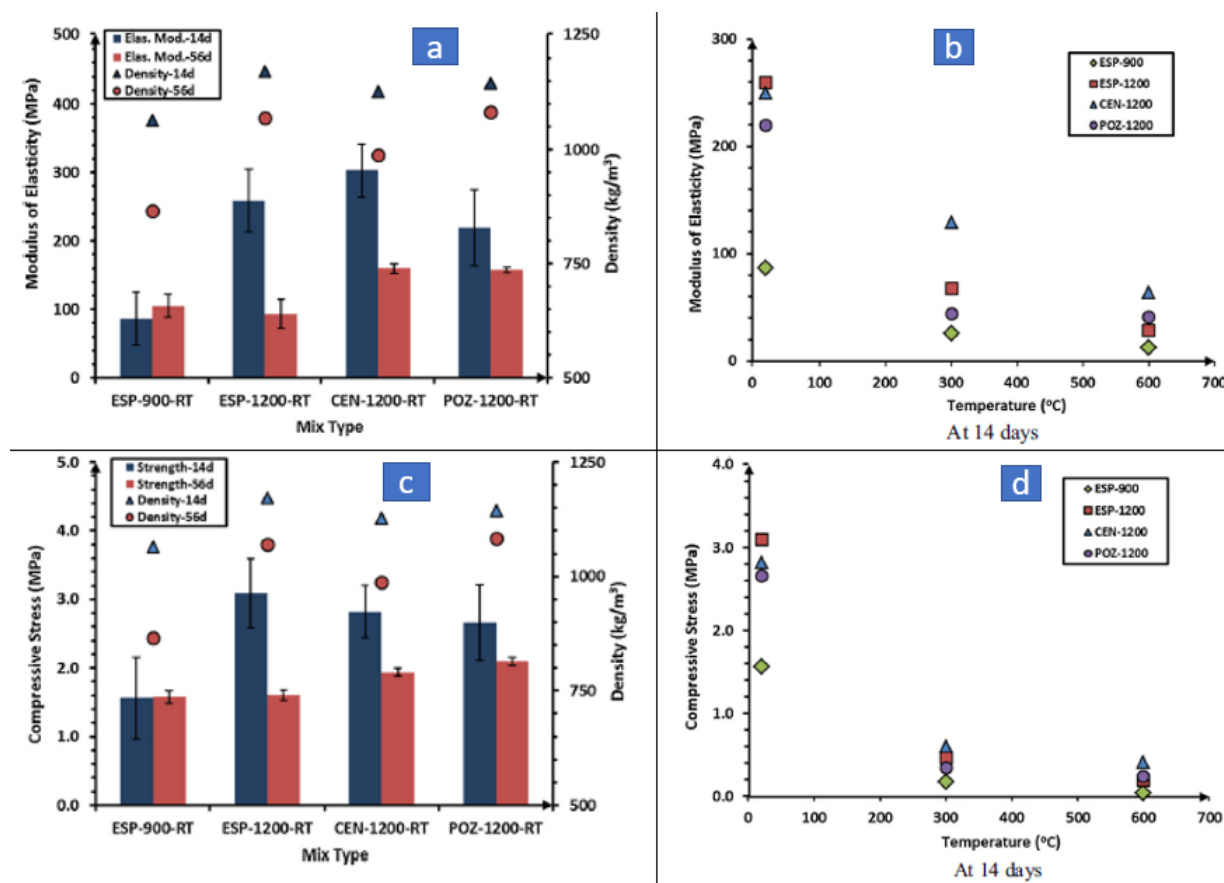


Figure I-13 : Module d'élasticité et Résistance à la compression du béton de chanvre [(a et c : à 14 et à 56 jours) et (b et d : à 20, 300 et 600 °C)] (Kristombu Baduge et al. 2019).

Kristombu Baduge et autres évaluent l'impact de l'ajout des cénoosphères et des liants alcali-activés (laitier moulu, cendre volante de classe F et fumée de silice) sur les propriétés mécaniques du béton de chanvre exposées à 20, 300, et 600 °C. Pour ce faire, il utilise quatre formulations nommées : ESP-900, EPS-1200, CEN-1200 et POZ-1200. Les résultats de ses essais mécaniques présentés sur la [Figure I-13] démontrent que la résistance à la compression et le module d'élasticité du béton de chanvre diminuent avec l'augmentation de la température. De plus, le béton de chanvre avec liant alcali-activé renforcé de cénoosphères a le même comportement mécanique que le béton de chanvre classique et sa résistance mécanique reste inférieure à 5 MPa (Kristombu Baduge et al. 2019).

Plus récemment, Zerrouki et collaborateurs ont travaillé sur l'effet du remplacement partiel de la chaux Tradical PF70 par le Métakaolin sur le vieillissement du béton de chanvre. Pour ce faire, ils ont étudié les propriétés physico-mécaniques (la perte de masse, la porosité, la compression, la flexion et la ténacité) y compris la dégradation pour 15, 20 et 50 cycles de mouillage/séchage. Les résultats présentés par la [Figure I-14 a] montrent que la pouzzolane et la silice amorphe présentes dans le Métakaolin permettent de minimiser significativement la dégradation des particules de chanvre comme mis en évidence par la faible augmentation des propriétés cristallines. De plus, la [Figure I-14 a et b] montre que l'utilisation du Métakaolin, limitant la dégradation des particules de chanvre, représente un moyen efficace pour améliorer la durabilité du béton (Zerrouki et al. 2022).

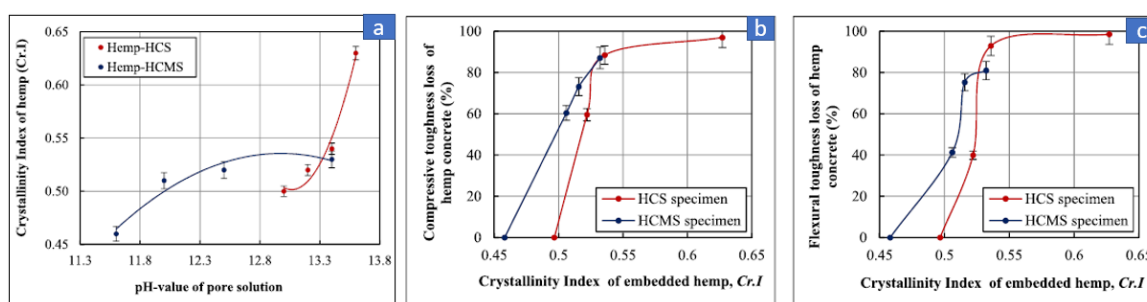


Figure I-14 : Corrélation entre l'indice de cristallinité et du PH des solutions interstitielles durant les cycles de vieillissement (a) et corrélation entre l'indice de cristallinité des particules de chanvre et le comportement mécanique du béton de chanvre (b et c) (Zerrouki et al. 2022).

	Rapport E/L	ρ (kg/m ³)	Contrainte de compression (σ =MPa)	Déformation max (ϵ =mm/mm)	Module de Young (E=MPa)	Module de Poisson (ν =MPa)	Résistance mécanique (MPa)
BC (Cerezo 2005)	1.48	391	0,35 à 0,80	0,05 à 0,06	32 à 92	0,08 à 0,16	-
BC (Nguyen 2010)	0.85	900	0,2 à 3,6	< 7%	< 170	-	-
BC (Chamoin 2010)	0.83	428.94	0,76	0,02	95,39	-	-
BC (Youssef 2017)	0.55	657.17	1,1	-	40	0,62	0,72 ± 0,36

Tableau I-4 : Evolution des propriétés mécaniques, en fonction de la masse volumique et du rapport eau/liant, obtenue en compression parallèle au sens de compactage du béton de chanvre (synthèse bibliographique).

Toutes ses études et la synthèse bibliographique du [Tableau I-4] montrent que le béton de chanvre a de faibles propriétés mécaniques et que son comportement varie en fonction des formulations : dosage en liant et chènevotte. Raison pour laquelle, il ne peut être utilisé que comme matériau de remplissage.

1.2.3 Propriétés hydriques

L'étude hygrothermique dans un matériau poreux prend en compte l'eau sous forme attachée et libre. Cette eau est absorbée par le matériau sous forme liquide et vapeur. Pour l'évaluation de la quantité d'eau liquide absorbée par un matériau, on l'immerge dans l'eau. Exposé dans une ambiance humide, c'est la vapeur d'eau de l'air environnant qui se fixe par adsorption sur la paroi des pores ouverts du matériau pouvant aller jusqu'à saturation. Ce qui entraîne une variation de la masse apparente du matériau.

1.2.3.1 Sorption

Le phénomène d'adsorption de vapeur d'eau dans le béton de chanvre se traduit par une augmentation de sa masse apparente lorsqu'il est exposé à un taux d'humidité croissant. Le phénomène de désorption a l'effet inverse, mais pas nécessairement de façon symétrique.

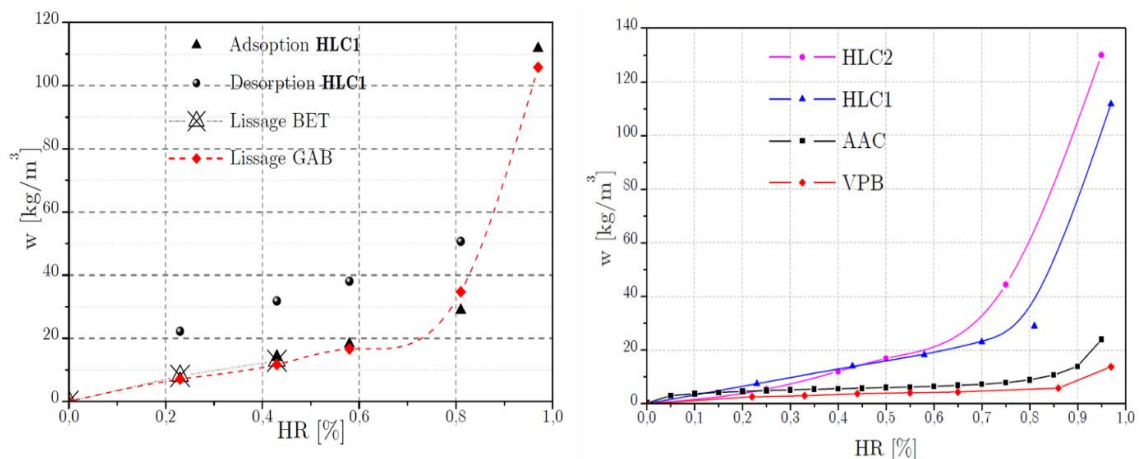


Figure I-15 : Courbes d'adsorption/désorption du béton de chanvre à 20 °C avec lissage de l'isotherme par le modèle GAB et de BET (à gauche) et Isotherme de sorption de différents matériaux (à droite) (Samri 2008).

A travers la [Figure I-15], Samri démontre qu'à humidité relative inférieure à 50% HR, l'adsorption est faible et que la teneur en eau massique du béton de chanvre est inférieure à 10%. Mais, cette adsorption devient plus importante au-delà de 50% HR. La [Figure I-15]

gauche permet de comparer les isothermes de sorption des différents matériaux étudiés. Il apparait clairement que le béton de chanvre a une meilleure capacité de stockage sur la plage d'humidité relative comprise entre 30 et 90% HR par rapport aux autres matériaux (HLC1/2 : béton de chanvre, AAC : béton cellulaire autoclavé, et VPB : tesson de terre cuite) (Samri 2008).

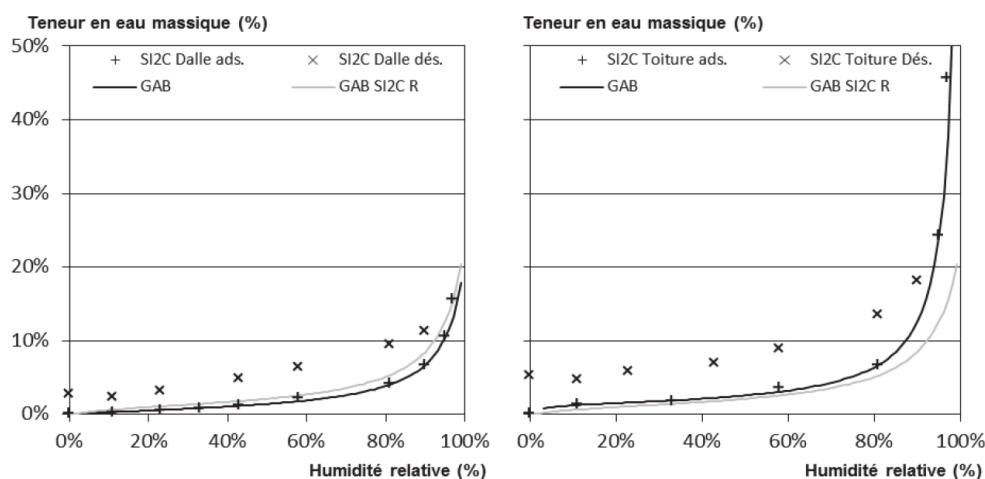


Figure I-16 : Isotherme de sorption de deux formulations de bétons de chanvre SI2C : à gauche formulation dalle et à droite formulation toiture (Chamoin 2010).

Dans la même optique, Chamoin étudie l'impact du rapport liant/chènevotte sur la capacité d'adsorption du béton de chanvre. Il vient à conclure que plus le béton de chanvre est fortement dosé en liant, moins il absorbe l'humidité. De plus, en étudiant la sorption de différentes formulations, il démontre que la capacité de sorption du béton de chanvre dépend beaucoup du granulats utilisé (fibres ou particules). D'autre part, à travers la [Figure I-16], il vérifie que le traitement chimique avec un hydrofuge et un héliofuge empêche l'eau de se fixer sur les chènevottes et de remplir les capillaires ; ce qui réduit considérablement la capacité de sorption du béton (Chamoin 2010).

Alors que Collet et collaborateurs présentent une comparaison du comportement du béton de chanvre en sorption en fonction de sa mise en œuvre. Trois types de mise en œuvre sont étudiés pour une formulation de type « mur » : un premier béton de chanvre préfabriqué avec chènevotte (PHC), un deuxième projeté avec chènevotte (SHC) et un troisième moulé avec des fibres de chanvre (MHC) (Collet et al. 2013).

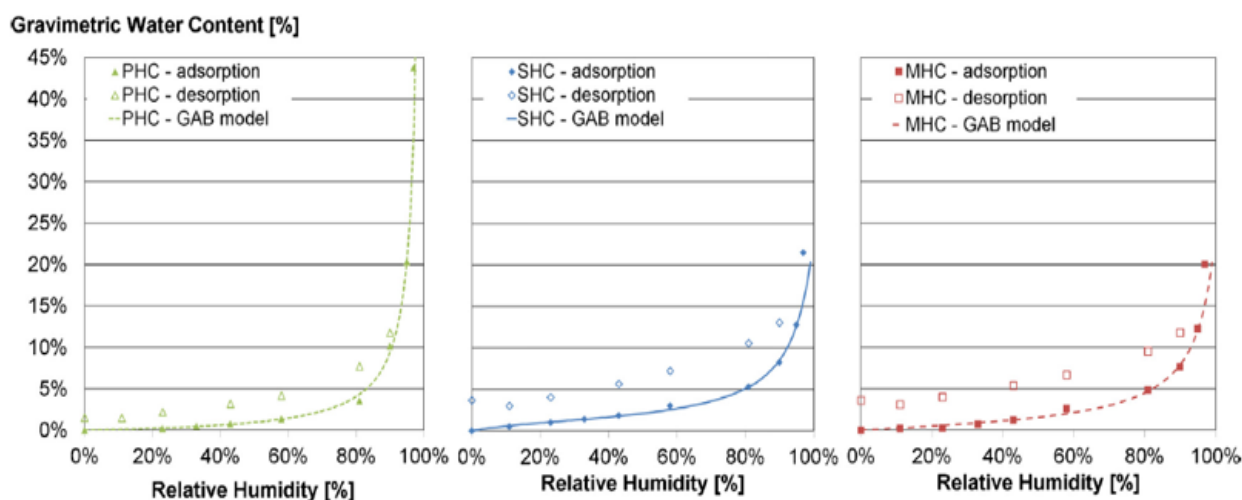


Figure I-17 : Isotherme de sorption de bétons de chanvre pour chaque procédé de mise en œuvre : les points représentent les données expérimentales et les lignes les modèles (Collet et al. 2013).

A partir des isothermes de sorption des trois bétons de chanvre présentés sur la [Figure I-17], il est montré qu'à des humidités relatives inférieures à 81% HR, la teneur en eau du béton de chanvre préfabriqué (PHC) est légèrement inférieure à celle des bétons de chanvre moulé et projeté. En revanche, à des plages d'humidités relatives supérieures à 81% HR, la condensation capillaire dans ce béton préfabriqué est très importante. Alors que pour les autres formulations (SHC et MHC), elle démarre progressivement et s'étend sur une large plage d'humidité relative. Cette différence de comportement en sorption est particulièrement due au fait que le béton de chanvre moulé et celui projeté ont le même rapport chanvre/liant (0,5) ; alors que le béton de chanvre préfabriqué a un rapport chanvre/liant (0,65) plus élevé.

Par ailleurs, Aït Oumeziane et collaborateurs étudient l'influence de la température ambiante sur la capacité de sorption d'un béton de chanvre. Les résultats expérimentaux présentés sur la [Figure I-18] permettent de comparer les isothermes de sorption déterminés à 10 °C et à 23 °C. A travers ces courbes, on remarque que la teneur en eau du matériau diminue lorsque la température augmente sur la plage de 25% HR à 85% HR ; alors que l'écart entre 10 et 23 °C est faible aux humidités relatives élevées. Enfin, la variation de température lui permet de démontrer que la capacité de sorption hygrique du béton de chanvre est plus significative à basse température. Ce constat leur permet de mettre en évidence l'influence de la température sur le processus de sorption hystérétique du béton de chanvre (Aït Oumeziane et al. 2016).

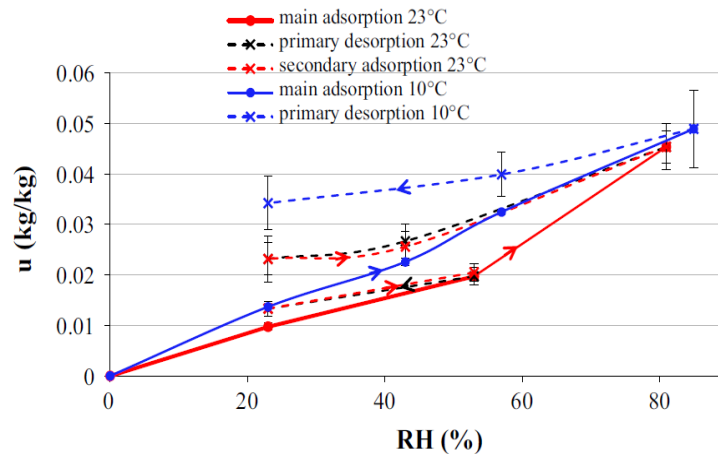


Figure I-18 : Mesures expérimentales de désorption primaire et d'adsorption secondaire (traits pointillés et croix) et mesures expérimentales d'adsorption principale (traits pleins et cercles pleins) (Aït Oumeziane et al. 2016).

I.2.3.2 Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau représente la capacité d'un matériau à transmettre l'eau en phase gazeuse sous un gradient de pression de vapeur. Les trois principaux modes de transport sont : la diffusion sous forme vapeur dans les pores du matériau, l'effusion par les phénomènes de sorption/désorption, et le transport capillaire de l'eau en phase liquide au sein du matériau.

Dans l'optique d'étudier l'évolution de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre en fonction de la formulation, Chamoin utilise des rapports liant/chènevotte variés (mur 4/2, dalle 5/2 et toiture 2/2) (Chamoin 2010). Ce dernier a démontré que pour des humidités relatives inférieures ou égales à 60% HR, la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre en formulation mur est comparable à celle de la formulation dalle. Alors qu'au-delà de 60% HR, la perméabilité à la vapeur d'eau de la formulation faiblement dosée en liant augmente considérablement. De plus, celle de la formulation fortement dosée en liant évolue peu aux humidités relatives supérieures à 60% HR, comme indiqué sur la courbe gauche de la [Figure I-19].

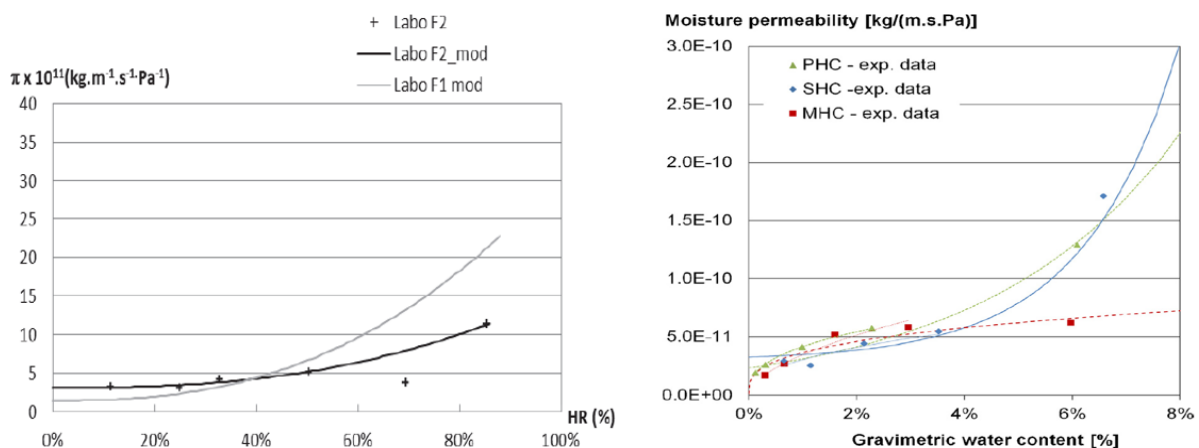


Figure I-19 : Evolution de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre en fonction de la formulation à gauche (Chamoin 2010) et de la mise en œuvre à droite (Collet et al. 2013).

Dans la même direction, Collet et collaborateurs montrent que l'augmentation du taux d'humidité dans l'air provoque une augmentation significative de la perméabilité à la vapeur d'eau (Collet et al. 2013). Cette augmentation est due au transport de l'humidité relative induite par les pores remplis d'eau. La courbe droite de la [Figure I-19] montre la variation de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau, en se référant à l'isotherme d'adsorption du matériau. De plus, pour les faibles valeurs de teneur en eau (inférieure ou égale à 4%), la perméabilité à la vapeur d'eau est similaire pour les trois bétons (PHC, SHC et MHC). Mais, pour des teneurs en eau plus élevées, les courbes de perméabilité des bétons de chanvre projetés et préfabriqués montrent une augmentation exponentielle.

	ρ (Kg/m ³)	Perméabilité à la vapeur (kg/(m.s.Pa))	
Humidité	-	0 à 50%HR	> 50%HR
Béton de chanvre SI2C (Chamoin 2010)	421,6	$2,92 \cdot 10^{-11}$	$2,13 \cdot 10^{-10}$
Béton de chanvre SI2C Enduit T (Chamoin 2010)	880,9	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$4,43 \cdot 10^{-11}$
Béton de chanvre moulé MHC (Collet et al. 2013)	430	$3,24 \cdot 10^{-11}$	$6,70 \cdot 10^{-10}$
Béton de chanvre (Oumeziane 2013)	450	-	$5 \cdot 10^{-10}$
Béton de chanvre (Mourad Rahim et al. 2015)	329	$2,3 \cdot 10^{-11}$	-

Tableau I-5 : Synthèse bibliographique de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre.

Le [Tableau I-5] synthétise les résultats des études sur la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre. Il montre que, comparativement à d'autres matériaux de construction, le béton de chanvre est très perméable à la vapeur d'eau.

- **Diffusivité hygrique**

Chamoin travaille aussi sur la diffusivité hygrique de différentes formulations du béton de chanvre. En faisant varier le niveau de compactage, il vient à démontrer que la diffusivité hydrique du béton de chanvre augmente puis décroît en fonction de la teneur en eau (Chamoin 2010). De plus, le graphique de gauche de la [Figure I-20] permet de voir que l'augmentation du niveau de compactage, s'accompagnant d'une augmentation de la densité et d'une diminution de la porosité, va entraîner une diminution de la diffusion hygrique.

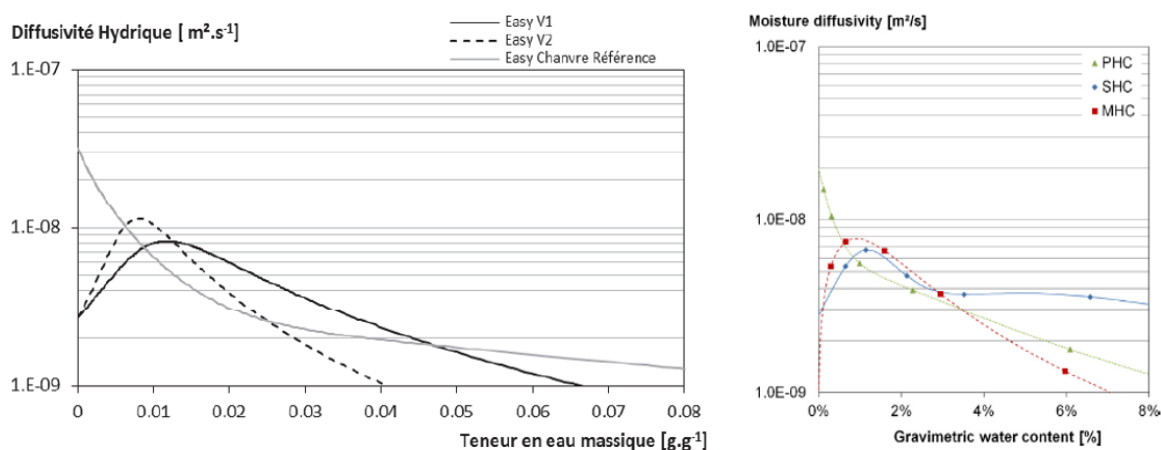


Figure I-20 : Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau à gauche obtenue par (Chamoin 2010) et à droite obtenue par (Collet et al. 2013).

Dans le même esprit, Collet et collaborateurs étudient aussi la diffusivité hydrique pour les trois formulations de béton de chanvre (PHC, SHC et MHC) (Collet et al. 2013). A travers le graphique de droite de la [Figure I-20], ils démontrent que le béton de chanvre projeté et celui moulé ont des courbes similaires pour des teneurs en eau inférieures à 3%. Alors que pour les teneurs en eau plus élevées, ces courbes de diffusivité hydrique s'écartent en raison de la différence de perméabilité à la vapeur d'eau des différentes formulations.

1.2.3.3 Valeur de la capacité tampon hydrique ou Moisture Buffer Value (MBV)

La quantité d'adsorption/désorption d'humidité par une surface ouverte sous une variation cyclique journalière d'humidité relative représente la capacité tampon hydrique. Cette dernière,

mesurée sous le protocole Nordtest et appelée MBV, caractérise la capacité du matériau à modérer les variations d'humidité de l'air environnant. Le [Tableau I-6], présente la synthèse bibliographique des travaux sur la capacité tampon hydrique du béton de chanvre. Ce dernier montre qu'il y a une relation entre la valeur de la MBV et le rapport chanvre/liant. Plus ce rapport est élevé, plus la MBV est élevée. De plus, en étudiant l'évolution de la MBV du béton de chanvre en fonction de la technique de mise en œuvre, Collet et collaborateurs montrent que la masse volumique et la formulation ont aussi un impact sur sa capacité tampon hydrique (Collet et al. 2013).

	ρ (kg/m ³)	Rapport C/L	MBV (g/ (m ² . %HR))
Béton de chanvre moulé (mur) (Collet et Pretot 2012a)	440	0,5	2,14
Béton de chanvre préfabriqué (mur) (Collet et al. 2013)	460	0,65	1,94
Béton de chanvre projeté (Collet et al. 2013)	430	0,5	2,15
Béton de chanvre Easy R (Oumeziane 2013)	460	-	1,95
Béton de chanvre Enduit (Mazhoud et al. 2016)	715-730	0,15	1,26

Tableau I-6 : Variation de la MBV du béton de chanvre en fonction de la masse volumique et la formulation (synthèse bibliographique).

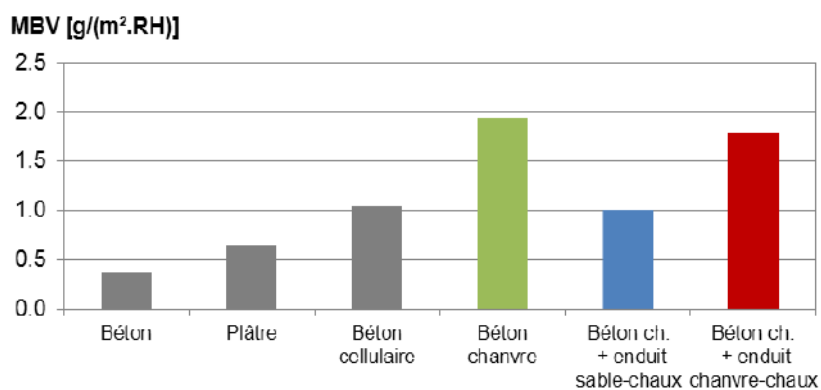


Figure I-21 : Valeur de la capacité tampon hydrique des matériaux usuels et du béton de chanvre moulé avec et sans enduit (Collet, Pretot, et Lanos 2013).

En complément, Collet et collaborateurs comparent la valeur MBV du béton de chanvre à celle d'autres matériaux classiques tels que : le béton normal, le béton cellulaire et le plâtre (Collet, Pretot, et Lanos 2013). A travers la [Figure I-21], on peut voir que le béton de chanvre

est largement meilleur régulateur hydrique que les matériaux conventionnels. De plus, le béton de chanvre couvert d'un enduit chanvre chaux reste bon régulateur hydrique. Alors qu'avec un enduit sable/chaux, ses performances sont comparables à celle d'un béton cellulaire, tout en restant supérieures à celles du plâtre et d'un béton à base de ciment.

Asli et collaborateurs font une comparaison du comportement du béton de chanvre soumis à des sollicitations cycliques d'humidité en faisant varier le coefficient de transmission surfacique pour déterminer sa capacité tampon hygrique (Asli et al. 2021). Ils obtiennent des valeurs de MBV comprises entre 1,82 et 3,02 g/ (m². %HR) pour des coefficients de transfert surfacique de 1×10^{-8} s/m et 3×10^{-6} s/m. A partir de ces résultats, ces derniers démontrent que la valeur MBV dépend du coefficient de transmission surfacique, mais que le béton de chanvre reste meilleur régulateur d'humidité comparativement au béton cellulaire ou au plâtre.

Plus récemment, Sawadogo et collaborateurs ont travaillé sur l'impact de la température ambiante sur la valeur de la MBV du béton de chanvre (Sawadogo et al. 2022). Pour ce faire, ce dernier expose le béton de chanvre à une variation cyclique d'humidité relative à : 10, 23 et 40 °C. A travers ses études, il démontre que la MBV du béton de chanvre évolue en fonction de la température. Ses résultats concordent avec ceux de Igue et collaborateurs qui ont montré que pour des bétons de palmier et de tournesol, la MBV augmente aussi en fonction de la température (Igue et al. 2021).

1.2.4 Propriétés thermiques

Dans la littérature, les propriétés thermiques sont généralement exprimées par la conductivité thermique et la chaleur massique. D'une part, la chaleur massique d'un matériau représente la quantité d'énergie à fournir à ce matériau pour élever une masse de 1 kg d'un degré centigrade sans changement de phase. Alors que la conductivité thermique représente la capacité du matériau à transférer cette chaleur sous un gradient de température. En se basant sur les travaux de certains auteurs (Nguyen 2010; Samri 2008; Collet 2004), la conductivité thermique du béton de chanvre peut varier entre 0,07 et 0,2 W/(m.K), dépendant de la formulation utilisée.

De plus, Cerezo et Evrard démontrent que la conductivité thermique du béton de chanvre varie en fonction de l'humidité (Cerezo 2005; Evrard 2008). L'eau étant un meilleur conducteur de la chaleur que le matériau sec : plus la teneur en eau dans le matériau est élevée, plus sa

conductivité thermique augmente. Entre 50 et 75% HR, ils observent une augmentation de la conductivité thermique du béton de chanvre de l'ordre de 20% à 40%. Par ailleurs, d'autres études montrent que pour une teneur en eau donnée, le béton de chanvre emmagasine plus ou moins d'énergie lors du processus de sorption en fonction de la chaleur isostérique (Seng, Magniont, et Lorente 2019b; Colinart et Glouannec 2017; Oumeziane 2013).

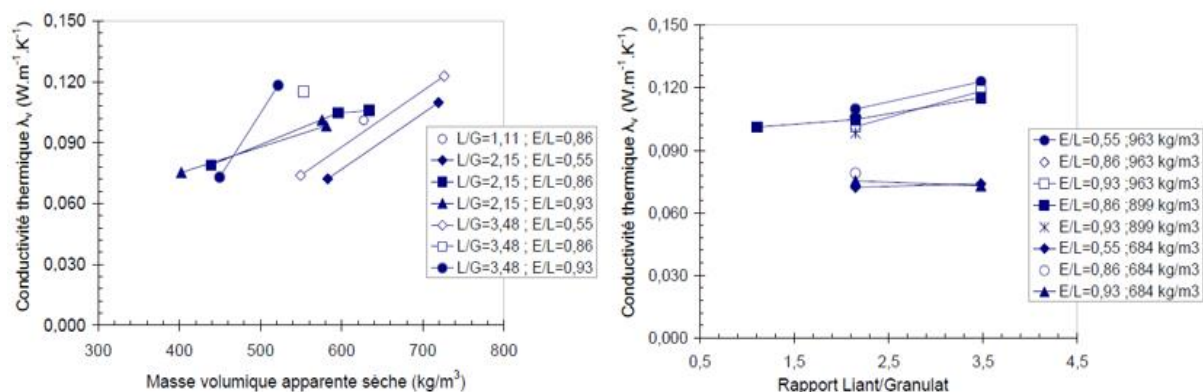


Figure I-22 : Influence du compactage (à gauche) et du rapport liant/granulat (à droite) sur la conductivité thermique du béton de chanvre fabriqué avec des particules de chanvre (Nguyen 2010).

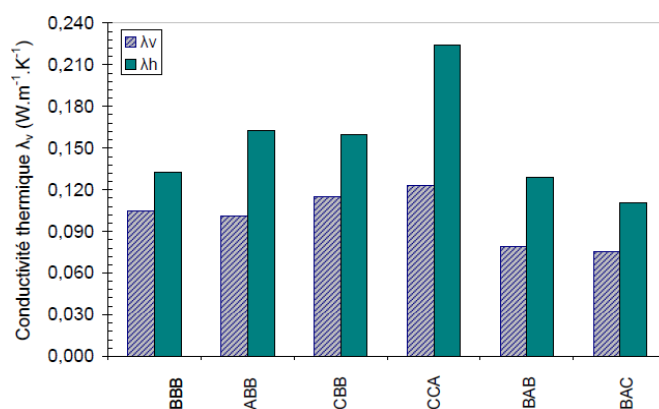


Figure I-23 : Comparaison entre la conductivité thermique verticale et horizontale dans le cas du béton de chanvre fabriqué avec les granulats de chanvre (Nguyen 2010).

Dans la même direction, Nguyen constate que la conductivité thermique du béton de chanvre est influencée par : la nature du liant, la qualité de la chènevotte, la masse volumique, le compactage et l'orientation des particules (anisotropie du composite) (Nguyen 2010). Ainsi, comme illustré par la [Figure I-22] et la [Figure I-23], Nguyen et autres montrent que la conductivité thermique du béton de chanvre augmente d'environ 50% lorsqu'elle est mesurée dans le sens perpendiculaire au sens de compactage (Haik, Peled, et Meir 2020; Nguyen 2010).

Cette augmentation est due à l'orientation des particules de chènevottes qui conduit à une structure plus stratifiée. En ce qui concerne l'aspect théorique, Tran Le et collaborateurs développent un nouveau modèle permettant de prédire le tenseur de la conductivité thermique du béton de chanvre prenant en compte : l'anisotropie et la taille de la chènevotte, la distribution spatiale des granulats suivant le processus de fabrication et les imperfections d'interfaces entre le liant et les particules végétales (Anh Dung Tran Le, Nguyen, et Langlet 2019).

En outre, pour compléter l'étude de la performance thermique du matériau, on peut déterminer la diffusivité et l'effusivité thermiques qui permettent d'évaluer la capacité du matériau à transmettre rapidement et à restituer de la chaleur.

	ρ (kg/m ³)	Chaleur Massique (C _p) (J/(kg.k))	Conductivité thermique (λ) (W / (m.K))	Diffusivité thermique (σ) (10 ⁻⁷ m ² /s)	Effusivité thermique (Eff) (kg/(m ² .Pa.s ^{1/2}))
BC (Collet 2004)	413	1000	0,11	2,6	206,9
BC (Samri 2008)	317	1000	0,085	2,62	162
BC (Evrard 2008)	460	1530	0,11	1,5	267
BC (Oumeziane 2013)	450	1250	0,117	2,08	256,54
Béton plein (J.-P. Dumas et al. 2014)	2300	900	1,75	8,45	1903,29
BA13 (J.-P. Dumas et al. 2014)	850	800	0,35	5,15	487,85
BC préfa. (Seng, Magniont, et Lorente 2019b)	446	911	0,103	2,54	204,57

Tableau I-7 : Evolution des propriétés thermiques du béton de chanvre en fonction de la masse volumique (synthèse bibliographique).

La synthèse bibliographique rassemblée dans le [Tableau I-7] montre que contrairement aux bétons conventionnels, le béton de chanvre a : une faible conductivité thermique, une effusivité thermique faible et une diffusivité élevée. En somme, ces propriétés thermiques permettent de classer le béton de chanvre comme matériau à faible inertie thermique. A l'échelle d'un local, les résultats numériques obtenus par Maalouf et collaborateurs montrent qu'il y a un risque de

surchauffe intérieure en période chaude ; en raison de la faible effusivité du béton de chanvre (C. Maalouf et al. 2014).

D'autre part, Haik et collaborateurs remplacent de la chaux par différentes proportions de deux liants non cuits (50% de Kalir, 50% de Mamshit et 100% de Mamshit) pour étudier l'influence du liant sur la performance thermique du béton de chanvre à l'échelle de cellules (Haik, Peled, et Meir 2020). Les résultats de ces études montrent, d'une part, que le remplacement partiel ou total de la chaux par d'autres liants a un impact négligeable sur les performances hygrothermiques du béton de chanvre. Et, d'autre part que, dans tous les cas de figure, le béton de chanvre a de meilleures performances hygrothermiques que les blocs de béton creux ou le polystyrène expansé.

D'une manière générale, les bétons de chanvre présentent globalement de bonnes performances thermohydrauliques comparativement à d'autres matériaux. On constate néanmoins que, malgré leur faible inertie thermique et leur résistance mécanique médiocre, ils présentent plus d'avantage en termes d'économie d'énergie et d'émissions de CO₂ par rapport à un béton classique.

I.3 Matériaux à changement de phase (MCP)

Les exigences des réglementations thermiques, particulièrement la nouvelle réglementation environnementale RE2020 ont fait évoluer l'enveloppe vers des niveaux de performances permettant de réaliser des bâtiments écologiques et à très basse consommation. Actuellement, les bâtiments aux faibles inerties thermiques risquent de ne pas assurer des ambiances thermiquement confortables en été.

Pour renforcer cette inertie thermique, un regain d'intérêt s'est manifesté pour les matériaux à changement de phase, justifié par le fait qu'ils sont capables de céder et emmagasiner de l'énergie sous forme de chaleur, et ainsi limiter les pics de consommation et les périodes de surchauffe en été. Ils représentent donc une alternative durable pour la réduction de la consommation énergétique des bâtiments.

Cette section présentera d'abord ces matériaux à changement de phase avant de montrer les avantages de leur utilisation dans l'enveloppe du bâtiment, en se référant à divers travaux sur ce sujet.

1.3.1 Classification et usage des MCP

Les matériaux à changement de phase visés ici se présentent sous forme solide-liquide ; ils peuvent être : organiques, inorganiques ou eutectiques (mélange de plusieurs corps purs) comme présenté sur la [Figure I-24] (Guichard 2013). Ces matériaux sont classés en fonction de : leur température de fusion, leur chaleur latente de changement de phase et leurs caractéristiques thermophysiques.

Parmi ces MCP, les organiques sont des mélanges pouvant être solides et liquides à plusieurs reprises sans entraîner une dégradation de la chaleur latente et sans ségrégation des phases. Parmi eux, on retrouve les paraffines et les non-paraffines. Ces derniers ont plusieurs avantages tels que : une stabilité chimique, une chaleur latente élevée, pas de surfusion, non corrosifs et non toxiques (Bedecarrats et al. 2015; Le Dû 2012).

Contrairement aux MCP organiques, les MCP inorganiques sont plus difficiles à envisager dans les matériaux du bâtiment malgré leur capacité de stockage d'énergie assez élevée. Ils sont en effet souvent très corrosifs et sujets à la surfusion.

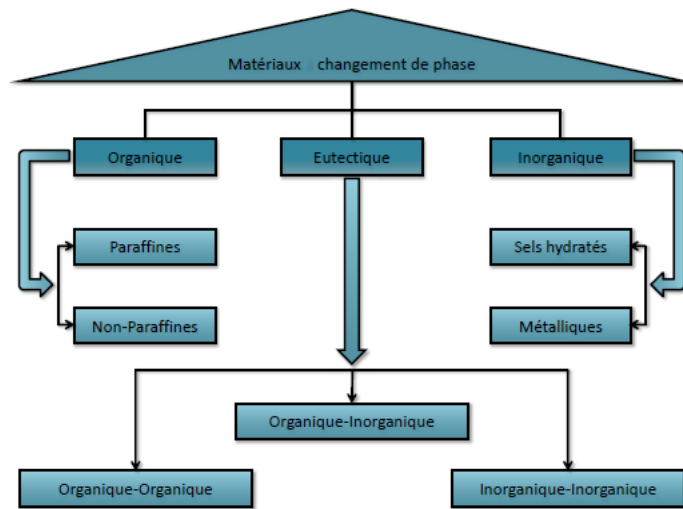


Figure I-24 : Types des matériaux à changement de phase (Guichard 2013).

I.3.1.1 Critères de sélection

Le choix du MCP à utiliser dans le bâtiment se fait selon les principes de stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Ce choix se base sur plusieurs critères : la température de fusion et de solidification, la chaleur latente de changement de phase, la densité solide/liquide, sa rapidité de stockage et déstockage de chaleur, Etc. Ajouté à cela, les différentes propriétés (thermiques, physiques et chimiques) de ces MCP doivent répondre à certaines exigences.

- ✓ Propriétés thermiques : concernant ces dernières, la température de transition de phase doit être conforme au domaine d'étude ; la chaleur latente de fusion doit être supérieure à 100 J/kg et il doit avoir une bonne qualité de transfert de chaleur. Ainsi, pour l'application dans le bâtiment, le matériau doit être capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte entre 10 et 80 °C (Guichard 2013; Madjoudj 2016), et proche de la moyenne de celle ambiante (Zhang et al. 2007; Almitani et al. 2022). Cela permet d'éviter les inconvénients comme celui remarqué par Le Dû, où la plage de changement de phase du MCP ne permet pas sa resolidification complète ; ce qui ne permet pas d'atteindre la capacité de régulation maximale espérée (Le Dû 2012).
- ✓ Propriétés physiques : une étude de la variation de la densité durant le processus de changement de phase du corps est nécessaire pour évaluer le volume de MCP

utile au stockage et déstockage de chaleur. De plus, la tension de vapeur au sein du matériau doit être minimale pour limiter son expansion volumique, et les différentes phases doivent avoir une certaine stabilité pour favoriser le stockage et le déstockage de la chaleur (Soupart-Caron 2015).

- ✓ Chimiquement : le MCP doit avoir une stabilité chimique lors des cycles de fusion/solidification et à long terme. Il doit être : compatible avec les matériaux de construction, non nocif, non toxique, non inflammable, non explosif et recyclable (Madjoudj 2016).

Ainsi, Ahmed affirme que les MCP organiques paraffines et non-paraffines, bien qu'ayant une faible conductivité thermique, offrent bien plus d'avantages que les MCP inorganiques (Ahmad 2004). Ils sont non réactifs et ont une variation de pression de vapeur et de volume faibles. De plus, Guichard utilise pour ces expériences de la cire de paraffine qui est le MCP organique qui répond le mieux aux critères de choix (Guichard 2013). D'autre part, les études de certains auteurs montrent que les MCP organiques paraffinés et non paraffinés sont d'excellents renforts en isolation passive et permettent au bâtiment de maintenir une certaine température intérieure (Laurence Le Stum 2006; Guichard 2013; Ahmad 2004).

	Matériaux	ρ (kg/m ³)	T _F (°C)	λ (W/(m.K))	L _F (kJ/kg)
(Borderon 2012)	Engergain ®	908	26	0,20 ± 0,03	170
(Le Dû 2012)	Engergain ®	1001,5	21,7	0,15 ± 0,015	140
(Tittlein, Gibout, Franquet, Zalewski, et al. 2015)	Micronal PCM® DS 5001 X	1 000	26	-	110
(Bahrar 2018)	Intertek 23 P	300-400	23	0,16 ± 0,01	160
(Kodjo 2019)	Micronal PCM® DS 5039 X	900	26,85	0,15-0,23	168
(Abdellatef et Kavgic 2020)	Micronal PCM® DS 5038 X	300-400	25	-	97
(Safari et al. 2021)	Paraffine	870	43-55	0,17 ± 0,03	153,32
(Almitani et al. 2022)	A27	768	27	0,22	250

Tableau I-8 : Caractéristiques de différents MCP utilisés dans le bâtiment (synthèse bibliographique).

Comme Guichard, Ahmed et les auteurs cités dans le [Tableau I-8] ci-dessus, on retrouve plusieurs autres chercheurs confirmant les avantages des MCP paraffines et non paraffines dans le bâtiment. Par conséquent, nous avons retenu le Micronal PCM® DS 5001 X constitué de paraffine microencapsulée pour notre étude, à l'instar d'autres chercheurs (Tittlein, Gibout, Franquet, Zalewski, et al. 2015; Franquet, Gibout, Zalewski, et al. 2014).

1.3.1.2 Conditionnement des MCP pour l'application au bâtiment

Les matériaux à changement de phase ont déjà des applications dans : le bâtiment, les systèmes de production d'énergie solaire, l'industrie textile, Etc. Pour une incorporation dans les matériaux de construction, ils doivent être conditionnés et garantir une bonne compatibilité physique et d'adhérence avec les constituants de la matrice. Ce conditionnement doit répondre aux besoins de l'application et éviter les fuites et risques de corrosion (Bahrar 2018). On peut ainsi répertorier plusieurs techniques de conditionnement dont : l'encapsulation, l'incorporation direct et l'immersion (Li et al. 2022). Dans le cas du bâtiment, on utilise largement l'encapsulation par les techniques suivantes :

- ✓ La macro-encapsulation : elle consiste à encapsuler le MCP dans : des tubes, des sachets, des sphères ou des panneaux. Tous capables de limiter les risques de fuite et ayant une bonne conductivité thermique. La [Figure I-25] présente des exemples de MCP macro-encapsulés. Ces MCP macro-encapsulés sont souvent utilisés comme échangeurs de chaleur et sous forme de poches incorporées dans les parois.

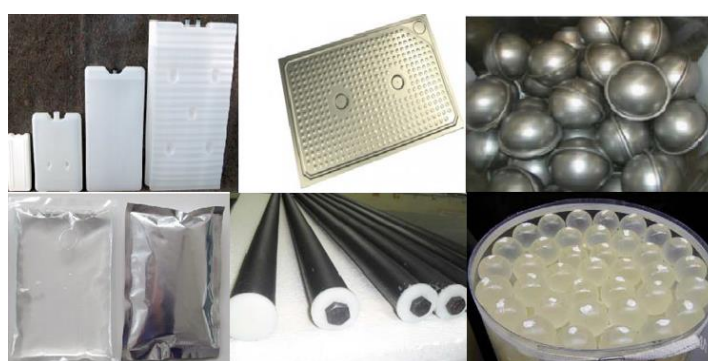


Figure I-25 : Exemple de microcapsules de MCP.

- ✓ La micro-encapsulation : les microcapsules ont la taille de grains de sable très fin comme sur la [Figure I-26 a]. Ces dernières sont faciles à incorporer directement dans la formulation des matériaux de construction au moment du malaxage.

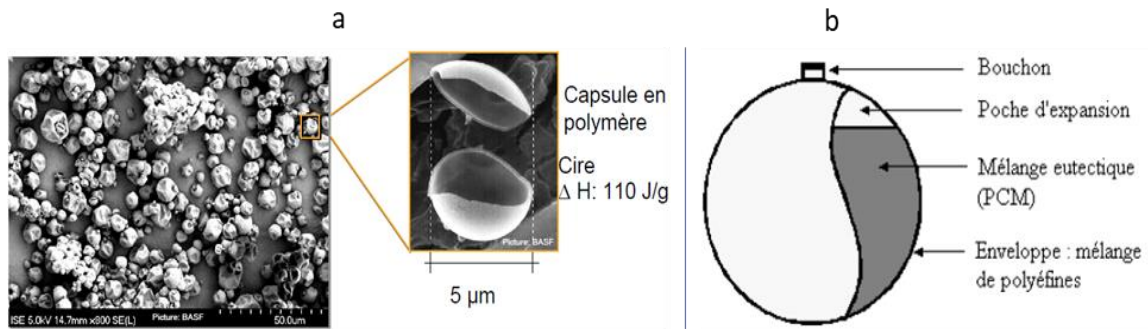


Figure I-26 : (a) Vue microscopique de la microencapsulations d'une microbille de MCP, (Laurence Le Stum 2006) et (b) MCP confiné dans une capsule (Bricard et Gobin 2001)

Globalement, les MCP peuvent être intégrés dans le bâtiment par : incorporation directe dans les matériaux, accrochage, panneaux intégrés, immersion ou encapsulation (Li et al. 2022). L'intégration par immersion consiste à utiliser le MCP comme constituant dans la formulation du béton (Bahrar 2018). Celle par accrochage consiste à attacher des couches de MCP à la paroi comme Kuznik et collaborateurs (Kuznik, Virgone, et Roux 2008). Alors que l'intégration par panneaux consiste à insérer des panneaux dans la structure du bâtiment comme dans l'exemple montré par la [Figure I-27]. D'une manière générale, ces produits peuvent être utilisés en rénovation comme en construction neuve.



Figure I-27 : Poche contenant du MCP (Mathis 2019).

A titre d'exemple, après avoir envisagé l'étude d'un mur en plâtre/MCP et un autre en matières organiques (polycarbonate, PVC, Etc.), Ahmed choisit de coupler un panneau rempli de MCP avec un super isolant. En choisissant cette application, il évite : la dégradation des granulats de son MCP en présence d'eau lors de la fabrication du mélange (Ahmad 2004). Cela lui permet aussi d'éviter l'effusion de la paraffine lors du séchage des échantillons et la

variation des propriétés thermophysiques en fonction du temps. D'autre part, Kodjo effectue une observation du composite mortier ciment avec MCP au microscope électronique pour analyser l'état des microbilles dans le composite (Kodjo 2019). Il remarque que les microbilles sont restées intactes, ce qui prouve l'efficacité de la micro-encapsulation.

En se basant sur les études bibliographiques présentées dans cette sous-section, dans le cadre de nos études nous avons choisi l'incorporation du MCP sous forme de microcapsules pour éviter son effusion et la dégradation de ses propriétés thermophysiques au fil du temps.

1.3.2 Intégration du MCP dans le bâtiment

Pour réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre, le bâtiment a besoin d'une attention particulière car il est soumis à des sollicitations externes et internes variables en fonction des saisons et de son usage. De plus, le confort intérieur est fortement lié aux propriétés des matériaux qui constituent son enveloppe. Il est à souligner que l'isolation et l'inertie thermique sont des paramètres importants pour la performance énergétique du bâtiment.

Ainsi, intégré dans les matériaux de construction, on peut penser que les MCP doivent permettre d'atténuer les variations de température dans la paroi et l'ambiance intérieure. Partant de l'échelle du matériau à celle de la paroi, de nombreuses études ont été réalisées sur cette application dans le bâtiment.

En effet, les études pionnières ont permis une évolution du conditionnement des matériaux à changement de phase pour un usage sain et mieux adapté ; partant de l'échelle microscopique à celle macroscopique. Cette évolution permet actuellement une intégration de MCP dans l'enveloppe du bâtiment sous plusieurs formes (poudre, poche, couche, lame, Etc.) et plusieurs échelles. Actuellement des études sont encore menées pour évaluer l'évolution des caractéristiques (thermiques, physiques, hygriques, Etc.) des matériaux composites incorporant un MCP et leur impact sur l'ambiance intérieure du bâtiment.

1.3.2.1 Echelle du matériau

Plusieurs travaux montrent l'intérêt de l'intégration de MCP dans la matrice des matériaux de construction. Concernant les matériaux classiques (enduit, plâtre, Etc.), on peut citer les travaux suivants : (Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014), (Tittlein, Gibout, Franquet,

Zalewski, et al. 2015), (Kodjo 2019), Etc. Pour les bétons biosourcés avec MCP, on ne peut trouver, pour le moment, que ces travaux : (Guichard 2013), (Bahrar 2018), (Abdellatef et Kavagic 2020) et (Sawadogo et al. 2022).

A. Intégration du MCP dans un matériau de construction classique

En 2013, Guichard a étudié l'impact de l'intégration des MCP dans la laine de verre pour l'isolation d'un toit sur le confort et l'inertie thermique du bâtiment en climat tropical humide (Guichard 2013). Cette étude a montré que le panneau de MCP permet d'améliorer le confort thermique avec une réduction de la température intérieure de l'ordre 2,5 °C par rapport à la solution sans matériau à changement de phase.

Les propriétés thermophysiques d'un mortier de ciment contenant un MCP microencapsulé ont été étudiées par Franquet et collaborateurs (Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014). Pour ce faire, les auteurs ont mené une étude expérimentale et réalisé une modélisation. A travers ces travaux, ils ont proposé et validé un modèle permettant de déterminer les propriétés thermophysiques ainsi que le comportement d'un matériau composite avec MCP.

En 2019, Kodjo a étudié l'impact de l'incorporation d'un MCP sur les propriétés thermomécaniques d'un mortier de ciment (Kodjo 2019). Pour ce faire, ce dernier procède dans un premier temps à la caractérisation thermique du composite à l'aide de la plaque chaude gardée qui lui a permis de démontrer que l'ajout du MCP permet de renforcer les performances thermiques du mortier. Puis, il a effectué une étude du comportement mécanique du composite qui lui a permis de démontrer que les performances mécaniques de ce matériau se dégradent avec l'ajout du MCP.

Plus récemment, Wang et collaborateurs ont travaillé sur un composite céramique avec MCP. Ils ont étudié l'influence de l'ajout et de l'augmentation de la proportion de MCP (MEPCM- Microencapsulated phase change material) dans le composite céramique avec de la poudre de verre GF (Z. Wang et al. 2022). En conclusion de ses études, ils démontrent que le composite avec MCP (GF : MEPCM) présente de bonnes performances thermiques comme montré sur la [Figure I-28] ; avec une conductivité thermique égale à 2,853 W/(m.K) soit 3,67 fois plus élevée que celle du composite céramique. Alors que la chaleur latente du composite avec MCP restait toujours autour de 99,7% après 500 cycles de fusion/solidification avec une valeur variant entre 20.5 J/g et 30 J/g suivant la proportion de MCP

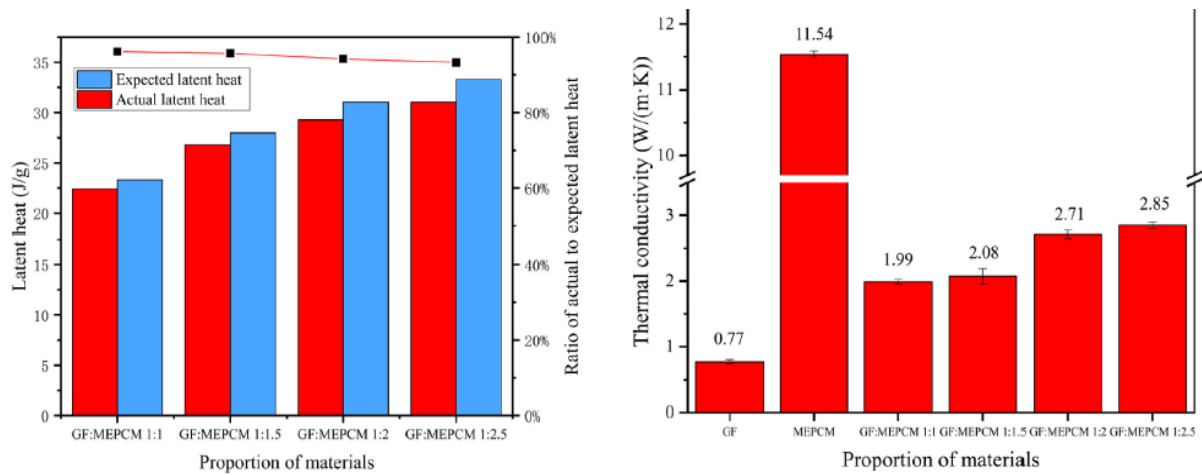


Figure I-28 : Comparaison de la chaleur latente prédite à celle obtenue sur le composite GF:MEPCM (à gauche) et de la comparaison de la conductivité thermique (à droite) du composite GF:MEPCM par rapport au matériau de base (GF) au MEPCM (à droite) (Z. Wang et al. 2022).

B. Intégration du MCP dans un béton biosourcé

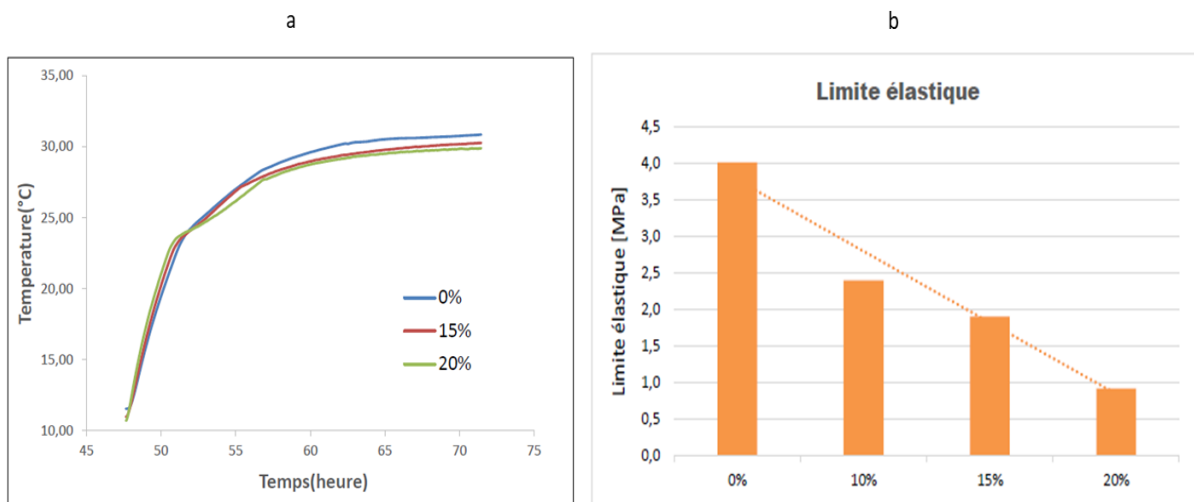


Figure I-29 : Température de surface de l'échantillon du côté du caisson chaud dans l'intervalle de changement de phase pour différentes proportions de MCP (a) et limite élastique en fonction du taux de MCP ajouté au mortier (b)(Bahrar 2018).

En 2018, Bahrar a étudié l'évolution du stockage de chaleur d'un mortier textile avec le MCP présenté dans le [Tableau I-8] (Bahrar 2018). En considérant les flux de chaleur mesurés dans l'intervalle de changement de phase du MCP, l'auteur a constaté que la quantité de chaleur stockée dans le composite augmente en fonction du ratio de MCP. Ce constat est concrétisé par l'écart de température en surface du mortier avec et sans MCP [Figure I-29 a]. De plus, la

conductivité thermique diminue avec la quantité de MCP incorporée dans le mortier : elle varie de 0,901 à 0,629 W/(m.K) (respectivement pour les mortiers avec 10% MCP et 20% MCP). Enfin, en étudiant le comportement mécanique en fonction de différentes compositions, il a montré que plus la quantité de MCP est élevée, plus la limite du domaine élastique diminue, comme on peut le voir sur la [Figure I-29 b].

En 2020, Abdellatef et Kavgic ont travaillé sur huit formulations d'un béton de chanvre intégrant deux types de matériau à changement de phase (Nextek et Micronal) avec deux formules différentes pour chacun d'eux : Nextek 18D ($T_f = 18\text{ °C}$), Nextek 24D ($T_f = 24\text{ °C}$), Micronal PCM[®] DS 5040 X ($T_f = 23\text{ °C}$) et Micronal PCM[®] DS 5038 X ($T_f = 24\text{ °C}$) (Abdellatef et Kavgic 2020). Sur les huit formulations, ils ont effectué la caractérisation microstructurale pour comprendre les paramètres qui affectent la performance des matériaux développés. Puis, ils ont étudié les propriétés thermophysiques des échantillons de béton de chanvre pour comprendre l'impact des différents MCP ; en comparaison à un béton de chanvre ordinaire. Enfin, ils réalisent une simulation numérique du comportement d'une paroi de bâtiment. Toutes ces études ont abouti à plusieurs résultats parmi lesquels :

- ✓ La [Figure I-30] présente les résultats obtenus de l'analyse de la microstructure. Ces derniers montrent que par rapport à la nouvelle génération de Micronal, l'ancienne génération ne s'intégrait pas très bien dans la matrice du béton de chanvre.

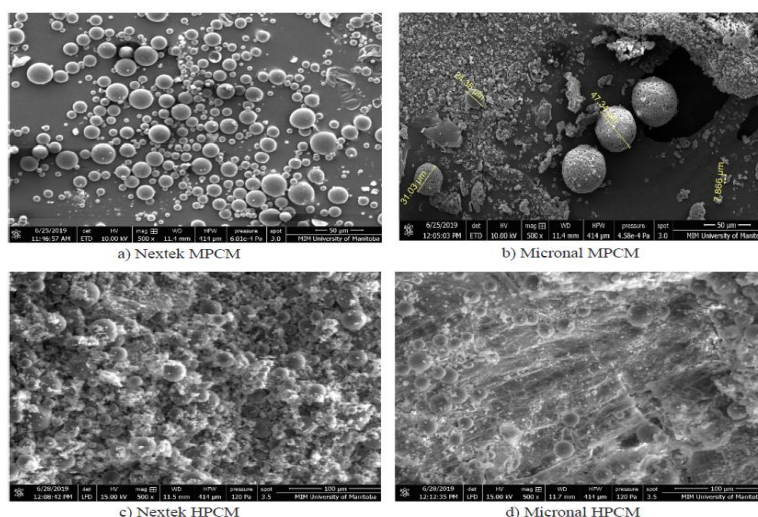


Figure I-30 : Vues microscopiques des deux MCP utilisés et celles des bétons de chanvre incorporant ces MCP, (Abdellatef et Kavgic 2020).

- ✓ De plus, à partir des résultats présentés sur la [Figure I-31], les auteurs montrent que l'incorporation du MCP dans le béton de chanvre entraîne un stockage par chaleur latente et par conséquent une augmentation de la capacité thermique du composite est remarquée. Ces résultats montrent ainsi l'intérêt potentiel du MCP dans un matériau de construction biosourcé.

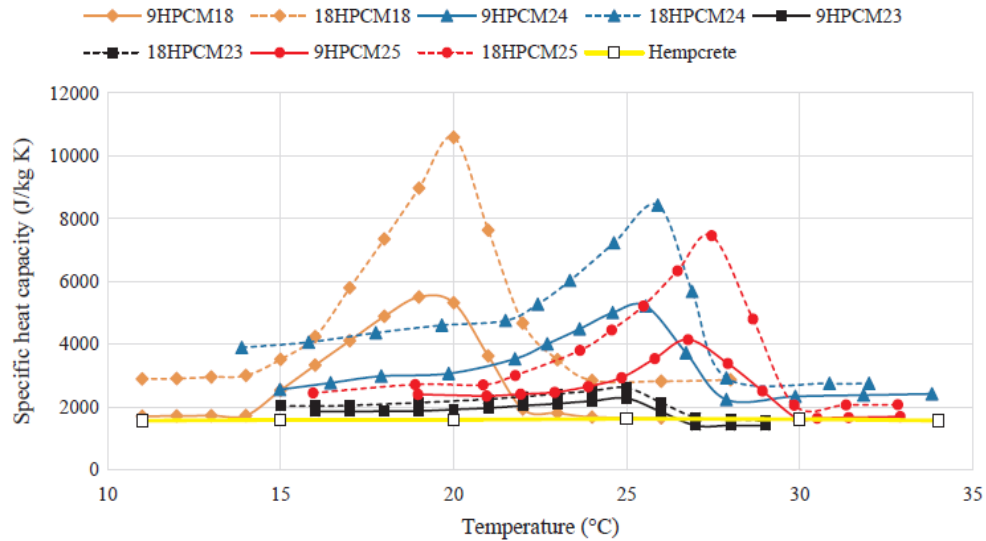


Figure I-31 : Capacité calorifique des échantillons de béton de chanvre avec MCP (HPCM) (Abdellatef et Kavgic 2020).

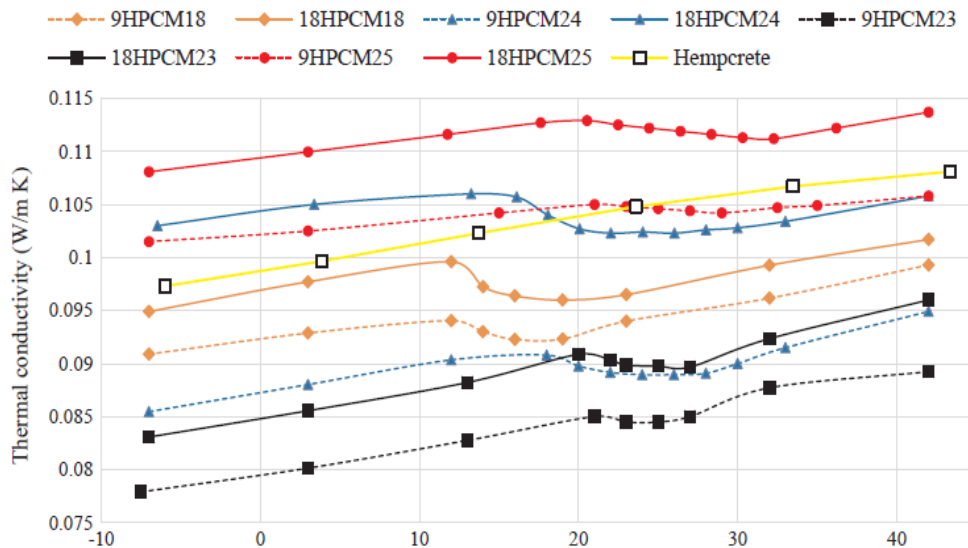


Figure I-32 : Conductivité thermique des échantillons de béton de chanvre avec et sans MCP (HPCM et Hempcrete) (Abdellatef et Kavgic 2020).

- ✓ Aussi, à partir de la [Figure I-32], ils remarquent que la conductivité thermique du béton de chanvre dépend : de la formulation, du type de MCP incorporé et de la température moyenne de mesure. Entre 0 °C et 40 °C, la conductivité varie de 0.08 à 0.113 W/(m.K) pour les échantillons étudiés. En plus, il est intéressant de noter que la conductivité thermique du béton de chanvre avec MCP ne varie pas linéairement en fonction de la température, contrairement à celle du béton sans MCP.
- ✓ Enfin, les études numériques montrent que l'ajout d'un MCP dans le béton de chanvre permet des économies d'énergie (chauffage et refroidissement) de 1 à 36% en fonction du type de MCP utilisé.

Plus récemment, Sawadogo et collaborateurs ont travaillé sur la caractérisation d'un béton de chanvre intégrant un MCP biosourcé pour le stockage passif de chaleur dans le bâtiment (Sawadogo et al. 2022). Ils utilisent des chènevottes imprégnées sous vide d'acide caprique avec un taux d'incorporation de 53%. Les résultats de l'étude thermique montrent que le béton de chanvre avec MCP a une bonne capacité de régulation thermique, résultats confirmés par des tests sur une chambre climatique. En revanche, pour les propriétés hygriques, on note une diminution de la MBV qui passe de 3,03 g/(m². %RH) pour le béton de chanvre de référence (sans MCP) à 2,23 g/(m². %RH) pour le béton de chanvre avec MCP.

1.3.2.2 Echelle de la paroi et du local

En 2007, Zhang et collaborateurs ont réalisé une analyse des principes opérationnels de l'application des MCP dans l'enveloppe du bâtiment (Zhang et al. 2007). A partir de cette analyse, ils confirment que les parois avec MCP (sol, plafond, Etc.) peuvent être efficaces en période de chauffage comme pour celles de refroidissement. Ces parois ont aussi la capacité de stocker du rayonnement solaire pouvant être utilisé pendant les heures moins chaudes.

Dans le cadre de la collaboration entre le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), le Centre de Recherche Métallurgique (CRM), le Centre scientifique et technique de l'industrie textile belge (CENTEXBEL) et le Centre de ressources technologiques en chimie (CERTTECH), une étude de l'impact d'un enduit contenant un MCP sur la température intérieure a été réalisée par de Barquin et Flamant (de Barquin et Flamant 2010). Pour cette étude, ils utilisent des cellules jumelées de 9 m² de surface chacune ; dont l'une est revêtue à l'intérieur d'un enduit de finition mural de 1,5 cm d'épaisseur contenant 30% (en masse) de MCP et l'autre

d'un enduit traditionnel (sans MCP). Les résultats expérimentaux montrent que l'écart de température de surface entre les parois revêtues de l'enduit avec MCP et celles sans MCP est de l'ordre de 3 °C. La [Figure I-33], ci-dessus, présente l'évolution de la température intérieure des deux cellules étudiées au cours d'une journée d'été ensoleillée. On peut noter une différence de l'ordre de 1,5 °C entre les températures maximales journalière des deux cellules.

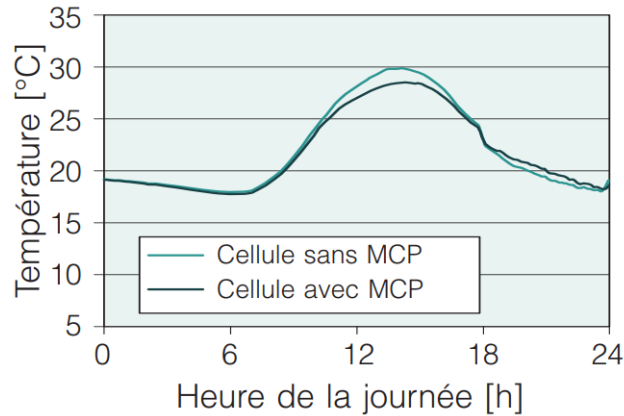


Figure I-33 : Evolution de la température dans les cellules jumelées au cours d'une journée d'été ensoleillée (de Barquin et Flamant 2010).

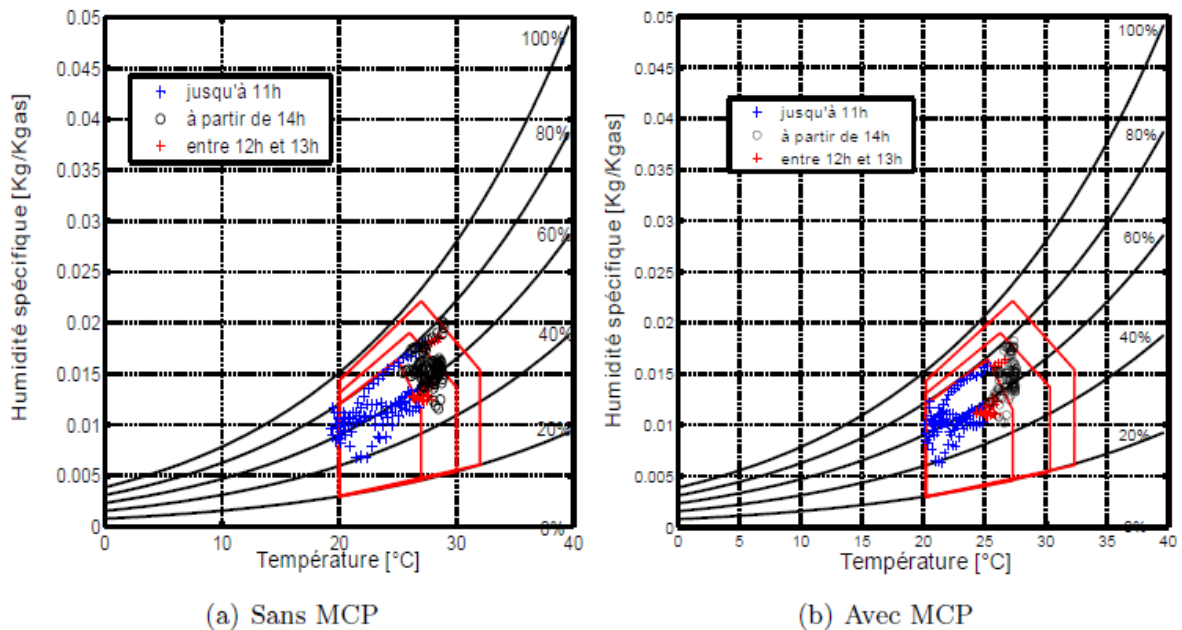


Figure I-34 : Diagramme psychométrique de confort de la cellule avec et sans MCP (Guichard 2013).

Guichard a aussi évalué l'impact de l'ajout d'un panneau MCP en toiture (la laine de verre couplé à un panneau MCP (DuPont™ Energain®)) sur le confort d'un bâtiment (Guichard

2013). Les résultats obtenus montrent que l'ajout du MCP à la toiture permet de renforcer l'inertie thermique et d'améliorer le confort dans le bâtiment. En comparant la toiture avec MCP à celle sans MCP, une réduction de l'ordre de 2,5 °C de la température intérieure est remarquée. D'autre part, afin de quantifier le confort (pourcentage de points dans une zone de confort et heures de confort), il a établi les deux diagrammes psychométriques présentés sur la [Figure I-34]. Le résultat montre que l'ajout du MCP permet d'améliorer de 15 heures le confort de l'utilisateur sans qu'il ait besoin d'utiliser des moyens de rafraîchissement (passage du nombre d'heure de confort de 83 h pour le cas avec MCP à 68 h pour le cas sans MCP).

Dans la même optique, Madjoudj a démontré que l'intégration du MCP dans les parois permet d'améliorer les performances énergétiques globales et de réduire l'empreinte énergétique du bâtiment (Madjoudj 2016).

Plus récemment, l'impact de l'application et de l'épaisseur (de 1 cm à 10 cm) du matériau à changement de phase (MCP) sur les murs et le toit d'une centrale solaire, en tenant compte de l'intensité solaire sous des conditions climatiques d'Arabie saoudite, a été étudié et discuté par Rawa et collaborateurs (Rawa et al. 2022). Le graphique de gauche de la [Figure I-35] montre l'impact de l'épaisseur du MCP sur l'économie d'énergie. On peut noter que plus l'épaisseur du MCP augmente, plus le gain est élevé. Cependant, il est intéressant de noter qu'au-delà de 5 cm d'épaisseur, les effets positifs du MCP sont réduits.

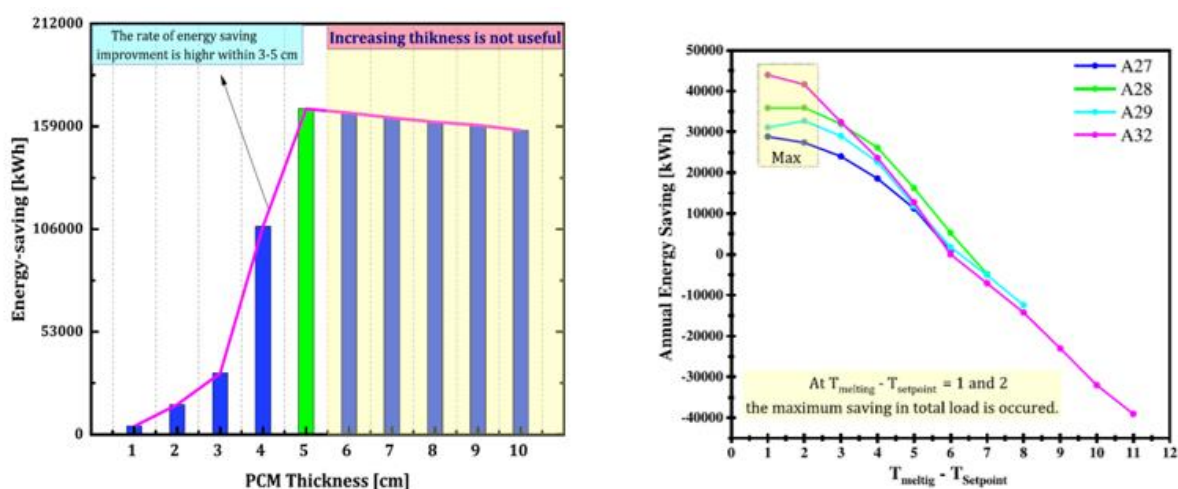


Figure I-35: Impact de l'épaisseur du MCP sur l'économie d'énergie (Rawa et al. 2022) à gauche ; Impact de des MCP utilisés sur l'économie d'énergie (Almitani et al. 2022) à droite.

Almitani et collaborateurs ont étudié l'influence de quatre MCP différents (A27, A28, A29 et A32) sur les économies d'énergie dans le bâtiment (Almitani et al. 2022). Les MCP utilisés ont des caractéristiques thermophysiques presque identiques mais des températures de fusion différentes (entre 27 et 32 °C). Le graphique de droite de la [Figure I-35] montre l'impact de l'influence de l'écart entre la température de fusion du MCP (T_{melting}) et la température de consigne (T_{setpoint}) sur les économies d'énergie dues aux différents MCP, sous des conditions climatiques d'Arabie saoudite. Le résultat montre que le choix de cet écart est très important pour optimiser la performance du MCP. Dans le cas de cette étude, la meilleure performance est obtenue pour un écart inférieur à 2 °C.

Le [Tableau I-9] ci-après, présente une synthèse des propriétés thermiques des matériaux de construction incorporant un MCP. Il ressort de cette synthèse que l'intégration du MCP dans la matrice renforce la capacité de stockage de chaleur du matériau et par conséquent augmente inévitablement l'inertie thermique du bâtiment.

	Matériaux	ρ (kg/m ³)	T _F du composite (°C)	λ (W/(m.K))	C _p (J/(kg.K))	L _F (J/kg)
(Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014)	Mortier (Ciment + Sable)	2 001	-	0,65 ± 0,02	925 ± 46	-
	Mortier + 12,4% de Micronal PCM® DS 5001 X	1 412	25,5	0,55 ± 0,02	C _S = 1 119 C _L = 1 080	11 590 ±1 950
(Joulin et al. 2014)	Mortier (Ciment + Sable)	2 001	-	0,65 ± 0,02	925 ± 46	-
	Mortier + 19% de Micronal PCM® DS 5001 X	1 248	25,5	0,36 ± 0,03	C _S = 1 255 C _L = 1 238	19 520 ±1 952
(Zalewski et al. 2014)	Plâtre classique	1 012,6	-	0,23	1 063	-
	Plâtre + Micronal PCM® DS 5001 X	1 672	25,5	0,53 ±0,01	C _S = 963,2 C _L = 953,9	7 992,9
(Bahrar 2018)	INTERTEK 23 P (MCP)	-	23	-	-	160
	Textile Mortier + 20% INTERTEK 23 P	350	-	0,56	C _S = 3 571 C _L = 2 224	66 060
(Kodjo 2019)	Mortier (Ciment+ Sable)	2 426,92	-	1,65	1 010	-
	Mortier + 10% de Micronal PCM® DS 5039 X	2 172,73	-	1,38 ± 0,041	C _S = 2 042 C _L = 1 442	10 721
(Mathis 2019)	MCP Purtemp® 23	-	22,3	-	-	199
	Fibre de bois avec poche de MCP Purtemp® 23	893	-	0,20 ± 0,02	C _S = 3 134 C _L = 2 832,5	71 000
(Abdellatef et Kavagic 2020)	Micronal PCM® D S 5038 X	-	25	-	-	97
	Béton de chanvre + 18% Micronal PCM® DS 5038 X	412	-	0,11	7 457	98 000

Tableau I-9 : Synthèse bibliographique des caractéristiques des différents MCP appliqués dans le bâtiment et certains matériaux intégrant un MCP.

Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de faire une synthèse bibliographique des travaux menés autour du béton de chanvre et des matériaux à changement de phase (MCP) dans le bâtiment au cours de ces dernières années.

La synthèse des travaux récents autour du béton de chanvre, montre d'une part que la structure de ce matériau est constituée d'un réseau poreux et que ses propriétés physiques et mécaniques (porosité, teneur en eau, masse volumique et résistance en compression) varient en fonction de la formulation et du rapport granulats/liant. Ainsi, ces études permettent de conclure qu'il est possible d'améliorer la résistance mécanique du béton de chanvre en choisissant judicieusement le liant sans sacrifier pour autant ses autres propriétés.

Ces études montrent également que les propriétés thermiques du béton de chanvre évoluent en fonction des conditions hygrothermiques (T° et humidité) et dépendent eux aussi de la nature des composants. Il ressort que ce dernier présente une faible conductivité thermique, une diffusivité thermique faible et une forte capacité thermique. En revanche, les récents travaux portant sur les propriétés hydriques du béton de chanvre mettent en évidence son excellente capacité de stockage d'humidité en comparaison à d'autres matériaux plus conventionnels. De plus, la masse volumique relativement faible du béton de chanvre favorise sa capacité de transfert d'humidité et son pouvoir isolant. Aussi, les études portant sur sa capacité tampon hydrique montrent qu'il permet de réguler les variations de l'humidité intérieure du bâtiment.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons une large série d'études sur les matériaux à changement de phases. Ces études permettent d'avoir un aperçu de leurs compositions, leurs conditionnements et les avantages de leurs incorporations dans les matériaux de construction. Pour valoriser la capacité de stockage de chaleur des MCP, un large éventail de travaux concernant leurs applications existe dans différents domaines. Dans le domaine du bâtiment qui nous intéresse, les études autour de l'intégration des MCP dans l'enveloppe se font sur un large champ, allant de l'échelle du matériau à celle de la paroi et/ou du bâtiment. L'intégration d'un matériau à changement de phase dans un composite ou dans une paroi de bâtiment permet d'augmenter considérablement son inertie thermique, grâce au

stockage de chaleur par chaleur latente. Enfin, l'ajout du MCP contribue ainsi au maintien d'une ambiance thermique confortable à l'intérieur d'un local.

En somme, le béton de chanvre, bien qu'étant un excellent régulateur d'humidité et ayant une faible conductivité thermique, ne peut pas assurer le confort thermique tout au long de l'année. Aussi, la capacité de stockage d'énergie du MCP représente un grand atout pour éviter notamment les surchauffes pendant la période estivale.

Cependant, les études menées jusqu'à présent sur le béton de chanvre incorporant un MCP se limitent majoritairement à l'évolution des propriétés de ce dernier et de sa capacité de régulation thermique intérieur. Il est donc nécessaire d'entreprendre une campagne expérimentale et des analyses numériques à plusieurs échelles pour contribuer à améliorer la performance de ce nouveau composite. Dans la suite, nous allons étudier les performances mécanique et hygrothermiques des composites (béton et enduit de chanvre) à l'échelle du matériau. Ses performances hygrothermiques à l'échelle d'un local seront ensuite évaluées à l'aide d'outils de simulation numérique.

Chapitre II Caractérisation des propriétés mécaniques et thermiques des matériaux étudiés

Dans le cadre de l'appel à projet A2U (Université d'Artois « Artois », Université de Picardie Jules Verne « UPJV » et Université du Littoral Côte d'Opale « ULCO ») de nouveaux bétons et enduits de chanvre intégrant différentes proportions d'un même matériau à changement de phase ont été conçus au Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'UPJV. Les détails de composition et de mise en œuvre des matériaux avec ou sans MCP sont présentés dans la première partie de ce chapitre.

Certains auteurs montrent qu'une évolution des propriétés s'observe facilement sur le béton et l'enduit de chanvre dès modification de leur composition. De ce fait, la deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques des bétons de chanvre avec et sans MCP en compression simple dans la direction perpendiculaire et celle parallèle au sens de compactage. Ces études mécaniques ont été réalisées au sein du LTI.

Parmi ces mêmes références bibliographiques, il est également démontré que le béton de chanvre a une faible inertie thermique alors que l'incorporation de MCP dans l'enveloppe d'un bâtiment permet d'assurer un meilleur confort hygrothermique pour les occupants. Pour ce faire, la dernière partie de ce chapitre fera état de la caractérisation expérimentale et l'évaluation numérique des propriétés thermiques des bétons et enduits de chanvre avec et sans MCP. Les essais thermiques ont été réalisés au Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnemental (LGCgE) de l'Université d'Artois.

II.1 Matériaux étudiés

Pour cette étude, nous avons travaillé sur des bétons et enduits de chanvre dont les applications peuvent concerner aussi bien la construction neuve que la rénovation. D'une part, les différentes formulations de bétons de chanvre étudiées dans ce travail ont été déduites de celle déjà mise en œuvre dans le laboratoire dans le cadre d'une autre étude sur une paroi à l'échelle 1. La formulation de base contient : 17,9% de chènevotte, 33% de chaux Tradical PF70 (Béton de chanvre) et 49,1% d'eau. Elle a un rapport eau/liant (E/L) assez élevé de 1,49 permettant une bonne ouvrabilité du mélange ; le pouvoir d'absorption d'eau de la chènevotte étant très élevé.

D'autre part, les différentes formulations des enduits chanvre/chaux étudiées ont été déterminées en se basant sur les formulations d'enduit fournies par plusieurs auteurs tels : Collet, Chamoin et Evrard (Collet 2004; Evrard 2008; Chamoin 2010). La formulation initiale contient : 8,13% de chènevotte, 55,43% de chaux Tradical PF70 et 36,44% d'eau avec un rapport eau/liant (E/L) de 0,66 (Chamoin 2010). Là encore, c'est ce rapport E/L qui permet la meilleure ouvrabilité du mélange, compte tenu de la faible quantité de chanvre incorporée.

Dans les deux cas, nous avons ajouté diverses proportions d'un matériau à changement de phase (ou MCP) pour étudier son influence sur les performances mécaniques et thermiques des composites. On utilise le Micronal PCM[®] DS 5001 X encapsulé dans des microbilles (dimension environ de 5 μ m et de couleur blanche).

II.1.1 Formulation

Au vu des résultats de plusieurs études, la quantité et la qualité des composants (liant, chènevotte et eau) des bétons et enduits de chanvre influencent considérablement leurs propriétés hygrothermiques et mécaniques. Pour l'élaboration des matériaux intégrant des MCP, certaines contraintes doivent être prises en compte pour garantir l'ouvrabilité et la qualité du mélange. On sait qu'en augmentant la quantité de liant dans la formulation, on augmente automatiquement la conductivité thermique et la résistance mécanique du béton.

II.1.1.1 Calcul des proportions des composants

Tous les échantillons ont été fabriqués avec la même masse sèche totale que celles des échantillons de référence, et le pourcentage de MCP indiqué dans la désignation des

échantillons correspond à cette masse sèche totale. Les proportions de liant et de chènevotte d'une formulation avec MCP sont donc calculées à partir des proportions massiques des échantillons de référence et le pourcentage de MCP ajouté comme suit :

$$m_{B_{Composant}} = m_{A_{Composant}} (1 - \%MCP) \quad \text{II-1}$$

Avec : $m_{A_{composant}}$: masse du composant dans l'échantillon de référence,

$m_{B_{composant}}$: masse du même composant calculé pour l'échantillon B,

%MCP : pourcentage de MCP de la formulation du matériau B.

Le matériau à changement de phase vient donc se substituer dans les mêmes proportions à la chènevotte et au liant.

II.1.1.2 Béton de chanvre

Les formulations présentées ici ont été développés, dans le cadre de la collaboration du LTI et du LGCgE, dans le cadre de l'appel à projets A2U (Artois, ULCO et UPJV). Les matériaux étudiés sont composés de : Tradical PF70 (75% de chaux hydraulique, 15% de chaux aérienne et 10% de pouzzolane), de chènevottes (Chanvribat), d'eau et du matériau à changement de phase Micronal MCP® DS 5001 X.

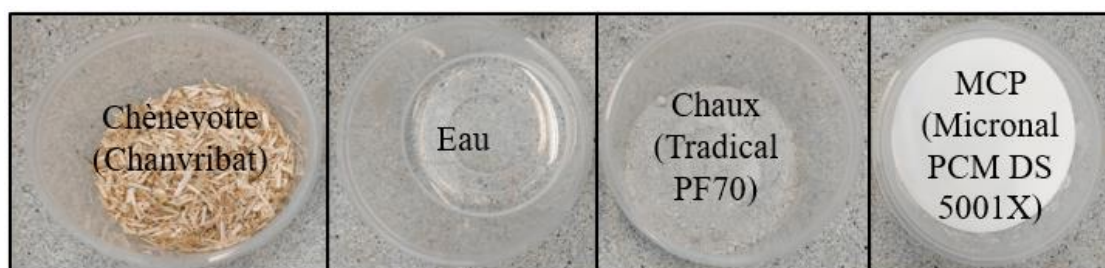


Figure II-1 : Composants des bétons et enduits étudiés.

	Matériaux	ρ (kg/m ³)	T _F (°C)	λ (W/(m.K))	L _F (kJ/kg)
Chanvre	Chanvribat	100	-	0,048	-
Chaux	Tradical PF70	1220	-	0,189	-
MCP	Micronal PCM® DS 5001 X	1 000	26	0,55	110

Tableau II-1 : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la fabrication des échantillons.

La [Figure II-1] présente les matériaux utilisés et le [Tableau II-1] présente leurs caractéristiques. Trois formulations ont été mises en œuvre : une formulation de base (0%MCP), et deux autres avec MCP, respectivement 20% et 40%. Rappelons que ces pourcentages sont calculés par rapport à la masse totale sèche de la formulation de base.

Le [Tableau II-2] présente ces différentes formulations ainsi que les masses volumiques à l'état frais des échantillons. Les ratios sont ici données par rapport à la masse totale des constituants, eau comprise. On peut voir qu'on a maintenu le rapport massique liant /chènevotte (L/C) inchangé et égal à 1,85 pour faciliter la comparaison. Alors que le rapport E/L augmente (de 1,49 à 1,89) en fonction de la quantité de MCP, pour assurer une meilleure homogénéisation du mélange et une meilleure ouvrabilité.

	Chanvre (%)	PF 70 (%)	Eau (%)	MCP (%)	E/L	L/C	ρ fraîche (kg/m ³)
Béton de chanvre + 0%MCP (BC+0%MCP)	17,9	33,0	49,1	0	1,49	1,85	686
Béton de chanvre + 20%MCP (BC+20%MCP)	15,1	27,9	46,2	11	1,65	1,85	781
Béton de chanvre + 40%MCP (BC+40%MCP)	12,2	22,6	42,0	23	1,89	1,85	1000

Tableau II-2 : Formulations de béton de chanvre avec et sans MCP utilisées pour les études.

II.1.1.3 Enduit de chanvre

Pour l'enduit, les composants sont les mêmes que pour le béton de chanvre : chaux (Tradical PF70), chanvre (Chanvribat) et MCP (Micronal MCP® DS 5001 X). Quatre formulations ont été retenues pour l'étude de cet enduit : une formulation de base (0%MCP) et trois avec MCP : 11%, 23% et 40% par rapport à la masse totale sèche de la formulation de base.

Une formulation supplémentaire avec 60% de MCP a été tentée, mais abandonnée en raison de divers paramètres difficilement compatibles avec une mise en œuvre que sont : l'ouvrabilité, la vitesse de séchage, le temps de prise et l'adhésion à la surface des bétons. Sur le [Tableau II-3] présentant les différentes formulations ainsi que leur masse volumique fraîche, on peut voir que le rapport L/C a été maintenu constant et égal à 7,11 comme dans le cas du béton de

chanvre, mais avec une valeur beaucoup plus importante compte tenu de la différence d'application.

	Chanvre (%)	PF70 (%)	Eau (%)	MCP (%)	E/L	L/C	ρ fraîche (kg/m ³)
Enduit de chanvre + 0%MCP (HLCoat + 0%MCP)	8,13	55,43	36,44	0	0,66	7,11	1549,72
Enduit de chanvre + 11%MCP (HLCoat + 11%MCP)	6,16	44,14	39,79	9,91	0,95	7,11	1468,02
Enduit de chanvre + 23%MCP (HLCoat + 23%MCP)	4,74	32,38	41,98	20,91	1,65	7,11	1349,80
Enduit de chanvre + 40%MCP (HLCoat + 40%MCP)	3,54	26,66	42,06	29,75	1,86	7,11	1168,37

Tableau II-3 : Formulations d'enduit de chanvre avec et sans MCP utilisées pour les études.

II.1.2 Fabrication des échantillons

Pour le mélange des différents composants et la préfabrication des éprouvettes, il a fallu déterminer la quantité des matières premières à mettre en œuvre, en fonction notamment des rations évoquées précédemment, et définir le mode opératoire pour réaliser le mélange et remplir les moules pour les différents essais. Quant au matériau à changement de phase (MCP), il est constitué de microbilles de paraffine dans un liant acrylique : inertes, très résistantes et étanches à l'eau.

II.1.2.1 Processus de fabrication des échantillons

En se basant sur les formulations présentées dans les tableaux des sections [II.1.1.2 et II.1.1.3], on a élaboré les éprouvettes pour les caractérisations thermiques, mécaniques et hydriques. La fabrication de ces éprouvettes de bétons et enduits de chanvre s'est faite en suivant les 3 étapes présentées sur la [Figure II-2] : l'hydratation du liant, l'ajout des particules de chènevottes et l'ajout du MCP.

- ✓ Etape 1 - hydratation du liant : le Tradical PF70 et l'eau sont versés dans une cuve puis malaxés jusqu'à homogénéisation du mélange,

- ✓ Etape 2 - ajout des particules : la chènevotte est ajoutée dans le mélange obtenu à l'étape 1 et le tout est malaxé jusqu'à ce que les particules soient complètement enrobées du liant hydraté,
- ✓ Etape 3 - ajout du MCP : les microbilles du matériau à changement de phase sont ajoutées dans le mélange obtenu à l'étape 2 ; le malaxage se poursuit jusqu'à homogénéisation parfaite.

Pour cette fabrication, il n'a pas été nécessaire de pré-mouiller les particules avant l'étape 2. Le malaxage s'est fait manuellement durant 3 à 5 min pour ne pas endommager la chènevotte. Aussi, l'hydratation du liant (étape 1) avant ajout des chènevottes permet d'assurer une bonne ouvrabilité au mélange durant l'étape 2. Alors qu'après ajout du Micronal PCM® DS 5001 X, une quantité d'eau supplémentaire est nécessaire pour assurer au mélange de l'étape 3 : une hydratation, une homogénéisation et une ouvrabilité ; ce qui se traduit par une augmentation du rapport E/L après ajout du MCP.

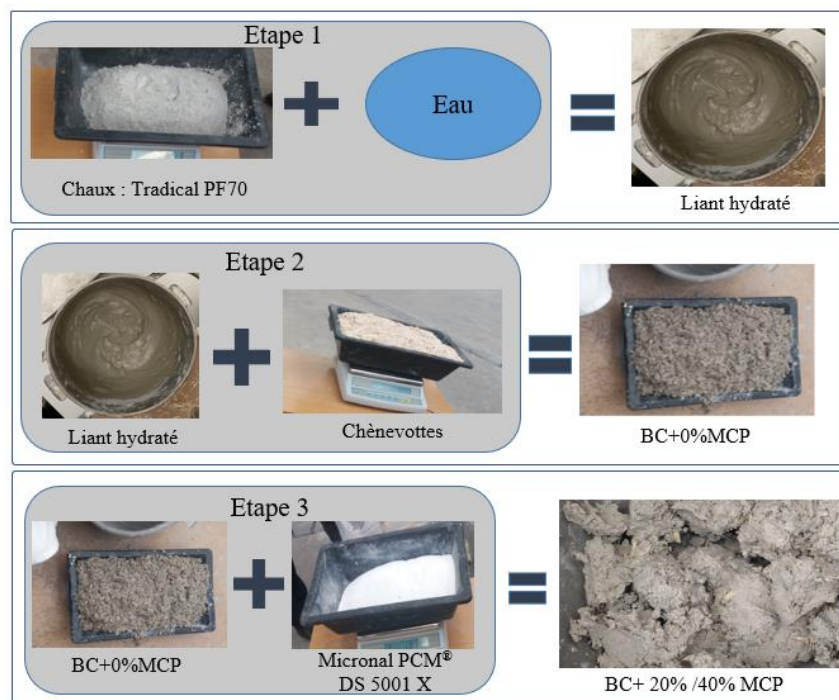


Figure II-2 : Etapes de fabrication des échantillons étudiés : exemple du BC+%MCP.

Après malaxage jusqu'à homogénéisation, le béton est incorporé dans différents moules en fonction des exigences des essais expérimentaux. Et, afin d'éviter les zones de vide, un léger compactage par couche est réalisé à la main et à l'aide d'un tasseau en bois, comme montré sur

la [Figure II-3]. Enfin, les échantillons sont placés dans un local régulé à 20 °C et 50% d'humidité relative.

Trois à 5 jours après fabrication, les échantillons sont démoulés et maintenus dans le local climatisé (23 °C et 50% HR) pendant trois mois pour assurer une carbonatation suffisante du liant avant le début des essais.



Figure II-3 : Moulage, tassage et exposition des échantillons étudiés.

II.1.2.2 Observations après ajout du MCP

Pendant et après la fabrication des échantillons d'enduits et de bétons, on remarque tout d'abord que la coloration des matériaux devient plus blanche au fur et à mesure qu'on augmente la quantité de MCP.

D'autre part, plus la quantité de MCP augmente, plus le besoin d'eau pour le malaxage et l'hydratation du liant augmente. Entre la formulation de base et celle avec 40% de MCP, le rapport E/L est multiplié par 1,3 pour le béton de chanvre et respectivement par 2,8 pour l'enduit.

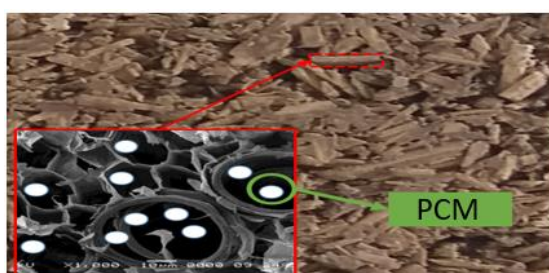


Figure II-4 : Infiltration des MCP dans les pores de chènevottes.

Pour le béton de chanvre, on observe que le mélange devient de plus en plus difficile à malaxer au fur et à mesure qu'on augmente la quantité de MCP. L'ajout des microbilles de Micronal MCP® DS 5001 X augmente la part de particules fines dans le mélange liant/chènevotte, ce qui nécessite plus d'eau pour le malaxage. De plus, ces microbilles peuvent

s'insérer dans les pores des granulats [Figure II-4], ce qui contribue à l'augmentation de la masse volumique du béton frais. Dans toutes les configurations, les bétons de chanvre avec et sans MCP se démoulent facilement au bout de 5 jours après fabrication.

Contrairement au béton de chanvre, les formulations d'enduit de chanvre avec MCP sont plus faciles à malaxer, mais la part d'eau à ajouter en présence de MCP est plus grande que dans le cas des bétons. A noter que dans les mélanges pour enduit, la proportion de chènevotte (C) est beaucoup moins importante ($L/C = 7,11$) que pour les bétons ($L/C = 1,85$). Ce qui peut expliquer le fait que la masse volumique de l'enduit frais diminue avec l'ajout de MCP, c'est-à-dire que la part de microbilles remplissant les pores des granulats est moins importante. D'autre part, qu'importe le pourcentage de MCP, les enduits adhèrent facilement à la surface rugueuse du béton de chanvre, d'un béton de miscanthus ou d'un béton cellulaire. La [Figure II-5] présente l'exemple du béton de chanvre enduit avec différentes formulations d'enduit de chanvre avec MCP. Cependant, les enduits de chanvre avec une quantité de MCP inférieure à 40% sont démoulables au bout de 5 à 7 jours après la fabrication alors que ceux contenant plus de MCP ($\geq 40\%$) doivent être maintenus plus longtemps dans le moule. Toutefois, un test d'application montre qu'au bout de 2 jours les enduits appliqués à la surface d'un autre béton sont bien stabilisés et secs.

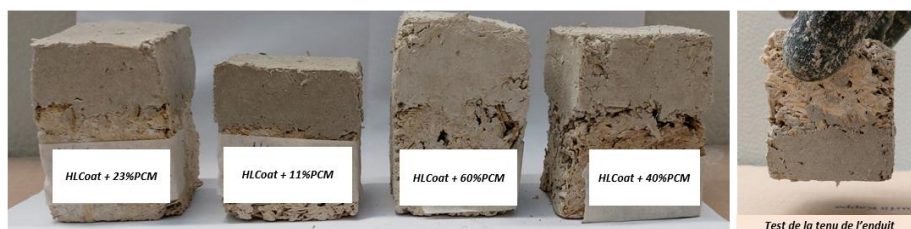


Figure II-5 : Tenue des enduits sur un support en béton de chanvre.

Dans la suite du rapport, la nomination BC+%MCP sera utilisée pour « bétons de chanvre avec et sans MCP » et celle HLCcoat+%MCP sera utilisée pour « enduits de chanvre avec et sans MCP ».

Dans les sections suivantes, on présentera une étude de l'évolution des propriétés mécaniques et thermiques de ces matériaux.

II.2 Caractérisation des propriétés mécaniques du béton de chanvre avec et sans

MCP

II.2.1 Mesure des propriétés mécaniques

II.2.1.1 Conditionnement des échantillons

Pour évaluer les propriétés mécaniques du béton de chanvre avec et sans MCP, nous avons fabriqué des éprouvettes de $7*7*7\text{ cm}^3$ découpées dans des échantillons de $28*7*7\text{ cm}^3$, le sens de compactage ayant été préalablement repéré. Le découpage a été réalisé à l'aide d'une scie à disque avec jet d'eau, 43 jours après fabrication, puis les échantillons ont été replacés dans le local conditionné en température et humidité durant 17 jours avant les premiers essais. La [Figure II-6] présente les outils utilisés pour le découpage et le stockage des éprouvettes.



Figure II-6 : Conditionnement des échantillons pour la caractérisation mécanique.

Pour les tests de compression mécanique, Tronet et collaborateurs montrent qu'il est judicieux d'utiliser deux pistons mobiles pour éviter le phénomène de dissipation des contraintes sur la hauteur des moules (Tronet et al. 2011). N'ayant pas de pistons mobiles, il n'a été gardé que les éprouvettes les plus homogènes pour les essais de compression, comme Youssef et autres (Youssef et al. 2015).

Les essais sont donc réalisés au moins 60 jours après fabrication des éprouvettes, sachant que la contrainte maximale et le module d'élasticité augmentent au cours de la prise du béton. Mais, qu'à partir du 28^{ème} jour, le béton de chanvre atteint 95% de ses propriétés finales (Cerezo 2005; Youssef 2017).

Les études bibliographiques montrent aussi que l'hétérogénéité du matériau et le processus de fabrication par plusieurs gâchages et tassage manuel peut être source d'écarts entre les résultats expérimentaux. Par conséquent, pour chaque formulation, les essais ont été réalisés sur trois éprouvettes issues de moules différents.

II.2.1.2 Expérimentation

A. Banc expérimental

Les essais de compression statique ont été réalisés à l'aide d'une presse électromécanique d'une capacité maximale de 50 kN : H50KS de TINIUS OLSEN. La [Figure II-7] présente la presse utilisée pour les essais. Cette presse est équipée d'un capteur de force, d'un capteur de déplacement et d'un écran de pilotage. Elle est aussi connectée à un ordinateur qui permet un enregistrement automatique de l'évolution de la force en fonction du déplacement de la presse à l'aide du logiciel QMAT (4.54-Dongle : 5493).

Cette presse est dotée de deux plaques : une fixée à la base de son squelette et l'autre mobile suspendue parallèlement à la première. La plaque fixe sert de support à l'échantillon alors que celle mobile exerce la force consignée sur l'éprouvette en l'augmentant progressivement et automatiquement tout au long de l'essai.



Figure II-7 : Presse électromécanique H50KS de TINIUS OLSEN.

B. Protocole d'essai

Après conditionnement des échantillons, nous avons réalisé les essais en compression en suivant le mode opératoire suivant :

- ✓ Centrer l'échantillon sur la plaque fixe,

- ✓ Suspendre la plaque supérieure au-dessus de l'échantillon pour qu'elle soit le plus proche possible de sa surface de contact avant de lancer l'essai,
- ✓ Remettre à zéro tous les paramètres à l'aide de l'écran de commande de la presse.
- ✓ Lancer l'essai directement à partir du logiciel QMAT : accéder à la zone de travail, ouvrir la routine d'essai de compression, renseigner les paramètres d'essai [Tableau II-4], démarrer l'essai et la prise de mesure.
- ✓ Faire une copie des données de l'essai sur Excel pour leur traitement.

	ρ (kg/m ³)	Volume (cm ³)	Force consignée (N)	Vitesse (mm/min)
BC+0%MCP	414	7*7*7	250	1
BC+20%MCP	522	7*7*7	250	1
BC+40%MCP	694	7*7*7	250	1

Tableau II-4 : Masses volumiques des éprouvettes et paramètres utilisés pour les essais de compression.

II.2.1.3 Caractérisation en compression

A. Direction de sollicitation

Pour obtenir les grandeurs mécaniques des matériaux en compression simple, on étudie leurs comportements dans les deux directions de sollicitation décrites par la [Figure II-8] : sollicitation perpendiculaire aux plans d'anisotropie (c'est à dire dans le sens du compactage des échantillons) et sollicitation parallèle aux plans d'anisotropie comme décrit par Youssef (Youssef 2017).

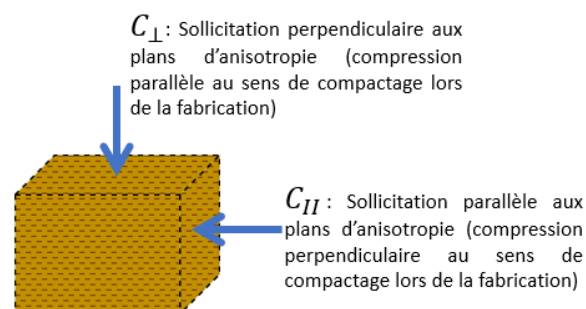


Figure II-8: Directions de sollicitation en compression en fonction du sens de compactage.

Le [Tableau II-5] donne les caractéristiques des échantillons utilisés (cubiques de 7 cm de côté) pour les essais de compression mécanique dans chaque direction de sollicitation et pour chaque matériau étudié.

	Direction de sollicitation	Noms	Masse (g)
BC+0%MCP ($\rho = 414 \text{ kg/m}^3$)	C_{II}	H0a	126
		H0b	138
		H0c	162
	C_{\perp}	H0d	140
		H0e	160
		H0f	132
BC+20%MCP ($\rho = 522 \text{ kg/m}^3$)	C_{II}	H20a	160
		H20b	156
		H20c	154
	C_{\perp}	H20d	160
		H20e	160
		H20f	200
BC+40%MCP ($\rho = 694 \text{ kg/m}^3$)	C_{II}	H40a	222
		H40b	200
		H40c	194
	C_{\perp}	H40d	208
		H40e	214
		H40f	224

Tableau II-5 : Dénomination et masse des échantillons pour chaque direction de sollicitation.

B. Grandeurs caractéristiques

A partir des données du déplacement axial de la presse et de l'évolution de la force appliquée sur l'échantillon, on peut déduire : la contrainte, la déformation longitudinale, la déformation linéaire et le module de Young.

Dans un premier temps, pour tracer les courbes de contrainte-déformation, on calcul la contrainte et la déformation linéaire comme suite :

- La contrainte (σ en [MPa]) est le rapport entre la force appliquée à travers la presse (F en [N]) et la surface réelle de contact (S en [mm²]) :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{II-2}$$

- La déformation relative (ε en %) représente son raccourcissement rapporté à la hauteur initiale de l'éprouvette :

$$\varepsilon = \frac{H_{initiale} - H_{finale}}{H_{initiale}} \quad \text{II-3}$$

Avec : $H_{initiale}$ et H_{finale} , respectivement la hauteur finale et initiale.

D'autre part, le module d'élasticité ou le module de Young (E en [MPa]) représentant le rapport entre la contrainte et la déformation ou pente de la courbe $\sigma = f(\varepsilon)$. Il se calcule comme suit :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{II-4}$$

Dans le cas d'un béton agro-sourcé avec un comportement élastoplastique, le module de Young correspond à la pente du domaine élastique (s'il est quasi-linéaire ou à l'origine de la courbe). Il peut être déterminé à partir d'essais de compression monotone ou cyclique, comme illustré par la [Figure II-9].

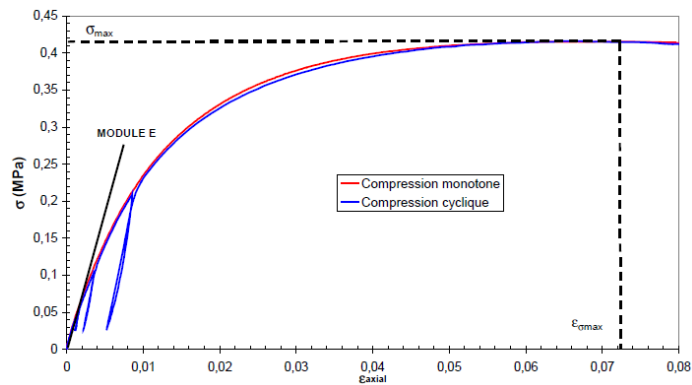


Figure II-9 : Essais de compression monotone et Cyclique sur du béton de chanvre (Cerezo 2005).

Dans notre cas, et d'après les travaux de Youssef (Youssef 2017), l'allure des courbes contraintes-déformations peut prendre des profils différents suivant la direction de compression par rapport au sens de compactage [Figure II-10].

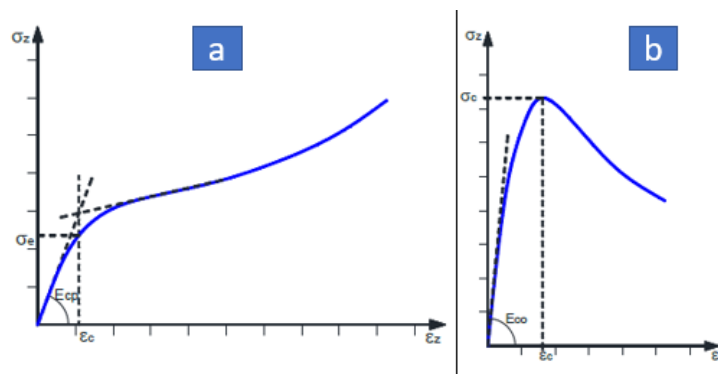


Figure II-10 : Comportement d'un béton de chanvre dans deux directions de sollicitation : (a) compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie (\perp ou dans le sens du compactage) ; (b) compression parallèle aux plans d'anisotropie (\parallel ou perpendiculaire au sens du compactage) (Youssef 2017).

II.2.2 Comportement des bétons de chanvre avec et sans MCP en compression

Avant les essais sur les éprouvettes sélectionnées, des tests préliminaires ont été effectués sur des échantillons de béton de chanvre sans MCP avec plusieurs vitesses de déplacement de la plaque supérieure de la presse. Compte tenu de la durée des essais et de l'endommagement plus ou moins rapide des échantillons, nous avons retenu la vitesse de 1 mm/min.

II.2.2.1 BC+0%MCP

Dans le BC+0%MCP les déformations se propagent du cœur de l'éprouvette vers la surface extérieure. Ces déformations sont facilement observables et se propagent très rapidement à travers l'échantillon. Sur la [Figure II-11], on peut observer la déformation du béton de chanvre pour une charge perpendiculaire aux plans d'anisotropies.



Figure II-11 : Evolution de la déformation du BC+0%MCP durant la compression.

- Comportement en compression parallèle aux plans d'anisotropie

En réalisant la compression parallèle aux plans d'anisotropie, on remarque une propagation assez rapide des fissurations sur l'éprouvette de BC+0%MCP. Ces fissurations évoluent progressivement jusqu'à rupture complète de toutes les liaisons liant-particules avant écrasement de l'échantillon.

Sur le BC+0%MCP, on observe le comportement décrit par les courbes de la [Figure II-12]. Ces courbes sont presque identiques pour les trois échantillons. La première phase de ces courbes est élastique quasi-linéaire et consiste en une augmentation progressive de la contrainte jusqu'à atteindre un pic entre 0,22 et 0,23 MPa. La deuxième phase après le pic, ou phase de radoucissement du matériau, correspond à une diminution progressive de la contrainte pour assurer la rupture complète des liaisons liant-chênevottes jusqu'à écrasement des particules.

Les quelques écarts entre les courbes sont dus essentiellement à la décohésion des couches et particules de chênevottes tout au long de l'essai. Comme vérifié par Youssef et autres (Youssef et al. 2015), le comportement mécanique du béton de chanvre varie légèrement d'une éprouvette à l'autre même si elles proviennent d'un même échantillon.

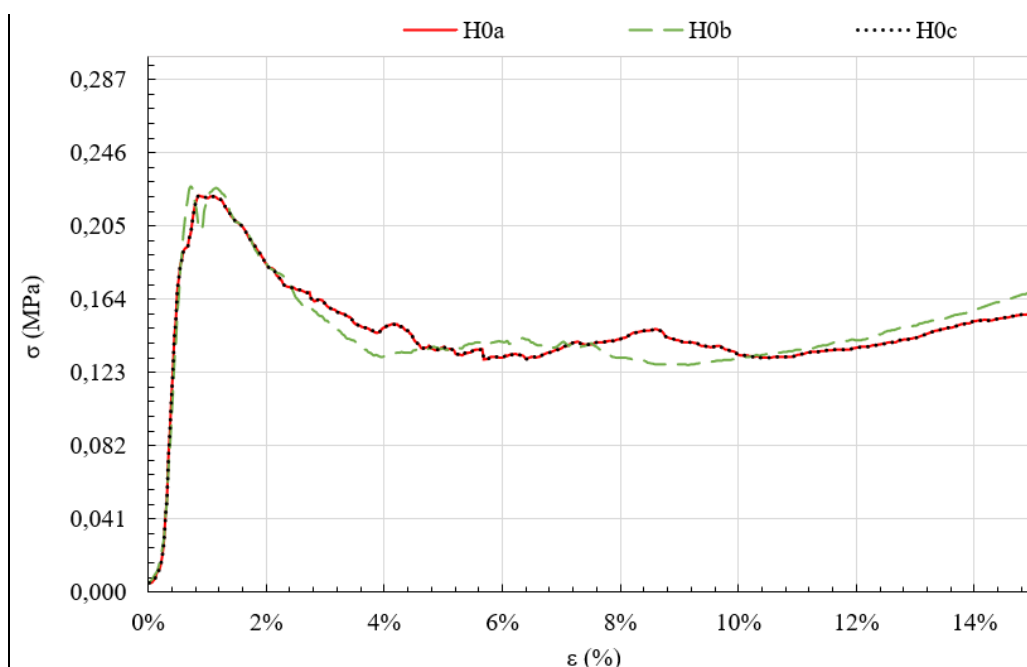


Figure II-12 : Comportement du BC+0%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie.

- Comportement en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie

En réalisant la compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie, aucune rupture des éprouvettes n'a été observée. Mais, on remarque un éclatement des éprouvettes suivi d'une fissuration progressive jusqu'à leur écrasement complet. En effet, la fissuration du liant conduit à une superposition des couches de chènevotte et une densification du matériau permettant une augmentation de la charge sans rupture complète des échantillons.

Le comportement décrit par la [Figure II-13] est similaire aux comportements décrits dans d'autres études. Les courbes sur cette figure présentent dans un premier temps un comportement élastique avec une augmentation progressive de la contrainte allant de 0 à 0,182 MPa pour une déformation allant de 0 à 1%. Puis, une phase de plasticité avec écrouissage non-linéaire décrite par l'augmentation non-linéaire de la contrainte de 0,182 à 0,243 MPa et de 1 à 2% de déformation. Enfin, prend place la phase élastoplastique quasi linéaire justifiée par une augmentation quasi linéaire de la contrainte après la rupture de toutes les liaisons liant/chènevottes, avec une contrainte allant de 0,243 à 0,276 MPa et une déformation allant de 2 à 6%. Nous n'avons malheureusement pas pu atteindre la phase de radoucissement à cause de l'inclinaison de la plaque supérieure de la presse.

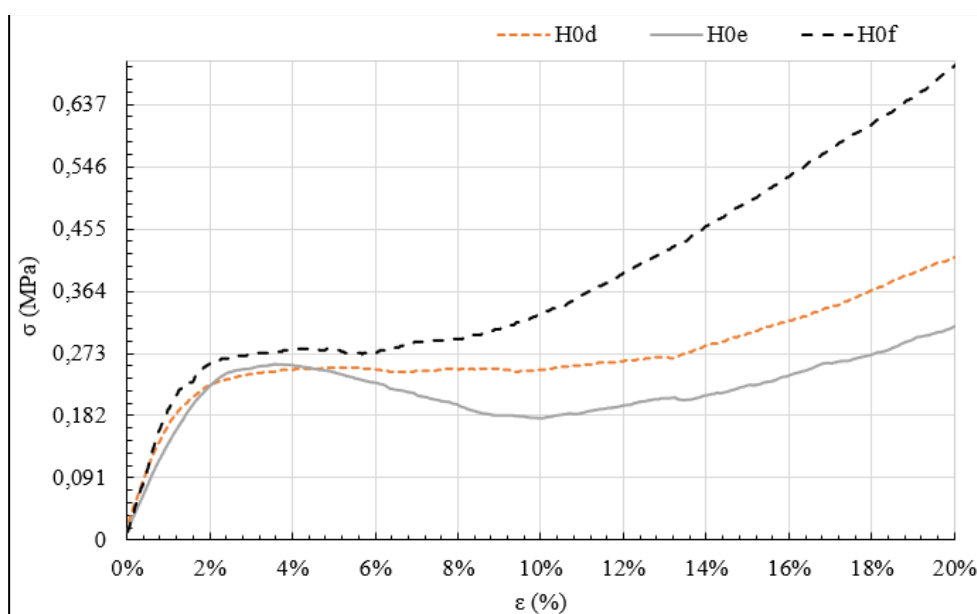


Figure II-13 : Comportement du BC+0%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

- Synthèse des comportements du BC+0%MCP en compression

La [Figure II-14] fait une comparaison des comportements en compression du BC+0%MCP en fonction des directions de sollicitation. De plus, le [Tableau II-6] présente : la résistance maximale en compression, le module d'élasticité et la déformation en compression perpendiculaire et parallèle aux plans d'anisotropie.

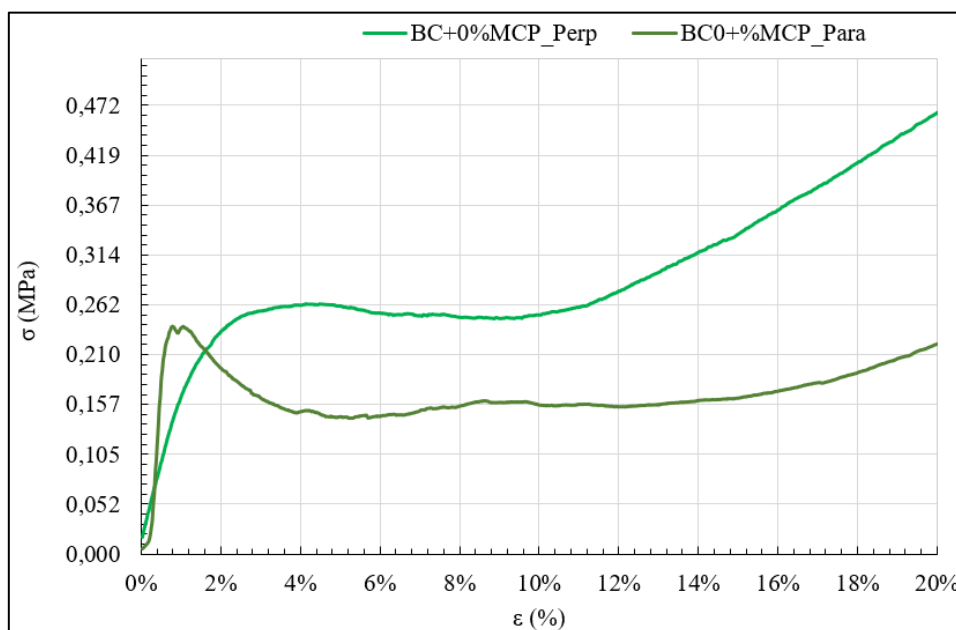


Figure II-14 : Contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie du BC+0%MCP.

Sens de sollicitation		Phases ou domaines de déformation des échantillons				E [MPa]	σ_{max} [MPa]
		Elastique	Plastique	Elasto-plastique	Radoucissement		
C_{II}	H0a	0,001 à 1%			1 à 100%	24,44	0,22
	H0b	0,001 à 1%			1 à 100%	24,44	0,23
	H0c	0,001 à 1%			1 à 100%	24,44	0,22
C_{\perp}	H0d	0 à 1%	1 à 2%	2 à 6%		20,33	0,25
	H0e	0 à 1%	1 à 2%	2 à 6%		19,89	0,25
	H0f	0 à 1%	1 à 2%	2 à 6%		19,33	0,27

Tableau II-6 : Grandeurs caractéristiques du BC+0%MCP en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

On remarque que la contrainte maximale en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie est supérieure à celle en compression parallèle. Ce qui nous amène à confirmer l'hypothèse d'anisotropie vérifiée par la plupart des auteurs : la résistance à la compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie est toujours plus élevée. D'après Youssef et collaborateurs (Youssef et al. 2015), cette différence peut être justifiée par l'orientation et la distribution des particules de chènevotte dans le matériau lors du compactage.

II.2.2.2 BC+20%MCP

Comme dans le cas précédent, on n'observe pas de rupture du matériau durant les essais de compression sur le BC+20%MCP. Néanmoins, on observe d'abord une étape de tassage des échantillons laissant place à une fissuration lente et progressive de l'éprouvette. D'autre part, le décollage des particules n'est pas aussi accentué ; il semble donc que l'ajout du MCP vient renforcer les liaisons liant/particules. La [Figure I-15], présente la déformation d'un échantillon de béton de chanvre avec 20%MCP pour une charge perpendiculaire aux plans d'anisotropie.



Figure II-15 : Evolution des fissurations dans un BC+20%MCP en compression.

- Comportement en compression parallèle aux plans d'anisotropie

En compression parallèle, les échantillons se divisent en deux après la fissuration. La [Figure II-16] décrit le comportement du BC+20%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie. Ces courbes décrivent un comportement à la compression similaire à celui du BC+0%MCP avec un arrondissement plus net au passage de la valeur de crête.

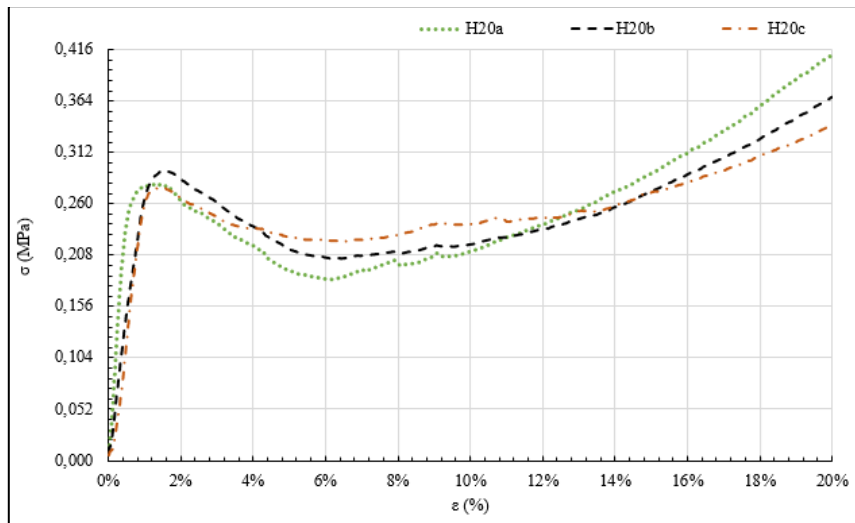


Figure II-16 : Comportement du BC+20%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie.

- Comportement en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie

La [Figure II-17] décrit le comportement du BC+20%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

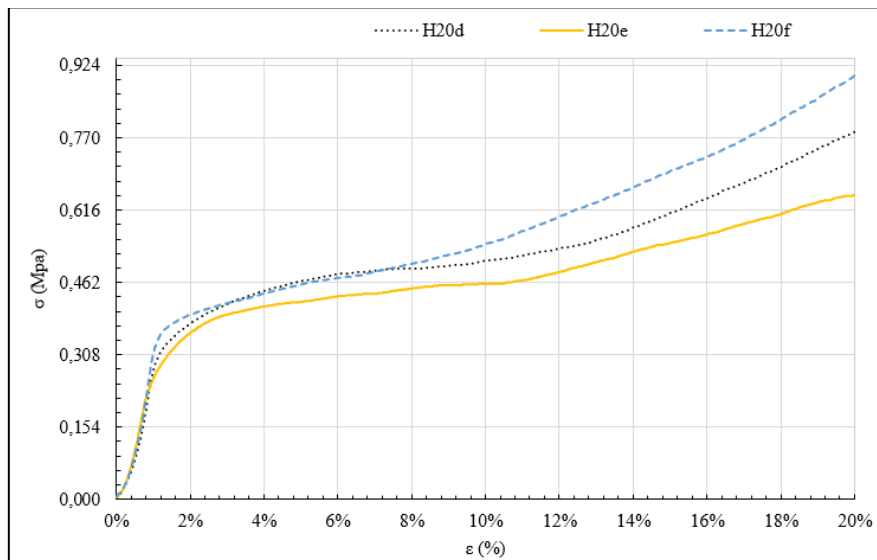


Figure II-17 : Comportement du BC+20%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

Les courbes de cette figure décrivent un comportement à la compression proche de celui de Youssef et de Bruijn (Youssef 2017; de Bruijn et al. 2009). Dans la première phase de la courbe, on remarque une augmentation progressive de la contrainte et de la déformation décrivant ainsi

un comportement élastique. Alors que la deuxième phase décrit un comportement plastique avec écrouissage entre 1 et 2% pour des contraintes comprises entre 0,27 et 0,35 MPa.

- Synthèse du comportement du BC+20%MCP en compression

En synthèse, la [Figure II-18] présente les courbes de contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire du BC+20%MCP.

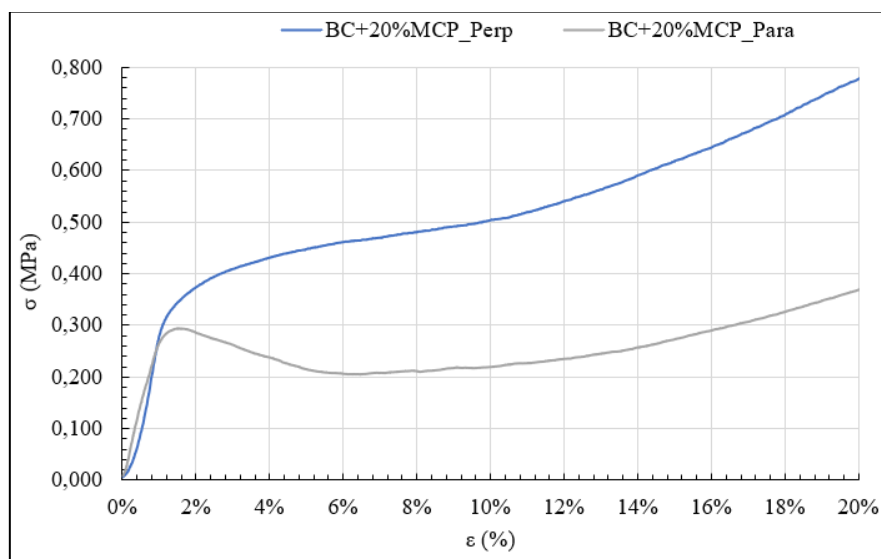


Figure II-18 : Contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie du BC+20%MCP.

Sens de sollicitation		Phases ou domaines de déformation des échantillons				E [MPa]	σ_{max} [MPa]
		Elastique	Plastique	Elasto-plastique	Radoucissement		
C_{II}	H20a	0,02 à 1%			1 à 100%	40,31	0,27
	H20b	0,02 à %			1 à 100%	30,00	0,29
	H20c	0 à 4%			1 à 100%	30,00	0,27
C_{\perp}	H20d	0 à 1%	1 à 2%	2 à 3%		29,89	0,41
	H20e	0 à 1%	1 à 2%	2 à 4%		29,89	0,39
	H20f	0 à 1%	1 à 2%	2 à 4%		27,83	0,42

Tableau II-7 : Grandeurs caractéristique du BC+20%MCP en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

De plus, le [Tableau II-7] présente les propriétés des éprouvettes en compression parallèle et perpendiculaire. Le BC+20%MCP présente une résistance à la compression perpendiculaire supérieure à celle en compression parallèle aux plans d'anisotropie comme pour le BC+0%MCP. D'une façon générale, la résistance en compression et le module d'élasticité augmentent en présence du MCP.

II.2.2.3 BC+40%MCP

Les essais sur le BC+40%MCP sont beaucoup plus longs. Durant les premières minutes de compression, on observe un tassage accompagné d'une diminution de la hauteur de l'éprouvette. Après le pré-tassement, les premières fissures apparaissent et sont suivies d'un décollement des couches du matériau. La [Figure I-19] présente le comportement du BC+40%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

On observe des fissurations moins importantes que sur les deux autres formulations. Les liaisons liant/granulats semblent se renforcer avec l'ajout du MCP.

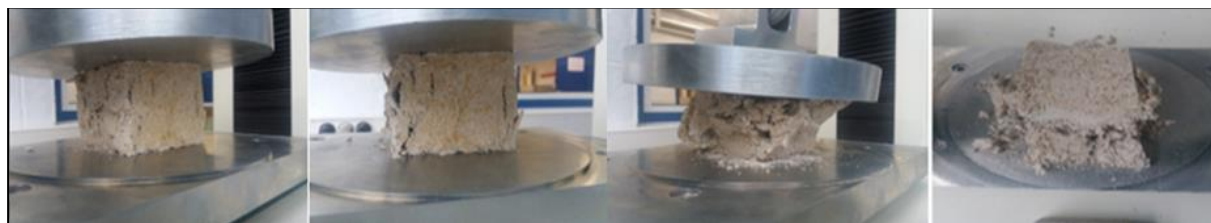


Figure II-19 : Déformation du BC+40%MCP en compression.

- Comportement en compression parallèle aux plans d'anisotropie

La [Figure II-20] présente le comportement du BC+40%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie. Sur cette figure, on observe un comportement à trois phases. La première décrit un comportement élastique quasi-linéaire jusqu'au pic de contrainte et la deuxième décrit un radoucissement comme pour les BC+0%MCP et BC+20%MCP. En revanche, on remarque une troisième phase élastoplastique ponctuée par une augmentation de la contrainte qui peut se justifier par l'inclinaison de la presse pendant la phase de radoucissement lors de l'essai.

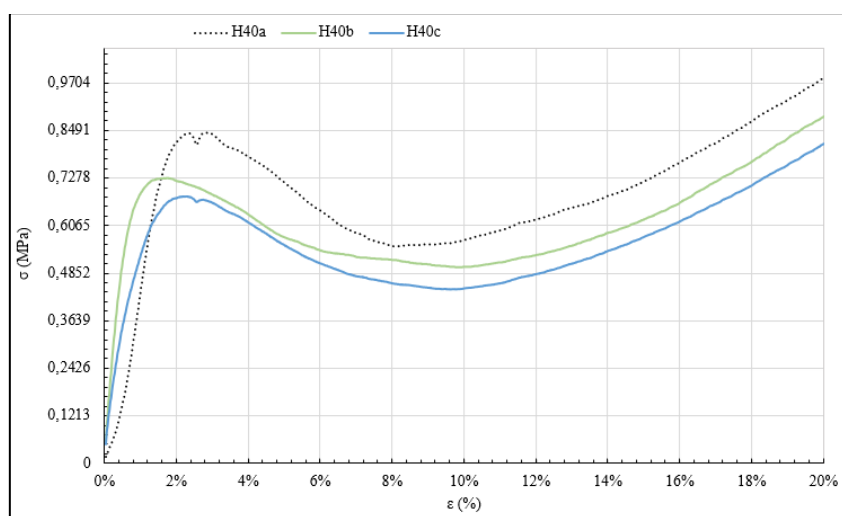


Figure II-20 : Comportement du BC+40%MCP en compression parallèle aux plans d'anisotropie.

Les dispersions observées entre les courbes peuvent être justifiées par la non-uniformité du compactage et de la distribution des particules dans l'éprouvette.

- Comportement en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie

La [Figure II-21] présente le comportement du BC+40%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie. Malgré la hausse de l'amplitude, les courbes contrainte-déformation décrivent un comportement similaire à celui observé sur les autres bétons.

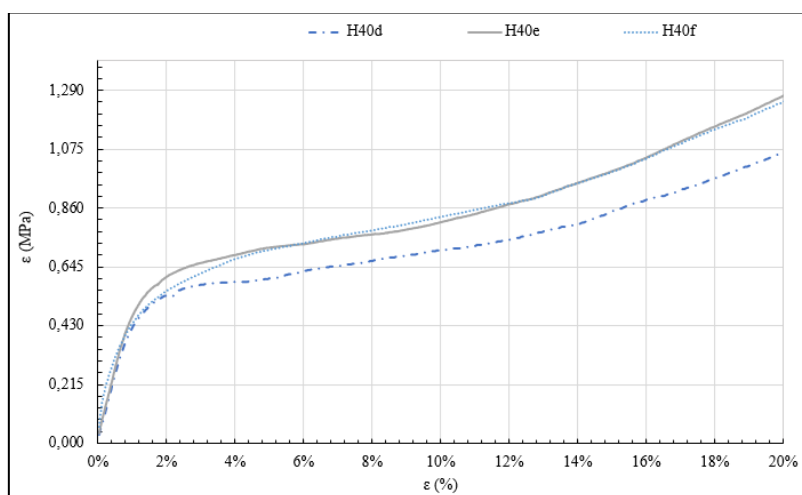


Figure II-21 : Comportement du BC+40%MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

- Synthèse du comportement du BC+40%MCP en compression

La [Figure II-22] compare le comportement du BC+40%MCP en compression perpendiculaire à celui en compression parallèle et le [Tableau II-8] présente les résultats pour chaque éprouvette.

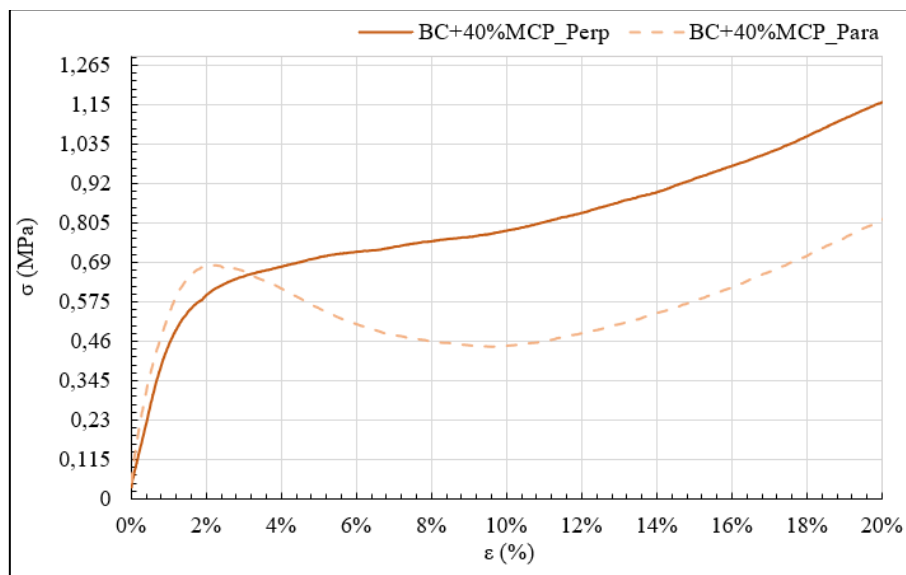


Figure II-22 : Contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie du BC+40%MCP.

Sens de sollicitation		Phases ou domaines de déformation des échantillons				E [MPa]	σ_{max} [MPa]
		Elastique	Plastique	Elasto-plastique	Radoucissement		
C_{II}	H40a	0 à 2%		10 à 26%	2 à 10%	46,75	0,84
	H40b	0 à 0,2%		10 à 23%	2 à 10%	86,64	0,72
	H40c	0 à 0,2%		9 à 26%	2 à 9%	47,38	0,67
C_{\perp}	H40d	0 à 1%	1 à 3%	3 à 34%		47,77	0,58
	H40e	0 à 1,7%	1,7 à 9%	9 à 27%		48,24	0,75
	H40f	0 à 1%	1 à 5%	5 à 28%		68,18	0,61

Tableau II-8 : Caractéristiques mécaniques des échantillons de BC+40%MCP en compression.

Contrairement aux BC+0%MCP et BC+20%MCP, la différence d'amplitude entre la résistance à la compression parallèle et celle perpendiculaire de la phase élastique n'est pas accentuée. De plus, la contrainte maximale en compression parallèle est supérieure à celle en compression perpendiculaire.

II.2.3 Evolution du comportement du béton de chanvre en fonction du taux de MCP

Notons tout d'abord que la durée des essais augmente en fonction du taux de MCP dans le béton de chanvre. La [Figure II-23] permet d'observer ce qui reste des éprouvettes à la fin des essais de compression et après avoir retiré les poussières. A partir de ces images, on constate que les bétons de chanvre avec MCP ne s'écrasent pas complètement par rapport au béton de chanvre sans MCP. De plus, sur les éprouvettes de béton de chanvre avec 40% de MCP, la densification du matériau durant l'essai est facilement observable.



Figure II-23 : Résidus des matériaux après la compression

	Sens de Sollicitation	ρ (kg/m ³)	σ_{\max} (MPa)	E_{moyenne} (MPa)
BC+0%MCP	C_{II}	414	0,22	24,44
	C_{\perp}	414	0,25	19,85
BC+20%MCP	C_{II}	522	0,27	33,43
	C_{\perp}	522	0,41	29,21
BC+40%MCP	C_{II}	694	0,74	47,06
	C_{\perp}	694	0,64	48,00

Tableau II-9 : Propriétés mécaniques des BC+%MCP en compression parallèle et perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

Le [Tableau II-9] présente un récapitulatif des résultats moyennés sur les trois éprouvettes de chaque essai et en fonction de la direction de sollicitation.

- Comportement en compression parallèle aux plans d'anisotropie

La [Figure II-24] présente une synthèse comparative de l'évolution du comportement des trois formulations en compression parallèle aux plans d'anisotropie. Sur cette figure, on peut remarquer que plus on ajoute de MCP, plus la contrainte augmente et que le BC+40%MCP présente une phase de radoucissement (après le pic) plus prononcée. Entre 0% et 20% de MCP, la contrainte maximale n'augmente que d'environ 13% ; alors qu'entre 20% et 40%, elle est en moyenne multipliée par 2,7. La pente de la phase élastique augmente aussi avec le MCP.

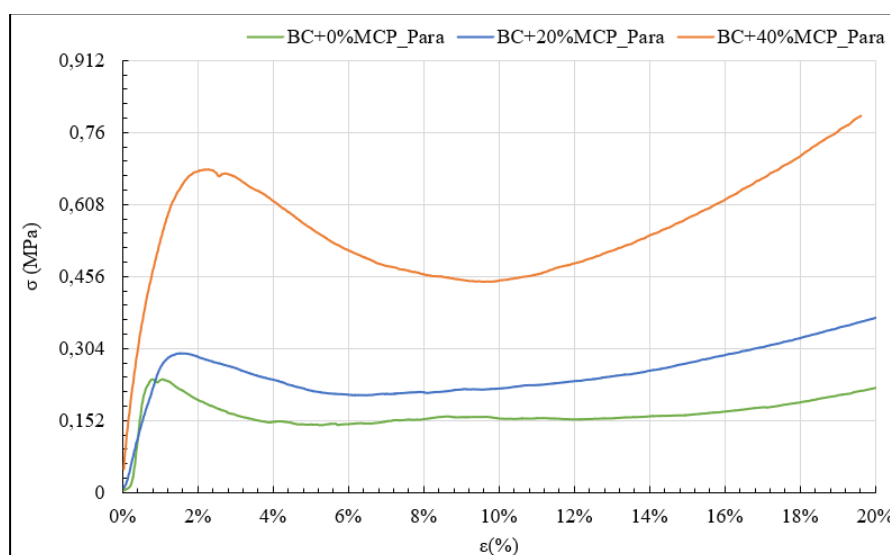


Figure II-24 : Contrainte-déformation des BC+%MCP en compression parallèle.

- Comportement en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie

Contrairement au comportement en compression parallèle, le comportement du béton de chanvre avec et sans MCP en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie est similaire pour les trois formulations [Figure II-25]. Là encore, la résistance en compression augmente avec le taux de MCP, mais de façon plus régulière : de 60% en moyenne entre 0% et 20% et entre 20% et 40% de MCP.

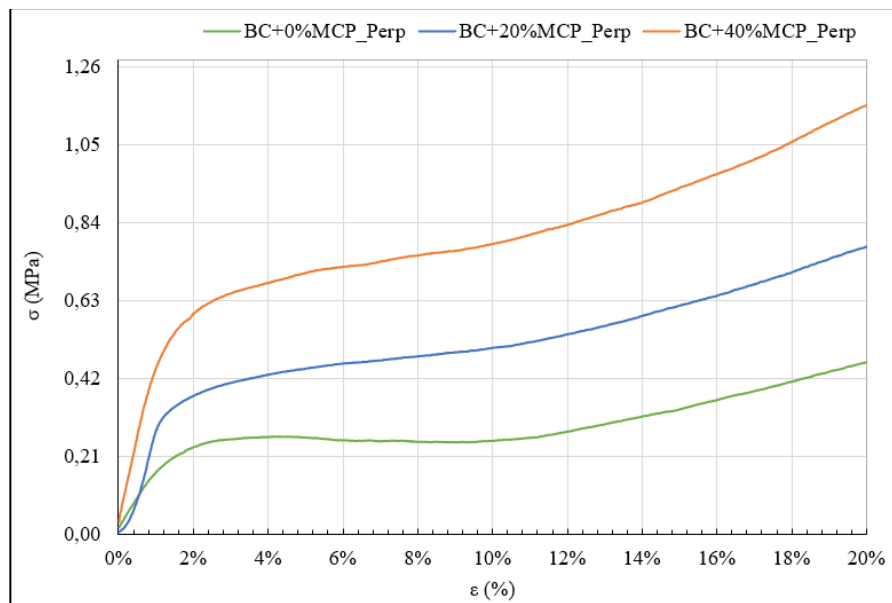


Figure II-25 : Contrainte-déformation des BC+% MCP en compression perpendiculaire.

Les allures des courbes de contrainte-déformation en compression parallèle et perpendiculaire des matériaux étudiés sont proches de celles recensées dans la bibliographie (Cerezo 2005; de Bruijn et al. 2009; Youssef et al. 2015). Dans la zone élastique la majeure partie des efforts est reprise par la matrice liante ; alors qu'un endommagement des liaisons entre liant et particules se produit dans la zone plastique avec écrouissage. Puis apparaît une zone quasi-linéaire où les efforts sont repris par les couches de particules qui s'écrasent et se densifient.

D'une manière générale, l'ajout du matériau à changement de phase dans la formulation du béton de chanvre n'a pas d'impact négatif sur son comportement mécanique. Il améliore même de façon sensible sa résistance en compression, quel que soit le sens de l'effort appliqué par rapport à la direction de compactage. Pour l'enduit à base de chanvre, les essais en compression ont été abandonnés compte tenu de la durée de l'expérimentation. Certes les exigences en termes de résistance mécanique sont moins fortes, on peut penser que l'ajout de MCP aura un effet similaire à celui du béton. L'objectif de l'ajout du MCP étant plutôt d'améliorer sa performance thermique, nous allons nous consacrer dans la partie suivante aux capacités de conduction et de stockage de la chaleur du béton et de l'enduit de chanvre.

II.3 Caractérisation des propriétés thermiques des matériaux étudiés

II.3.1 Transfert et stockage de chaleur

II.3.1.1 Changement de phase dans un MCP : solidification-fusion

Quand un système reçoit de la chaleur, son énergie interne augmente. Ce transfert de chaleur s'accompagne d'un changement de température du corps et/ou d'un changement d'état. La chaleur sensible représente la quantité de chaleur qui permet l'augmentation de la température de 1 °C d'un kilogramme de matière, alors que la chaleur latente est l'énergie qu'il faut lui fournir pour changer son état. Dans notre étude, le matériau à changement de phase utilisé à une température de fusion voisine de 26 °C. Il est ici considéré comme un corps pur et son état dans les bétons ou les enduits à base de chanvre sera : soit solide, soit liquide.

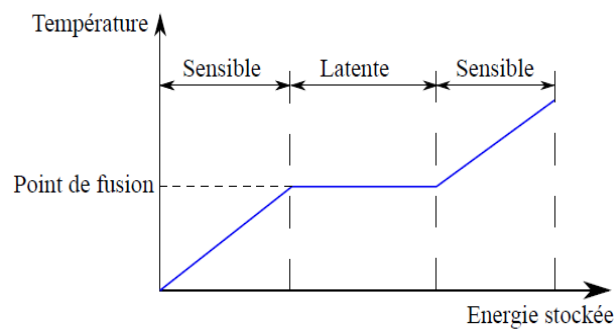


Figure II-26 : Principe de fonctionnement des MCP, (Kodjo 2019).

La [Figure II-26] représente les trois phases de stockage de chaleur dans le MCP en fonction de la température :

- Phase 1 : chaleur sensible ; la chaleur reçue provoque une augmentation de la température du solide jusqu'à sa température de fusion. La chaleur sensible (Q) peut être évaluée, à partir de la température initiale ($T_{initiale}$) et la température de fusion (T_F), par l'équation suivante :

$$Q = m C_{P_S} (T_F - T_{initiale}) \quad \text{II-5a}$$

Où : C_{P_S} la capacité thermique du MCP à l'état solide.

- Phase 2 : l'énergie est stockée sous forme latente ; la chaleur reçue par le MCP est utilisée pour le changement de phase, sans changement de température. La chaleur

reçue est obtenue en multipliant la masse (m) du corps par sa chaleur latente (L). Elle se calcule comme suite :

$$Q = m L \quad \text{II-6}$$

- Phase 3 : l'énergie apportée est stockée sous forme sensible ; la chaleur reçue sert à augmenter la température du liquide pour passer de la température de fusion (T_F) à la température finale (T_{Finale}). Dans cette phase, le stockage de chaleur est décrit par :

$$Q = m C_{P_L} \cdot (T_{Finale} - T_F) \quad \text{II-5b}$$

Où : C_{P_L} est la capacité thermique en phase liquide.

II.3.1.2 Enthalpie d'un corps

L'enthalpie (H en Joule) est l'énergie totale d'un système thermodynamique. Selon Castanet (Castanet 1991), en général, l'échauffement d'un corps de T_1 à T_2 correspond à la variation d'enthalpie suivante :

$$\Delta_{T_1}^{T_2} H = \int_{T_1}^{T_{tr}} C_p dT + \Delta_{tr} H + \int_{T_{tr}}^{T_2} C_p dT \quad \text{II-7}$$

Avec : $\Delta_{tr} H$, l'enthalpie de changement de phase, T_{tr} température de transition caractéristique du corps pur. Il y a lieu de noter que la fonction $C_p(T)$ subit une discontinuité à T_{tr} .

II.3.2 Expérimentation

Dans cette étude, l'objectif est de déterminer avec suffisamment de précision la capacité calorifique et la conductivité thermique des bétons et enduits de chanvre, avec ou sans MCP. Dans la littérature, la calorimétrie différentielle DSC ou DTA (Differential Scanning Calorimetry-DSC ou Differential Thermal Analysis-DTA) et la plaque chaude gardée sont des techniques utilisées couramment.

La DSC est très utilisée pour déterminer la capacité calorifique sur des échantillons de très petites tailles (Zeraouli, Ehmimed, et Dumas 2000; Zalewski et al. 2014; Cordeiro CavaIcanti 2005; Joulin et al. 2011). La [Figure II-27] présente l'évolution du flux de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un échantillon de 5,78 mg de MCP à raison de 5 °K par

minute. La forme du thermogramme présentée sur cette figure montre une phase de changement d'état de l'échantillon ne permettant pas de définir une température de fusion précise : il ne s'agit donc pas d'un corps pur. Un autre problème rencontré avec cette méthode est que l'allure du thermogramme dépend de la vitesse de chauffe et de la masse de l'échantillon. Comparé à la DSC, la plaque chaude gardée nécessite des échantillons de plus grande taille et donc plus représentatifs du matériau en usage dans des conditions réelles.

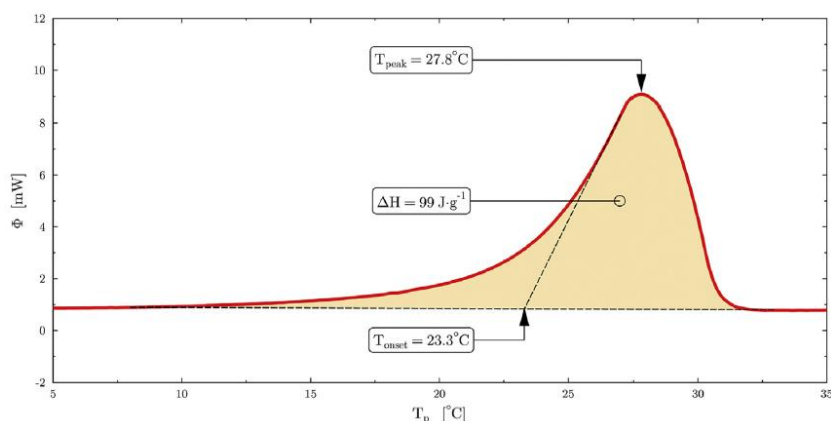


Figure II-27 : Thermogramme d'un échantillon de Micronal PCM® DS 5001 X de 5,78 mg obtenu avec une DSC, (Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014).

Dans notre cas, considérant que la méthode DSC n'est pas adaptée pour les bétons et enduits de chanvre avec et sans MCP, nous avons retenu l'approche de Zalewski et collaborateurs (Zalewski et al. 2019) pour la caractérisation des propriétés thermiques de nos matériaux. Elle est basée sur la combinaison de mesures expérimentales et d'un modèle numérique (Zalewski et al. 2019; Tittlein, Gibout, Franquet, Zalewski, et al. 2015; Joulin et al. 2014; Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014).

II.3.2.1 Méthodologie

Pour obtenir les propriétés thermophysiques du matériau intégrant un MCP, la procédure retenue peut être synthétisée en deux grandes étapes (Zalewski et al. 2019)

- ✓ Etape 1 : A l'aide du dispositif expérimental, on mesure simultanément les flux thermiques et les températures aux faces de l'échantillon testé. Ainsi, en fonction de la température de fusion de MCP utilisée, les différentes rampes de températures sont choisies et imposées à l'échantillon afin de faire fondre et solidifier complètement les MCP à l'intérieur de l'échantillon.

- ✓ Etape 2 : Une modélisation numérique considérant l'échantillon comme un milieu homogène caractérisé par les propriétés thermophysiques macroscopiques est réalisée. Grâce à l'outil GenOpt, le processus d'inversion (ou méthode inverse) combinant les mesures expérimentales avec les résultats numériques obtenus est mis en œuvre pour identifier les caractéristiques suivantes : capacité thermique, chaleur latente, conductivité thermique et température apparente de fusion.

II.3.2.2 Dispositif expérimental

Pour la mesure des propriétés thermiques de nos échantillons, on utilise le dispositif expérimental développé au LGCgE de l'Université d'Artois et développé par (Zalewski et al. 2019; Tittlein, Gibout, Franquet, Zalewski, et al. 2015; Joulin et al. 2014; Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014; Cherif et al. 2009). Ce dispositif, présenté sur la [Figure II-28], est composé de : deux plaques échangeuses isothermes reliées chacune à un bain thermostaté, deux fluxmètres à gradient tangentiel et des thermocouples (de type T) reliés à un système d'acquisition de données. Avec ses plaques contrôlées en température grâce aux bains pilotés par un ordinateur, ce dispositif s'apparente à la méthode des plaques chaudes gardées.

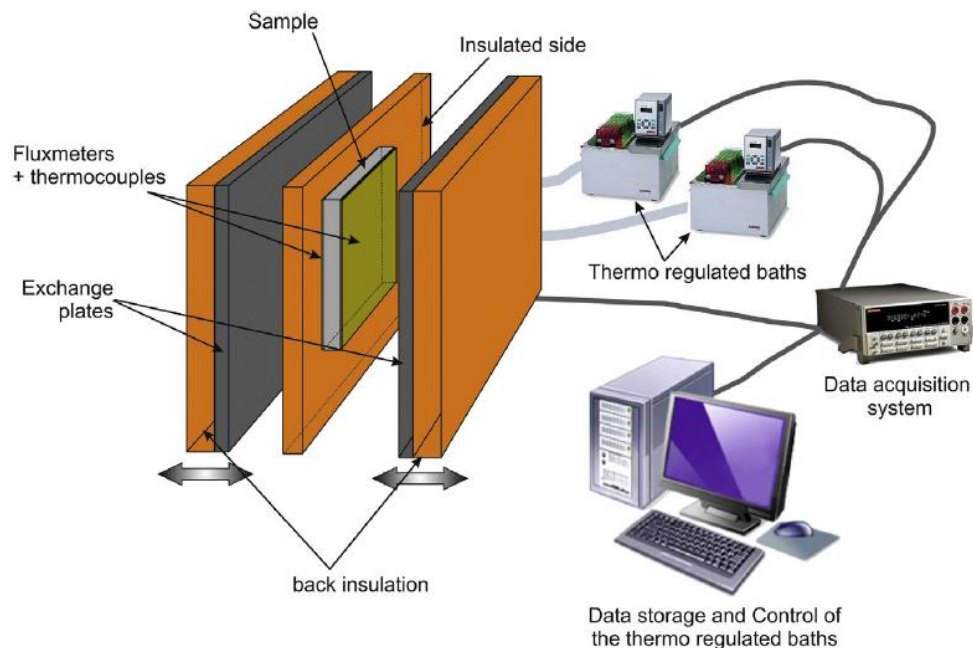


Figure II-28 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des flux thermiques et des températures sur les deux faces des échantillons (Franquet, Gibout, Zalewski, et al. 2014).

La [Figure II-29] indique la position des capteurs ainsi que les variables mesurées et enregistrées en température et en flux ; un sens positif du flux de chaleur est choisi à priori.

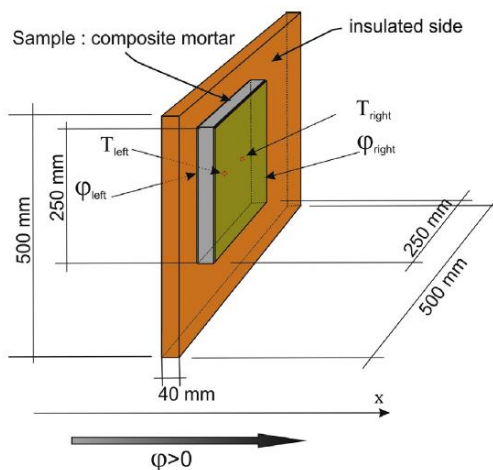


Figure II-29 : Schéma du principe d'instrumentation (Joulin et al. 2014).

II.3.3 Modèle thermodynamique

Pour décrire le comportement thermique d'un matériau composite avec MCP, le modèle utilisé se base sur le premier principe de la thermodynamique pour exprimer l'évolution de son enthalpie (h) en fonction de la température (J. P. Dumas et al. 2013; Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014; Tittlein, Gibout, Franquet, Johannes, et al. 2015; Tittlein, Gibout, Franquet, Zalewski, et al. 2015; Toifane et al. 2022). Selon Franquet et collaborateurs (Franquet, Gibout, Zalewski, et al. 2014), le matériau de base avec MCP peut être considéré comme un milieu homogène, car le MCP microencapsulé est de très petite dimension. Par conséquent, le composite peut être caractérisé par des propriétés apparentes à l'échelle macroscopique. Ainsi, le problème de transfert de chaleur dans notre étude peut donc se réduire à un problème unidimensionnel compte tenu des conditions imposées. Le bilan énergétique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T^2}{\partial x^2} \quad \text{II-8}$$

Où : h représente l'enthalpie massique [J/kg] et λ la conductivité thermique [W/(m.K)].

Avec les conditions de flux aux limites associées :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha (T_{x=0} - T_p(t)) \quad \text{II-9}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = \alpha (T_{x=X} - T_p(t)) \quad \text{II-10}$$

Avec : $T_p(t)$, la température imposée sur chaque face de l'échantillon durant l'essai, et α coefficient d'échange surfacique.

S'agissant d'un matériau avec deux composants, le matériau de base « M » et le matériau à changement de phase « MCP », l'enthalpie massique (h) est donnée par la relation :

$$h = \frac{m_M h_M + m_{MCP} h_{MCP}}{m_M + m_{MCP}} \quad \text{II-11}$$

$$\text{Ce qui induit : } dh = \frac{m_M h_M}{m_M + m_{MCP}} dh_M + \frac{m_{MCP} h_{MCP}}{m_M + m_{MCP}} dh_{MCP} \quad \text{II-12}$$

Avec : h_M et h_{MCP} , respectivement l'enthalpie du matériau de base et celle du MCP,

et m_M et m_{MCP} , respectivement la masse du matériau de base et du MCP.

D'autre part, la variation d'enthalpie du matériau de base en fonction de la température s'exprime comme suit :

$$\frac{dh_M}{dT} = C_{S,M} \quad \text{II-13}$$

Et celle du MCP à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{dh_{MCP}}{dT} = \begin{cases} \text{Si } T < T_M : C_{S,MCP} + (C_{L,MCP} - C_{S,MCP}) \left(\frac{T_A - T_M}{T_A - T} \right) - L_A \frac{T_A - T_M}{(T_A - T)^2} \\ \text{Si } T \geq T_M : C_{L,MCP} \end{cases} \quad \text{II-14}$$

Avec : T_A , la température de fusion du corps pur ; T_M , la température de fin de fusion du MCP ; L_A , la chaleur latente du MCP et le ratio $\left(\frac{T_A - T_M}{T_A - T} \right)$ est la fraction liquide du MCP déduite du diagramme de phase.

La combinaison des trois équations [II-12, II-13 et II-14] permet d'exprimer la fonction de l'enthalpie du matériau composite. Il est à noter que la formule implique aussi les trois paramètres caractéristiques liés au changement de phase : la chaleur latente du corps pur (L_A),

la température de fin de fusion (T_M) et la température de fusion du corps pur (T_A), voir [Figure II-30].

$$h(t) = \begin{cases} \text{Si: } T < T_M : C_S(T - T_M) + C_L(T_M - T_A) + \psi L_A \left(1 - \frac{T_A - T_M}{T_A - T}\right) + (C_S - C_L)(T_A - T_F) \ln\left(\frac{T_A - T}{T_A - T_M}\right) \\ \text{Si: } T \geq T_M : C_L(T - T_A) \end{cases} \quad \text{II-15}$$

Avec : $C_i = (1 - \psi)C_{S,BC} + \psi C_{i,MCP}$ (i pouvant être S ou L), et ψ est la fraction massique de MCP.

Afin d'illustrer T_M et T_A , la [Figure II-30] présente un exemple de la variation d'enthalpie d'un mortier avec MCP en fonction de la température. Sur cette dernière, on peut aussi observer l'écart entre la température de fusion du corps pur et celle de fin de fusion.

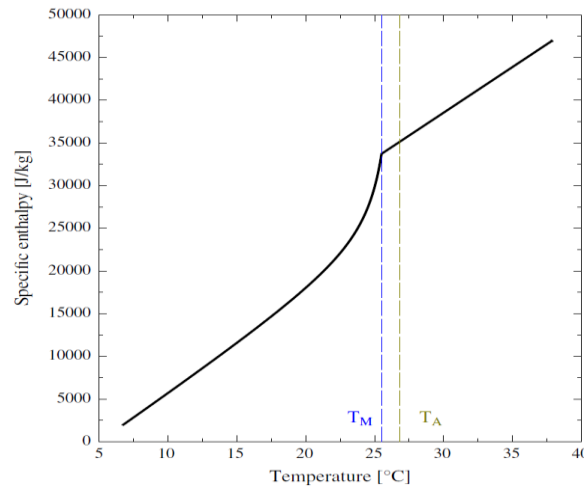


Figure II-30 : $h(T)$ d'un matériau composite avec MCP (Tittlein, Gibout, Franquet, Johannes, et al. 2015).

II.3.4 Méthode inverse

D'une part, les tests expérimentaux permettent la mesure des flux de chaleur entrant et sortant de l'échantillon et des températures aux frontières en fonction du temps. D'autre part, le modèle numérique basé sur le modèle thermodynamique présenté dans la section précédente permet de simuler le comportement d'une paroi contenant un MCP (Tittlein, Gibout, Franquet, Johannes, et al. 2015). Une méthode inverse a été développée afin de déterminer les propriétés thermiques d'un matériau composite avec MCP en se basant sur les résultats expérimentaux et la simulation, pour un échantillon soumis à une contrainte thermique (Zalewski et al. 2019).

Les conditions initiales et aux limites pour la simulation sont les suivantes :

$$T = T^0 \quad \text{II-16}$$

$$\varphi_L^{num} = \frac{T_{p,L} - T_L}{R_L} \quad \text{II-17}$$

$$\varphi_R^{num} = \frac{T_{p,R} - T_R}{R_R} \quad \text{II-18}$$

Avec : T_p , la température de la plaque échangeuse et R, respectivement les résistances thermiques correspondantes pour les face gauche et droite, comme présenté sur la [Figure II-29].

C'est cette méthode inverse qui a été développée au laboratoire LGCgE de l'Université d'Artois. Le diagramme de la [Figure II-31] schématise le principe de cette méthode.

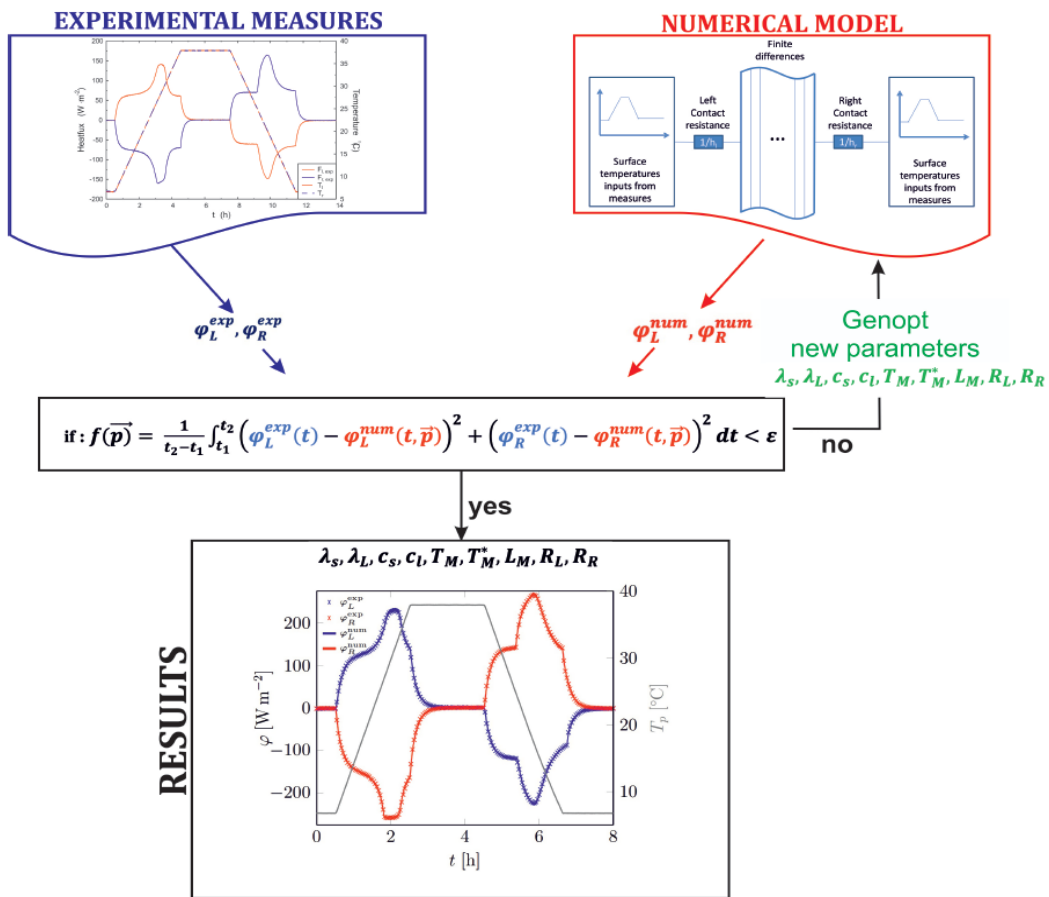


Figure II-31 : Diagramme de synthèse de la méthode inverse (Zalewski et al. 2019).

Le principe de base de cette inversion est de minimiser l'erreur des moindres carrés $f(\vec{p})$ formulée sur le diagramme. Le modèle inverse, implémenté dans l'outil GenOpt du laboratoire National Lawrence Berkeley, offre une adaptation automatique de la recherche des grandeurs ciblées pour obtenir des solutions acceptables tout en évitant des temps de calcul trop longs (Zalewski et al. 2019).

II.3.5 Résultats

Dans le cadre de l'appel à projet A2U, les échantillons de béton et d'enduit de chanvre avec et sans MCP ont été : fabriqués, séchés et stockés pendant 2 mois avant les tests. Les essais ont ensuite été réalisés au LGCgE de l'Université d'Artois. Les résultats des propriétés thermiques du béton de chanvre avec et sans MCP sont présentés brièvement, les informations détaillées pouvant être retrouvées dans (Toifane et al. 2019). Pour les enduits de chanvre avec et sans MCP, les résultats expérimentaux et numériques sont davantage détaillés. Tous les échantillons ont pour dimensions : 25*25*6 cm³.

II.3.5.1 Bétons de chanvre avec et sans MCP

Pour cette partie, l'étude a été réalisée sur trois bétons de chanvre : sans MCP (BC+0%MCP), avec 20%MCP (BC+20%MCP) et avec 40%MCP (BC+40%MCP) (Toifane et al. 2019).

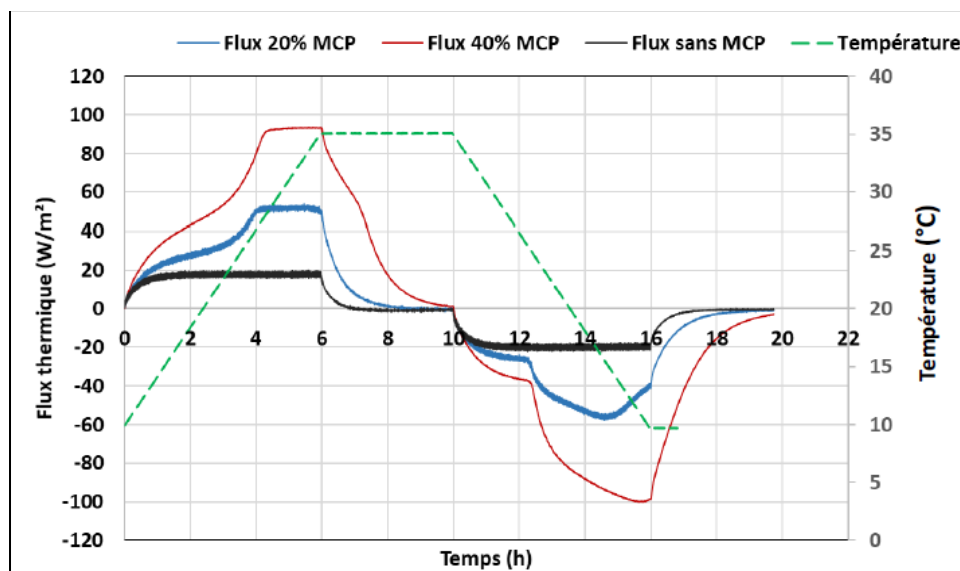


Figure II-32 : Evolution du flux thermique pour l'essai de la capacité thermique sur les BC+%MCP (Toifane et al. 2019).

Les résultats de la [Figure II-32] montrent l'évolution du flux thermique à la frontière des échantillons en fonction de la température imposée (identique sur chaque face). On peut observer sur les deux échantillons avec MCP des pics de flux thermique lorsque la température imposée avoisine la température de fusion du MCP (26 °C).

Les propriétés thermiques sont synthétisées dans le [Tableau II-10]. Ces résultats permettent de montrer que l'ajout du MCP dans le béton de chanvre améliore son inertie thermique grâce au stockage d'énergie par chaleur latente. On remarque cependant que l'ajout de MCP accroît la conductivité thermique, car les billes de MCP ont en partie comblé les pores du béton de chanvre. On peut souligner néanmoins que l'augmentation de la capacité thermique des parois d'un bâtiment est bénéfique pour l'amélioration du confort thermique d'été des occupants.

	ρ (kg/m ³)	T° fusion (°C)	λ (W/(m.K))	C _p (J/(kg.K))	L _F (J/kg)
BC + 0% MCP	370	-	0,12	1 428	-
BC + 20% MCP	441	26	0,14	C _S = 1 698	28 980
				C _L = 1 677	
BC + 40% MCP	596	26	0,18	C _S = 2 048	57 620
				C _L = 2 019	

Tableau II-10 : Propriétés thermiques des trois bétons de chanvre étudiés (Toifane et al. 2019).

II.3.5.2 Enduits de chanvre sans MCP

Comme indiqué sur la [Figure II-29], par convention, le flux de chaleur a été considéré positif de gauche à droite. Le côté gauche du matériau est noté E et le flux thermique FE, et le côté droit W avec le flux thermique FW.

Pour le béton de chanvre sans MCP, la [Figure II-33] (ci-après) présente l'évolution des températures imposées sur chaque face de l'échantillon, ainsi que les flux thermiques expérimentaux et calculés numériquement. L'essai débute après une stabilisation de l'échantillon à 35 °C (flux nuls). Puis, sont imposés successivement : un refroidissement simultané par pas de 5 °C toutes les 3 heures jusqu'à 20 °C sur les deux faces et un chauffage

dans les mêmes conditions jusqu'au retour à 35 °C sur la face E ; avec un décalage de 3 heures sur la face W.

On constate qu'à chaque changement de température, les flux thermiques sont stabilisés et égaux : le régime permanent est atteint. On peut voir également une parfaite adéquation entre les enregistrements expérimentaux et les résultats obtenus par le modèle. Ces résultats ont permis de déterminer les propriétés thermiques de l'enduit du chanvre HLCoat+0%MCP (sans MCP) : $\lambda = 0,424 \text{ W}/(\text{m.K})$ et $C_P = 1\,329 \text{ J}/(\text{kg.K})$.

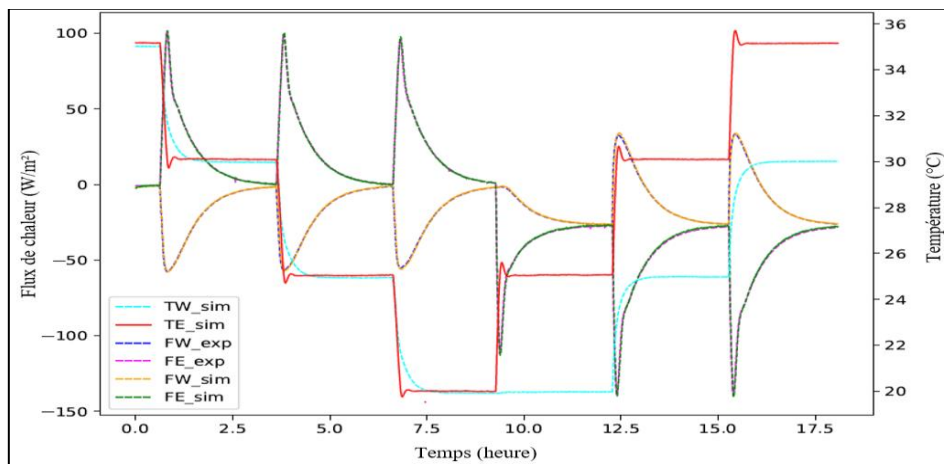


Figure II-33 : Evolution des flux de chaleur et de la température en fonction du temps pour le HLCoat+0%MCP.

En comparant au béton de chanvre sans MCP, la conductivité thermique de cet enduit est 3,5 fois plus grande ; ce qui s'explique par un ratio plus important de liant et moins de chènevotte. Néanmoins, la capacité calorifique est quasiment équivalente.

II.3.5.3 Enduit de chanvre avec MCP

Dans ce cas de figure, on a repris les mêmes sollicitations que pour les bétons de chanvre ; les conditions imposées en température sur les deux faces de l'échantillon sont identiques. La température imposée augmente de 10 °C jusqu'à 35 °C pendant 10 heures. Ensuite, elle est stabilisée à 35 °C pendant 3 heures puis redescendue pendant 10 heures à 10 °C. La [Figure II-34] présente l'évolution des températures et les résultats obtenus pour les flux de chaleur sur chaque face de l'échantillon pour l'enduit de chanvre avec 23% de MCP (HLCoat+23%MCP). Les courbes obtenues pour les deux autres enduits, HLCoat+11%MCP et HLCoat+40%MCP, sont similaires et ne sont pas représentées ici.

Sur cette figure, on note que les flux de chaleur droit (FW) et gauche (FE) sont bien symétriques. On remarque que, aux alentours de 25 °C, les courbes des flux de chaleur s'infléchissent lors de la montée en température ou présentent une discontinuité quand la température diminue. Ce changement de comportement correspond aux phases de changement d'état des microbilles de MCP. On remarque également un comportement non symétrique entre les étapes de fusion et de cristallisation. Ce comportement non symétrique peut être expliqué par le fait que la fonction d'enthalpie montre un comportement différent quand le MCP passe de l'état solide à l'état liquide et inversement (Zalewski et al. 2019).

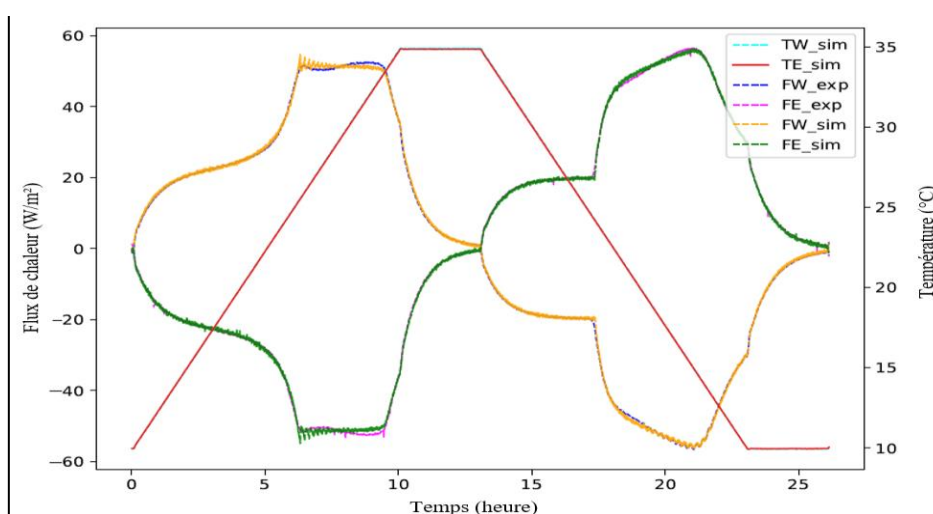


Figure II-34 : Evolution des flux de chaleur et de la température imposée en fonction du temps pour le HLCoat+23%MCP.

	ρ (kg/m ³)	T° fusion (°C)	λ (W/(m.K))	C _P (J/(kg.K))	L _F (J/kg)	Enthalpie à 30°C (J/kg)
HLCoat+0%MCP	1008	-	0,424	1 328,9	-	26 720,4
HLCoat+11%MCP	900,5	24,4	0,304	C _S = 1 491	12 951,1	42 068,6
				C _L = 1 436		
HLCoat+23%MCP	620,9	24,5	0,148	C _S = 1 577	32 034,5	61 769,2
				C _L = 1 526		
HLCoat+40%MCP	556,1	24,5	0,114	C _S = 1 608	46 766,7	76 258,5
				C _L = 1 560		

Tableau II-11 : Propriétés thermiques des enduits de chanvre avec et sans MCP.

Les propriétés thermiques des enduits de chanvre sans et avec MCP obtenues à l'aide de la méthode inverse sont regroupées dans le [Tableau II-11]. La température de fusion (T_M dans le modèle) obtenue pour les enduits avec MCP est de 24.5 °C. Cette valeur est plus faible mais assez cohérente avec celle obtenue (température de fusion = 25.5 °C) sur l'enduit de ciment intégrant le même MCP par (Zalewski et al. 2019).

La [Figure II-35] compare la variation de la capacité thermique en fonction du % MCP. On peut facilement remarquer que l'ajout du MCP dans l'enduit de chanvre augmente la capacité thermique. En plus, les capacités thermiques en phase solide et liquide (C_S et C_L) sont très proches. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans les études récentes (Zalewski et al. 2019; Abdellatef et Kavgic 2020). Pour la valeur C_S , on peut observer une augmentation de 11% pour le HLCcoat+11%MCP, 16% pour HLCcoat+23%MCP et 17% pour le HLCcoat+40%MCP par rapport au HLCcoat+0%MCP.

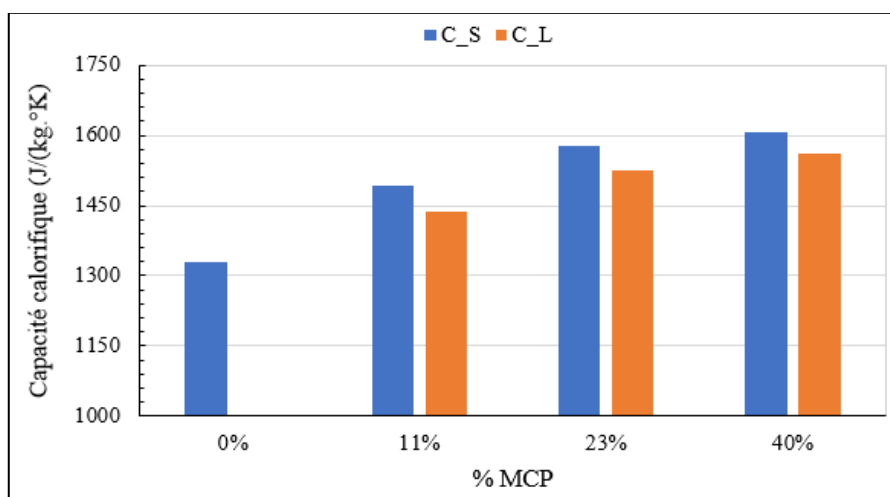


Figure II-35 : Evolution de la capacité thermique en fonction du taux de MCP dans l'enduit.

La [Figure II-36] présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de MCP. Contrairement au béton de chanvre avec MCP étudié dans ce travail et à ceux étudiés dans les études récentes (Abdellatef et Kavgic 2020; Sawadogo et al. 2022), plus le pourcentage de MCP augmente, plus la conductivité thermique de l'enduit de chanvre diminue car sa masse volumique diminue. On remarque aussi que les conductivités thermiques (liquide et solide) liées au changement de phase du MCP sont très proches. D'autre part, le [Tableau II-11] permet de remarquer que la conductivité thermique solide diminue de 28% pour

le HLCoat+11%MCP, 65% pour HLCoat+23%MCP et 73% pour le HLCoat+40%MCP par rapport au HLCoat+0%MCP.

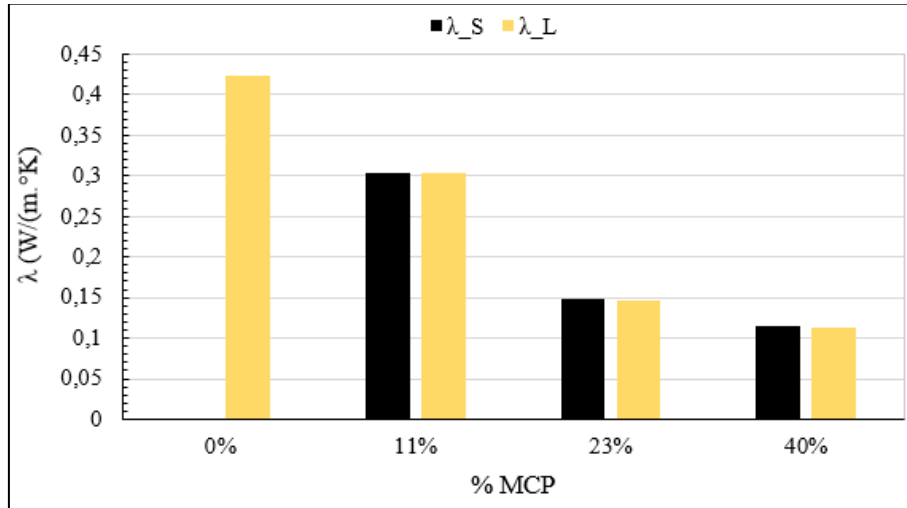


Figure II-36 Evolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de MCP dans l'enduit.

D'autre part, comme observé sur le béton de chanvre avec MCP, on peut remarquer une forte augmentation de la chaleur latente de l'enduit de chanvre en fonction du pourcentage de MCP.

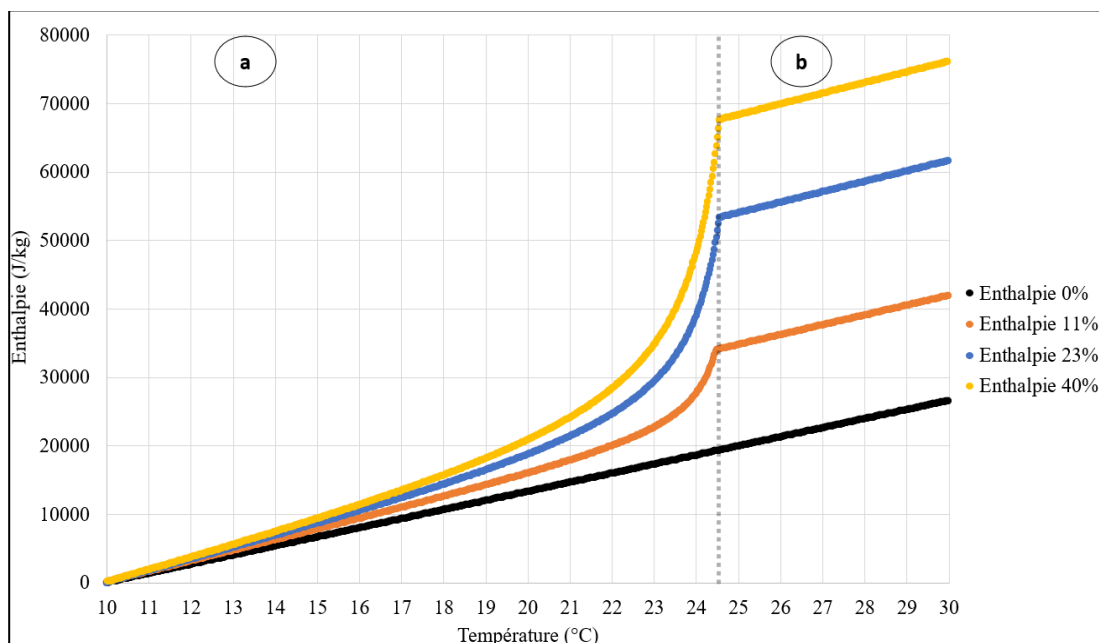


Figure II-37 : Evolution de l'enthalpie en fonction de température pour des HLCoat+%MCP.

Enfin, la [Figure II-37] présente les enthalpies calculées pour les enduits de chanvre avec et sans MCP. Sur cette figure, on peut facilement remarquer que l'enthalpie augmente en fonction du taux de MCP présent dans l'enduit de chanvre. De plus, l'allure des courbes des enduits avec MCP est complètement différente de celle de l'enduit sans MCP. Ces courbes sont similaires à celles retrouvées dans la littérature (Franquet, Gibout, Tittlein, et al. 2014; Zalewski et al. 2019).

On peut tout aussi remarquer que durant l'étape avant la fusion complète du MCP dans le matériau (la partie **(a)** des courbes) l'enthalpie du matériau s'accroît d'abord progressivement puis rapidement pendant le changement de phase. Après la fusion complète (la partie **(b)** des courbes) l'allure des courbes d'enthalpie est semblable à celle du HLCcoat+0%MCP avec une pente unique. Ainsi, à 30 °C, l'enthalpie de l'enduit de chanvre avec MCP est supérieure de 157.5 % pour le HLCcoat+11%MCP, 231.2 % pour HLCcoat+23%MCP et 285.4% pour le HLCcoat+40%MCP comparativement à celle du HLCcoat+0%MCP.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude expérimentale des performances mécaniques du béton de chanvre après ajout du MCP dans sa matrice et aussi à celle expérimentale et numérique de l'évolution des propriétés thermiques de l'enduit et du béton de chanvre avec et sans MCP.

D'une part, l'étude du comportement du béton de chanvre avec et sans MCP en compression a permis de démontrer que ce dernier ne peut pas être utilisé comme matériau porteur. Cette remarque est justifiée par ses faibles propriétés en compression (résistance < 1 MPa). Néanmoins, l'ajout du MCP dans la formulation améliore sensiblement la résistance à la compression et le module de Young quelle que soit la direction de l'effort appliqué. Toutefois, il pourrait être intéressant d'approfondir cette étude par des essais de flexion sur les éprouvettes, voire par des tests en cisaillement sur le matériau en fonction du taux de MCP.

D'autre part, les études menées pour l'évaluation des propriétés thermiques des matériaux ont montré l'importance de l'impact induit par l'ajout de MCP. L'incorporation du matériau à changement de phase permet en effet d'augmenter considérablement la capacité de stockage de chaleur du béton et de l'enduit à base de chanvre. En somme, l'ajout d'un MCP dans la

formulation permet de renforcer l'inertie thermique de ce matériau, et donc d'amortir les variations de température ambiante, dès lors qu'un changement d'état du MCP intervient.

Toujours dans l'optique d'améliorer le confort dans les bâtiments, nous allons nous intéresser à l'impact que peut avoir l'ajout de ce MCP sur les propriétés hydriques de nos matériaux. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III Caractérisation des propriétés hydriques des matériaux

Le chapitre précédent a présenté d'une part l'évolution des propriétés mécaniques du béton de chanvre après l'ajout du MCP et d'autre part l'évolution des propriétés thermiques du béton et de l'enduit de chanvre après l'ajout du MCP tout en suscitant plusieurs autres questionnements. Dans ce chapitre, on tentera de répondre à la question de l'impact du MCP sur les propriétés hydriques du béton et de l'enduit de chanvre.

L'étude détaillée des propriétés hydriques des bétons et des enduits de chanvre avec et sans MCP porte sur : la sorption, la perméabilité à la vapeur d'eau et la MBV. Cette étude a été menée au Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV).

III.1 Stockage et transfert d'humidité en milieu poreux

III.1.1 Stockage d'humidité

Les matériaux poreux, tels que le béton et l'enduit de chanvre avec une porosité ouverte, ont la propriété de stocker et céder de la vapeur d'eau en fonction des conditions en humidité relative de l'air environnant. Cette fixation et libération des molécules d'eau entraînent une augmentation et diminution de la masse apparente du matériau, communément appelées respectivement adsorption et désorption. Cette propriété est traduite par les isothermes de sorption qui représentent les courbes d'équilibre hygrique du matériau et de l'air ambiant dans des conditions isothermes.

La fixation d'eau sur le matériau se fait physiquement ou chimiquement (résultat d'une réaction chimique en surface du matériau). La fixation physique de l'eau dans un matériau s'effectue en trois étapes : elle débute avec une adsorption mono-moléculaire ou monocouche, suivie d'une adsorption multicouche ou poly-moléculaire et se termine par une condensation capillaire (Collet 2004; Cerezo 2005; Chamoin 2010), [Figure III-1].

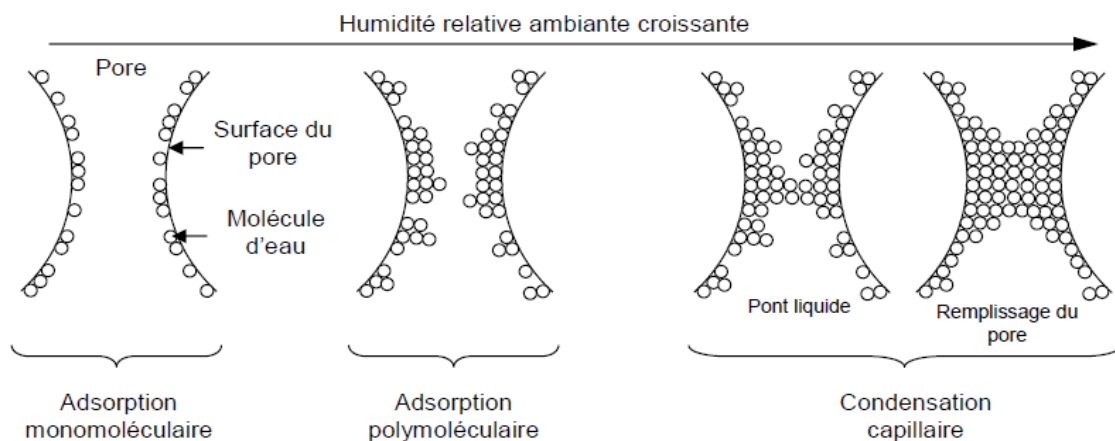


Figure III-1 : Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore (Collet 2004).

L'adsorption mono-moléculaire s'explique par la théorie de LANGMUIR [Tableau III-1] (Langmuir 1918). Elle permet de modéliser l'adsorption de la première couche de molécules d'eau à de faibles humidités relatives. La théorie de LANGMUIR considère les vitesses

d'évaporation et de condensation à la surface du solide égale pour démontrer que les molécules d'eau sont toutes liées au solide par la chaleur latente de liaison molaire.

En renfort de la théorie de LANGMUIR, la théorie de BET reprend le fait que les molécules de la première couche sont bien liées au solide par la chaleur molaire alors que celle des autres couches sont liées entre elles par une chaleur molaire latente de vaporisation [Tableau III-1] (Brunauer, Emmett, et Teller 1938). Cette théorie permet de décrire la sorption polymoléculaire qui prend place dans le matériau après l'adsorption mono-moléculaire, telle que représentées par la [Figure III-1].

	Application	Equations
Langmuir	Adsorption Mono-moléculaire (HR < 20 %)	$w = \frac{w_m HR \exp\left(\frac{\bar{Q}_L}{RT}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\bar{Q}_L}{RT}\right) HR}$ <p>Où : \bar{Q}_L est la chaleur molaire latente, HR est l'humidité relative, w_m est la teneur en eau, R est la constante des gaz parfait et T la température.</p>
BET	Adsorption Poly-moléculaire (10 < HR < 40 %)	$w = \frac{w_m HR \exp\left(\frac{\bar{Q}_L - \bar{Q}_{LV}}{RT}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\bar{Q}_L - \bar{Q}_{LV}}{RT}\right) HR}$ <p>Où : \bar{Q}_{LV} est la chaleur molaire latente de vaporisation</p>
GAB	Adsorption Poly-moléculaire (HR < 90 %)	$w(HR) = \frac{w_m C k HR}{(1 - k HR)(1 + (C - 1) k HR)}$ <p>Avec : C et k les paramètres d'ajustement du modèle.</p>
Van Genuchten	Condensation capillaire (80 % < HR)	$w = w_{rés} + (w_{sat} - w_{rés}) \left(1 + \left(\frac{\alpha R T}{\bar{M}_{l.g}} \ln(HR) \right)^n \right)^m$ <p>Où : $w_{rés}$ et w_{sat} la teneur en eau résiduelle et celle en saturation ; $\bar{M}_{l.g}$ est la masse molaire de l'eau liquide ; a, n et m sont les coefficients empiriques dépendant du matériau.</p>
Künzel	Condensation capillaire (0 < HR < 100 %)	$w(HR) = w_f \frac{(b - 1) HR}{b - HR}$ <p>Où : w_f est la teneur en eau de saturation libre à 100% HR et b un coefficient empirique supérieure à 1.</p>

Tableau III-1 : Synthèse des modèles pour le lissage des courbes de sorption.

Tout comme la théorie de BET, la théorie de GAB (Guggenheim, Anderson et De Boer) et celle de GDW (Generalised D'Arcy and Watt model) viennent aussi renforcer la théorie de LANGMUIR (Anderson 1946; d'Arcy et Watt 1970; Furmaniak et al. 2007). Le modèle de GAB tient compte de la chaleur d'adsorption des couches moléculaires, alors que celui de GDW suppose que les molécules d'eau peuvent être elles-mêmes des sites d'adsorption secondaire pour de nouvelles molécules après le site d'absorption primaire.

Cependant, les théories de LANGMUIR, BET et GDW ne sont physiquement vérifiées que pour des faibles humidités relatives (environ jusqu'à 50%RH). Pour décrire l'adsorption et la condensation capillaire aux humidités relatives élevées, on peut utiliser : le modèle de GAB, le modèle de Van Genuchten (Van Genuchten 1980), le modèle de BJH (Barrett Joyner et Halenda) ou le modèle de Kunzel présentés sur le [Tableau III-1].

En effet, la relation de Laplace considère les tensions superficielles à l'interface entre la phase liquide et celle gazeuse alors que la loi de l'équilibre des phases restreintes à la phase capillaire de Kelvin relie l'humidité relative à la pression capillaire. Dans la même optique, la relation de BJH considère l'adsorption physique sur les parois des pores ainsi que la condensation capillaire à l'intérieur des pores, tout en s'appuyant sur une hypothèse de pores cylindriques régulièrement connectés.

En somme, tous ces modèles permettent de modéliser l'adsorption dans les matériaux poreux selon la zone d'humidité relative étudiée. Dans notre cas, la théorie de GAB est considérée, comme pour la plupart des auteurs travaillant sur les bétons biosourcés, comme la mieux adaptée pour la modélisation des isothermes de sorption à température constante pour application dans le bâtiment.

III.1.2 Transfert d'humidité

Dans un milieu poreux, tel que le béton de chanvre, le transfert de l'eau en phase vapeur est dû principalement au gradient de concentration de vapeur d'eau alors que le transfert en phase liquide se produit sous l'effet d'un gradient de pression capillaire. Ces transferts peuvent avoir lieu en régime transitoire ou en régime permanent. Dans notre cas, nous n'allons nous concentrer que sur les transferts à températures constantes (isothermes).

Pour décrire les phénomènes de transfert dans un milieu poreux deux approches peuvent être envisagées : l'approche microscopique et l'approche macroscopique (Collet 2004). Dans le cadre de cette étude, on se concentre sur l'approche macroscopique permettant une liaison entre le flux d'humidité moyen et le gradient de potentiel moyen.

A. Transfert d'humidité en phase vapeur

En rappel, l'air humide peut être considéré comme un mélange de deux gaz parfaits : l'air sec (mélange de gaz considérés comme parfaits) et la vapeur d'eau. Pour la vapeur d'eau, on peut donc écrire la relation suivante entre la pression partielle de vapeur, la température et sa masse volumique :

$$\frac{P_v}{\rho_v} = \frac{RT}{\bar{M}_v} \quad \text{III-1}$$

Où : P_v est la pression de vapeur en [Pa], ρ_v est la masse volumique de vapeur en [kg/m^3] et \bar{M}_v est la masse molaire de vapeur en [kg/mol].

Le transport de vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de concentration est décrit par la loi de Fick généralisée :

$$g_v = -D_v \nabla \rho_v \quad \text{III-2}$$

Avec : g_v , la densité de flux massique de vapeur en [$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$] et D_v , coefficient de diffusion de vapeur d'eau en [m^2/s].

En combinant les deux relations précédentes, on obtient l'expression suivante de la loi de Fick en fonction de la pression de vapeur :

$$g_v = -D_v \nabla \left(\frac{\bar{M}_v}{RT} P_v \right) = -D_v \frac{\bar{M}_v}{RT} \nabla P_v \quad \text{III-3}$$

Dans un milieu poreux, on peut exprimer le coefficient de diffusion de vapeur comme étant proportionnel au coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air libre (D_0) et du nombre de Knudsen. Ce nombre de Knudsen (K_n) exprime le rapport entre le libre parcours moyen des molécules (L_{pm}) et le diamètre des pores (d_p en m) du matériau.

$$D_v = \frac{D_0}{1 + k_n} \text{ avec } K_n = \frac{L_{pm}}{d_p} \quad \text{III-4}$$

$$\text{Où : } K_n = \frac{L_{pm}}{d_p} \quad \text{III-5}$$

$$\text{Avec : } L_{pm} = \frac{1}{\sqrt{2} \delta \sigma_p^2 n_m} = \frac{kT}{\sqrt{2} \delta \sigma_p^2 n_m * PT} \text{ et } K = \frac{R}{N}$$

Où : σ_p est le rayon de la sphère de protection de la molécule [Å], n_m est le nombre de molécule, k est la constante de Boltzmann et D_0 Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air libre en [m²/s].

Ainsi, le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air peut se calculer à partir du libre parcours moyen, comme suite :

$$D_0 = \frac{L_{pm}}{3} \sqrt{\frac{8 R T}{\delta \bar{M}}} \quad \text{III-6}$$

Avec : δ , la perméabilité à la vapeur d'eau en [kg/(m.s.Pa)].

Par De Vries, ce coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air peut aussi s'évaluer à partir de l'état de référence comme suite (Philip et De Vries 1957) :

$$D_0(T, P) = D_0(T_0, P_0) \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^a \quad \text{III-7}$$

Selon De Vries, $a = 1,88$ pour l'état de référence c'est à dire $T_0 = 273,15 \text{ K}$ et $P_0 = 101\,325 \text{ Pa}$; ce qui permet d'obtenir $D_0(T_0, P_0) = 21,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Le nombre de Knudsen, quant à lui, permet de distinguer trois domaines de transfert dans un milieu poreux :

- Si $K_n \gg 1$ ou $d \ll L_{pm}$: le transport de Knudsen se fait par effusion. Durant ce transfert le nombre de chocs entre les molécules et les parois est très supérieur au nombre de chocs entre molécules. De ce fait, le transport des molécules dépend du nombre de collisions sur les parois des pores. Alors, le calcul de la densité de flux massique s'effectue, comme suit :

A l'échelle microscopique :

$$g_v = -\frac{D_0}{k_n} \nabla \rho_v = \frac{D_0}{\frac{L_{pm}}{d_p}} \nabla \rho_v \quad \text{III-8}$$

A l'échelle macroscopique :

$$g_v = -\delta_{v_diff} \nabla P_v \quad \text{III-9}$$

- Si $K_n \ll 1$ ou $d \gg L_{pm}$: le transfert se fait par diffusion moléculaire libre, transfert durant lequel les collisions molécules-parois sont négligeables face aux collisions intermoléculaires. Dans ce cas, la densité de flux massique se calcule à l'aide de la loi de Fick appliquée à la diffusion de vapeur d'eau dans l'air, comme suite :

A l'échelle microscopique :

$$g_v = -D_0 \nabla \rho_v \quad \text{III-10}$$

A l'échelle macroscopique :

$$g_v = -\delta_{v_eff} \nabla P_v \quad \text{III-11}$$

- Si $K_n \equiv 1$ ou $d \equiv L_{pm}$: le transfert se fait par diffusion mixte (ou domaine de transition). Dans ce cas, le transport des molécules est déterminé à la fois par les collisions entre molécules et parois et par celles entre molécules. Alors, la densité de flux massique se calcule à l'aide de l'équation de Fick généralisée.

Le transfert de vapeur d'eau se fait par effusion et diffusion d'où la densité de flux de vapeur totale à travers un milieu poreux s'exprime par :

$$g_{v\ tot} = g_{v_diff} + g_{v_eff} = (\delta_{v_diff} + \delta_{v_eff}) \nabla P_v \quad \text{III-12}$$

Selon les études de Collet (Collet 2004), 70% du volume total des pores accessible dans le béton de chanvre ont des dimensions comprises entre 0,18 et 4,53 μm ($0,18 < d_p < 4,53$). Ce qui justifie le transfert de vapeur par deux mécanismes différents dans le béton de chanvre :

l'effusion et la diffusion. Parmi ces deux mécanismes, le transfert par la diffusion est le plus prépondérant.

B. Transfert d'humidité en phase liquide

La présence d'eau sous forme liquide dans le milieu poreux peut être due à la condensation capillaire. Dans un milieu poreux, l'eau absorbée présente une très faible mobilité. Alors que l'eau présente par condensation capillaire s'écoule dans les pores sous l'effet d'un gradient de pression liquide.

En assimilant un pore à un tube de rayon r , et en l'absence de force extérieure, le débit massique d'un écoulement laminaire au sein du tube est décrit par la loi de Poiseuille :

A l'échelle microscopique :

$$g_L = -\rho_L \frac{r^2}{8\mu} \nabla P_L \quad \text{III-13}$$

A l'échelle macroscopique :

$$g_L = -\frac{\rho_L r_v T}{P_v} k_L \nabla P_v \quad \text{III-14}$$

Avec : g_L , la densité de flux massique liquide ; P_L , la pression liquide en [Pa] ; k_L , la conductivité hydraulique $k_L = \frac{\delta_l}{\mu}$ [m/s] ; μ , la viscosité dynamique du fluide en [Pa.s] et r , le rayon en [m].

C. Flux total d'humidité

Ainsi, si on ne considère comme moteur du transfert d'humidité dans un matériau poreux que la pression de vapeur d'eau, le flux total d'humidité représente la somme des flux de vapeur et de liquide :

$$g_{tot} = g_{v_{diff}} + g_{v_{eff}} + g_L \quad \text{III-15}$$

$$\text{Soit : } g_{tot} = -\left(\delta_{v_{diff}} + \delta_{v_{eff}} + \frac{\rho_L r_v T}{P_v} k_L\right) \nabla P_v = -\delta \nabla P_v \quad \text{III-16}$$

Et, en regroupant les trois termes de diffusion suivants :

- ✓ Perméabilité à la vapeur par diffusion moléculaire,
- ✓ Perméabilité à la vapeur par effusion,
- ✓ Terme relatif au transport par écoulement liquide.

III.1.3 Diffusion hydrique isotherme

Selon Philip et De Vries dans des conditions isothermes le flux d'humidité peut s'écrire (Philip et De Vries 1957) :

$$g_h = - \rho_w D_u \nabla u \quad \text{III-17}$$

Avec : ρ_w la masse volumique de l'eau (kg/m^3).

D'autre part, l'équation de conservation de masse s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div} (D_u \nabla u) \quad \text{III-18}$$

Dans ce cas où le liquide est de l'eau, la teneur en eau volumique (u) est égale à : $u = \frac{\rho_0}{\rho_w} w$

Le flux d'humidité peut s'écrire sous la forme suivante :

$$g_h = - \rho_0 D_u \nabla w \quad \text{III-19}$$

En monodimensionnel, cette expression s'écrit (Collet 2004) :

$$g_h = - \rho_0 D_u \frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{III-20}$$

La relation entre l'humidité relative ambiante et la teneur en eau du matériau définie par les isothermes de sorption est dérivable sur l'ensemble du domaine hygroscopique. Par conséquent, on peut écrire :

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial x} \quad \text{III-21}$$

Si on combine cette relation à l'équation du flux d'humidité monodimensionnel, on aboutit à l'expression suivante :

$$g_h = -\rho_0 D_u \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial x} \quad \text{III-22}$$

De plus, le flux total d'humidité regroupant les trois termes de diffusion s'écrit en monodimensionnel comme suite :

$$g_h = -\delta \nabla P_v = -\delta \left(\frac{P_{v2} - P_{v1}}{e} \right) \quad \text{III-23}$$

$$\text{En posant : } -\rho_0 D_u \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial x} = -\delta \frac{P_{v2} - P_{v1}}{e} \quad \text{III-24}$$

$$\text{Avec : } HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad \text{et} \quad \frac{\partial HR}{\partial x} = \frac{HR_2 - HR_1}{e}$$

On aboutit à l'équation de la diffusivité hydrique suivante :

$$D_u = \frac{\delta P_{vs}}{\rho_0} \frac{1}{\frac{\partial w}{\partial HR}} \quad \text{III-25}$$

Avec : $\frac{\partial w}{\partial HR}$, la dérivée de l'isotherme de sorption.

Cette section vient de présenter de façon brève les principes physiques et formules retenus pour la suite de ce chapitre.

III.2 Isothermes de sorption

III.2.1 Méthodologie expérimentale

III.2.1.1 Méthode de mesure des isothermes

Pour obtenir des isothermes de sorption (adsorption/désorption) de nos matériaux poreux, on impose une humidité relative dans une ambiance et on pèse les échantillons jusqu'à atteindre l'équilibre hygroscopique. Pour ce faire, on place les échantillons dans un dessiccateur (enceinte hermétiquement fermée) comprenant une solution saline permettant d'obtenir une humidité relative donnée, et une grille sur laquelle reposent les échantillons. Cette méthode permet de calculer, lorsque l'équilibre est atteint, la teneur en eau du matériau en fonction de l'humidité relative.

Dans notre cas, pour déterminer les isothermes de sorption des bétons de chanvre avec et sans MCP, la mesure s'est faite par paliers successifs d'humidité relative croissante. Alors que pour les enduits de chanvre (avec et sans MCP), la mesure a dû s'effectuer pour chaque palier d'humidité à partir de l'état sec. Compte tenu des délais nécessaires pour obtenir l'équilibre hygrique, les essais en phase de désorption n'ont pas pu être menés à terme.

La norme ISO 12571 : 2013 [E] préconise quatre atmosphères différentes pour les paliers d'humidité relative considérés et une variation de masse inférieure à 0,1% de la masse totale de l'échantillon pour deux mesures consécutives (avec un intervalle de 24 heures). Pour l'obtention des isothermes d'adsorption des bétons de chanvre avec et sans MCP, nous avons imposé six paliers d'humidité relative : 33%, 43%, 56%, 68%, 81,5%, et 97% HR. Pour les enduits de chanvre avec et sans MCP, un palier supplémentaire a été ajouté : 33%, 48%, 56%, 68%, 75%, 81% et 92,5% HR. Toutes les mesures ont été réalisées à température constante de 23 °C.

A l'instar de Collet (Collet 2004) pour la bauge, nous avons poussé l'expérimentation jusqu'à ce que la variation de masse entre trois pesées consécutives à 24h d'intervalle, soit inférieure à 0,01% de la masse totale des échantillons, pour considérer l'équilibre atteint. Dans certains cas, une variation de masse négative était considérée comme nulle.

- **Expérimentation**

La pesée des échantillons pour déterminer la teneur en eau par palier se fait sur des échantillons cubiques ($4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$) à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de $0,0001\text{g}$ conforme à la norme. Cette balance est dotée d'une cage en verre qui permet de protéger les échantillons des échanges avec l'ambiance. De plus, les échantillons friables sont placés sur une petite coupelle en aluminium afin d'éviter la perte de matière lors de la pesée, [Figure III-2].



Figure III-2 : Dispositif expérimental de mesure de sorption et système de contrôle des humidités de consigne.

Pour l'étude sur l'adsorption des bétons de chanvre avec et sans MCP, le séchage des échantillons est réalisé uniquement avant le placement dans l'ambiance à 33% d'humidité. Alors que pour l'enduit de chanvre avec et sans MCP, le séchage est réalisé avant chaque palier. La masse sèche est obtenue en plaçant les échantillons dans une étuve à 65 °C jusqu'à ce que la variation de la masse soit inférieure à 0,01% entre trois mesures consécutives sur 72h. Les solutions salines sont préparées avec de l'eau distillée, conformément aux spécifications de la

norme ISO 12571 : 2013 [E]. Les conditions ambiantes à l'intérieur des dessiccateurs sont contrôlées à l'aide d'un capteur de température et d'humidité relative relié à une centrale d'acquisition dotée d'un écran d'affichage, [Figure III-2].

On peut voir sur la [Figure III-2] des dessiccateurs avec et sans condition sous-vide :

- ✓ Pour la mesure des isothermes d'adsorption sur les bétons avec et sans MCP, nous avons utilisé un dessiccateur relié à une pompe à vide. Cette condition permet d'homogénéiser l'ambiance intérieure du dessiccateur rapidement et donne l'avantage de pouvoir faire les mesures consécutives avec un pas de temps de 48 h.
- ✓ Pour les enduits de chanvre avec et sans MCP, nous avons utilisé des dessiccateurs non munis du dispositif de mise en condition sous-vide, mais nous avons pu lancer les sept paliers d'humidité relative simultanément. L'ambiance du dessiccateur se stabilise au bout d'une semaine, mais l'équilibre de l'échantillon peut prendre plusieurs semaines, en raison notamment de la présence de micropores.

III.2.1.2 Modélisation des isothermes de sorption

L'évolution de la masse totale de l'échantillon en fonction du temps conduit à la quantité d'eau absorbée par l'échantillon (Collet 2004; Chamoin 2010). La teneur en eau massique est donnée par :

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \quad \text{III-26}$$

Avec : w : teneur en eau en [kg/kg], m : masse apparente de l'échantillon saturé en HR en [kg], et m_s : masse de l'échantillon sec (kg).

A chaque palier d'humidité relative, on peut déterminer facilement la teneur en eau à l'instant t , comme suit :

$$w(t) = w_i + \Delta w(t) \quad \text{III-27}$$

$$\Delta w(t) = a[1 - b e^{-c t}] \quad \text{III-28}$$

Avec : $w(t)$: la teneur en eau à l'instant t ; w_i : la teneur en eau initiale du palier, $\Delta w(t)$: variation de la teneur en eau entre l'instant initial et l'instant (t) pour le palier ; a , b et c : sont des paramètres d'ajustement par la méthode des moindres carrés.

Comme plusieurs autres chercheurs (Collet et al. 2013; Lelièvre 2015; Colinart et Glouannec 2017; Maaroufi 2020), nous avons utilisé le modèle GAB pour modéliser les isothermes de sorption. Pour ce faire, des paramètres d'ajustement sont nécessaires. Et, pour obtenir ces paramètres, nous avons utilisé la régression linéaire minimisant la somme des carrés résiduels d'activité de l'eau dans la plage de 0 à 1. Ce modèle est décrit par l'équation suivante :

$$w(HR) = \frac{w_m C k HR}{(1 - k HR)(1 + (C - 1) k HR)} \quad \text{III-29}$$

Avec : w_m : la teneur en eau mono-moléculaire (%); HR : humidité relative (%); C et k : sont des paramètres de lissage du modèle.

III.2.2 Résultats

III.2.2.1 Bétons de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP)

A. Teneur en eau

La cinétique d'adsorption reste la même pour le : BC+0%MCP, BC+20%MCP et BC+40%MCP. De plus, il a fallu plus de 800 jours (30 mois) pour atteindre l'équilibre hydrique du matériau à chaque palier d'humidité relative ; allant de 33 à 97% HR. Malgré la longue durée du processus d'adsorption, aucune moisissure n'a été remarquée sur les échantillons.

Les valeurs des teneurs en eau expérimentales sont données dans le [Tableau III-2]. On peut facilement remarquer que la teneur en eau du béton de chanvre diminue en fonction de la quantité du MCP ajouté dans sa matrice.

RH (%)	w_exp (kg/m ³)		
	BC+0%PCM	BC+20%PCM	BC+40%PCM
33	0,800	0,742	0,749
43	1,271	1,160	1,074
56	2,045	1,850	1,700
68	2,283	2,085	1,892
81,5	3,601	3,409	3,169
97	8,672	7,525	7,176

Tableau III-2 : Teneur en eau d'adsorption expérimentale des bétons de chanvre avec et sans MCP.

En complément aux valeurs du tableau, l’histogramme de la [Figure III-3] vient illustrer clairement qu’aux humidités relatives comprises entre 33 et 68% HR, une augmentation progressive de la teneur en eau se fait en fonction de la pression partielle de vapeur d’eau. Ce qui démontre que, comme pour le BC+0%MCP, dans le BC+20%MCP et BC+40%MCP, il y a aussi un épaissement progressif de la couche d’eau absorbée à la surface des pores. Alors qu’au-delà de 82% HR, on remarque que la teneur en eau du BC+0%MCP est plus importante que dans les autres formulations. Cette différence montre que la condensation capillaire est plus importante dans le BC+0%MCP que dans le BC+20%MCP et le BC+40%MCP.

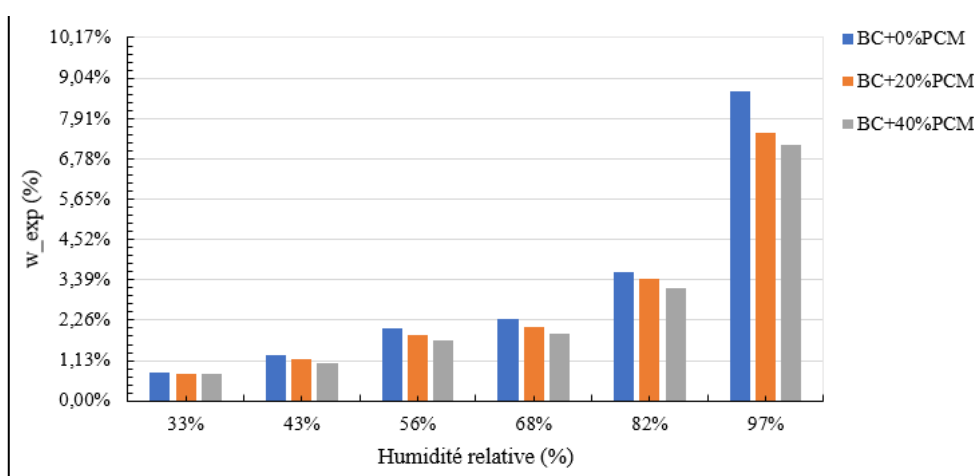


Figure III-3 Evolution de la teneur en eau dans les BC+%MCP en adsorption.

B. Lissage par le modèle de GAB

Les courbes d’ajustements sont obtenues en utilisant les coefficients d’adaptation du modèle de GAB présentés sur le [Tableau III-3].

	ρ_0 (kg/m ³)	GAB adsorption coefficients			Coefficient R ²	Ecart-type
		k	C	w _m (%)		
BC+0%MCP	397	0,99	8	0,800	0,95	0,003
BC+20%MCP	445	0,98	8	0,742	0,97	0,002
BC+40%MCP	591	0,95	9	0,749	0,98	0,001

Tableau III-3 : Paramètres de lissage du modèle de GAB pour les BC+%MCP.

Ces coefficients permettent d’estimer la teneur en humidité d’équilibre en absorption pour chaque matériau. Ces derniers ont été obtenus en se basant sur la moyenne des coefficients de

corrélation R^2 (>80%) des courbes de tendance (linéaire, polynomiale (2nd degré) et exponentielle) de la courbe expérimentale. Cette moyenne a été utilisée comme le coefficient k et le coefficient C représente le coefficient directeur de l'équation ($y = Cx + B$) de linéarisation des points d'adsorption expérimentale de chaque matériau étudié. Avec ces deux constantes, on arrive à obtenir des courbes d'ajustements cohérentes avec les résultats expérimentaux.

RH (%)	BC+0%PCM		BC+20%PCM		BC+40%PCM	
	w_exp_moy (%)	w_GAB (%)	w_exp_moy (%)	w_GAB (%)	w_exp_moy (%)	w_GAB (%)
33	0,800	0,945	0,742	0,869	0,749	0,877
43	1,271	1,192	1,160	1,095	1,074	1,090
56	2,045	1,632	1,850	1,491	1,700	1,457
68	2,283	2,309	2,085	2,093	1,892	1,993
81,5	3,601	4,133	3,409	3,666	3,169	3,284
97	8,672	20,055	7,525	14,925	7,176	9,447

Tableau III-4 : Evaluation de la cohérence entre l'ajustement de GAB et les résultats expérimentaux des BC+%MCP.

Les écart-types entre les valeurs expérimentales et le modèle sont très proches de zéro, ce qui confirme que le modèle de GAB assure un parfait ajustement des courbes de sorption des bétons de chanvre avec et sans MCP. Le [Tableau III-4] présente les teneurs en eau expérimentales moyennes et les teneurs en eau d'ajustement de GAB pour chaque palier d'humidité relative.

C. Isothermes de sorption

Les points d'adsorption expérimentaux et les courbes d'ajustement avec le modèle GAB obtenus pour les bétons de chanvre avec et sans MCP sont présentés sur la [Figure III-4]. Toutes les valeurs expérimentales sont très proches de l'ajustement pour toutes les formulations, excepté pour le taux d'humidité élevé à 97% HR. En se basant sur le classement des isothermes de sorption de l'IUPAC (Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée) (Sing 1985), ces courbes sont très proches de la courbe de type II. Elle représente la forme normale des

isothermes obtenues sur des matériaux macroporeux en adsorption mono et multicouche sans restriction.

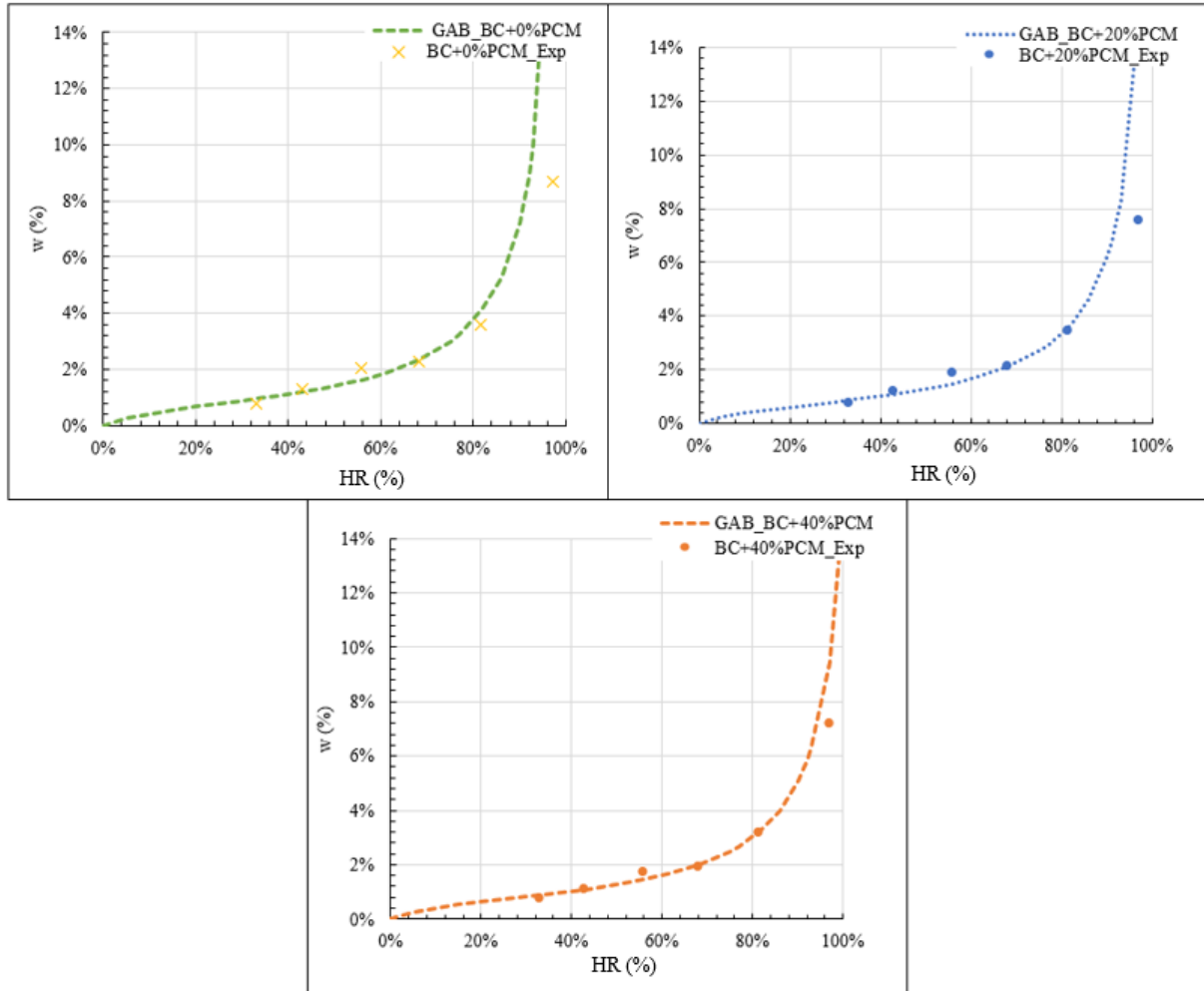


Figure III-4 : Isothermes d'adsorption des bétons de chanvre avec et sans MCP.

De plus, sur cette même figure, on remarque que les isothermes d'adsorption des trois matériaux sont proches les unes des autres et ont la même allure. On peut donc affirmer que la microstructure du béton de chanvre avec MCP reste similaire à celle du béton de chanvre classique. Aussi, en raison des conditions initiales des matériaux, l'adsorption de vapeur d'eau augmente progressivement en fonction de l'humidité relative de la même façon dans les trois matériaux. Ainsi, dans la plage de 33 à 81% HR, la teneur en eau du BC+20%MCP est proche de celle du BC+0%MCP. Alors qu'au-delà de 81% HR, la teneur en humidité du BC+0%MCP est plus importante que celle des BC+20%MCP et BC+40%MCP. En plus, à 97% HR, la teneur en eau expérimentale du BC+0%MCP est de 8,67% alors que celle du BC+20%MCP est de

7,52% contre 7,17% pour le BC+40%MCP. Malgré la diminution de la capacité d'adsorption du béton de chanvre par l'ajout du MCP, l'allure des isothermes de sorption des matériaux étudiés sont très proche de celles obtenues par d'autres auteurs travaillant sur le béton de chanvre (Colinart et al. 2017; Aït Oumeziane et al. 2016; M. Rahim et al. 2016).

Le MCP étant composé de microbille de cire de paraffine capable de s'infiltrer dans les pores du béton de chanvre et de la chènevotte, la différence d'amplitude entre les teneurs en humidité des trois bétons de chanvre peut être associée au taux de MCP dans le matériau.

III.2.2.2 Enduits de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP)

A. Teneur en eau

Le [Tableau III-5] présente les teneurs en eau expérimentales obtenues sur chaque échantillon en fonction du taux d'humidité relative imposé dans le dessiccateur. Alors que la [Figure III-5] trace l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité. Aussi, la teneur en eau dans les enduits de chanvre avec et sans MCP augmente avec le taux d'humidité dans le dessiccateur. Tout comme pour le béton de chanvre, pour une hygrométrie donnée, la teneur en eau diminue en fonction de la proportion de MCP ajoutée au matériau.

RH (%)	w_exp (%)			
	HLCoat + 0%MCP	HLCoat + 11%MCP	HLCoat + 23%MCP	HLCoat + 40%MCP
33	1,364	1,254	1,454	0,915
48	1,637	1,579	1,498	1,247
56	2,824	2,555	2,293	1,968
68	3,218	2,860	2,460	1,869
75	3,809	3,202	2,856	2,422
81	3,986	3,467	2,818	2,372
93	8,290	7,131	6,632	5,442

Tableau III-5 : Teneur en eau expérimentale des HLCoat+%MCP en adsorption.

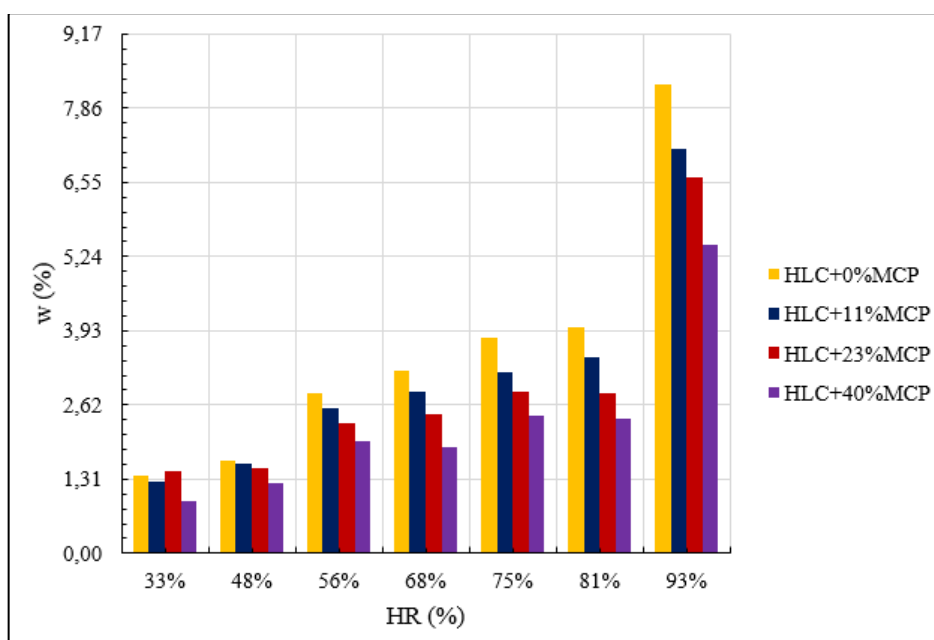


Figure III-5 : Evolution de la teneur en eau dans les enduits de chanvre avec et sans MCP en adsorption.

A 33% HR, les teneurs en eau du HLC+11%MCP et le HLC+23%MCP sont comparables à celle de l'enduit de chanvre sans MCP. Entre 33 et 68% HR, l'évolution de la teneur en eau est quasi-linéaire pour tous les matériaux, bien que le HLC+0%MCP absorbe légèrement plus que le HLC+11%MCP. Entre 68 et 81% HR, le HLC+0%MCP et le HLC+11%MCP commencent à absorber plus que les autres matériaux avec MCP, alors que la teneur en eau dans le HLC+23%MCP et HLC+40%MCP n'augmente que légèrement. A 93% HR, l'écart entre les teneurs en eau obtenues en fonction du taux de MCP est plus important.

B. Lissage par le modèle de GAB

Les paramètres présentés par le [Tableau III-6] ont permis de faire l'ajustement des résultats de sorption des enduits à l'aide du modèle de GAB. Le [Tableau III-7] présente les valeurs expérimentales et les valeurs du modèle. Ces deux tableaux permettent de vérifier la cohérence entre les données expérimentales et les données d'ajustement.

	ρ_0 (kg/m ³)	GAB adsorption coefficients			Coefficient R ²	Ecart-type
		k	C	w _m (%)		
HLCcoat + 0%MCP	892	0,9	9	1,364	0,96	0,004
HLCcoat + 11%MCP	807	0,9	6	1,342	0,90	0,004
HLCcoat + 23%MCP	700	0,78	6	1,274	0,91	0,007
HLCcoat + 40%MCP	633	0,9	6	0,915	0,93	0,004

Tableau III-6 : Paramètres d'ajustement par le modèle de GAB des isothermes d'adsorption des enduits étudiés.

		33%HR	48%HR	56%HR	68%HR	75%HR	81%HR	93%HR
HLCcoat+0%MCP	w_exp_moy (%)	1,364	1,637	2,824	3,218	3,809	3,986	8,290
	w_GAB (%)	1,537	2,096	2,480	3,385	3,985	4,835	8,194
HLCcoat+11%MCP	w_exp_moy (%)	1,254	1,579	2,555	2,860	3,202	3,467	7,131
	w_GAB (%)	1,279	1,811	2,172	2,924	3,573	4,358	7,453
HLCcoat+23%MCP	w_exp_moy (%)	1,454	1,498	2,293	2,460	2,856	2,818	6,632
	w_GAB (%)	1,322	1,818	2,125	2,698	3,134	3,600	4,981
HLCcoat+40%MCP	w_exp_moy (%)	0,915	1,247	1,968	1,869	2,422	2,372	5,442
	w_GAB (%)	0,934	1,322	1,585	2,133	2,607	3,180	5,438

Tableau III-7 : Evaluation de la cohérence entre l'ajustement de GAB et les résultats expérimentaux des HLCcoat+%MCP.

Malgré les écart-types de l'ordre de 10^{-3} remarquables sur le [Tableau III-6], on peut facilement voir que le modèle GAB ne permet pas un ajustement des données de l'enduit aussi efficace que sur les bétons de chanvre. Ce qui peut être une conséquence directe du processus de prise

de mesure : lancement de tous les paliers en partant d'échantillons secs et dans des dessiccateurs sans condition sous-vide.

C. Isotherme de sorption

Le lissage par le modèle GAB permet d'obtenir des courbes d'ajustement décrivant une cinétique d'adsorption d'humidité par multi et mono couches à la surface des pores. La [Figure III-6] présente les isothermes d'ajustement de GAB et les points de teneur en eau en fonction de l'humidité relative obtenus expérimentalement sur les enduits de chanvre avec et sans MCP. Ces courbes présentent une cinétique assez proche de la courbe de sorption de type II du classement des isothermes de sorption de l'IUPAC (Sing 1985) et leur allure est similaire à celles présentées par d'autres auteurs (Anh D. Tran Le et al. 2020; Seng, Magniont, et Lorente 2019a; Colinart et al. 2017).

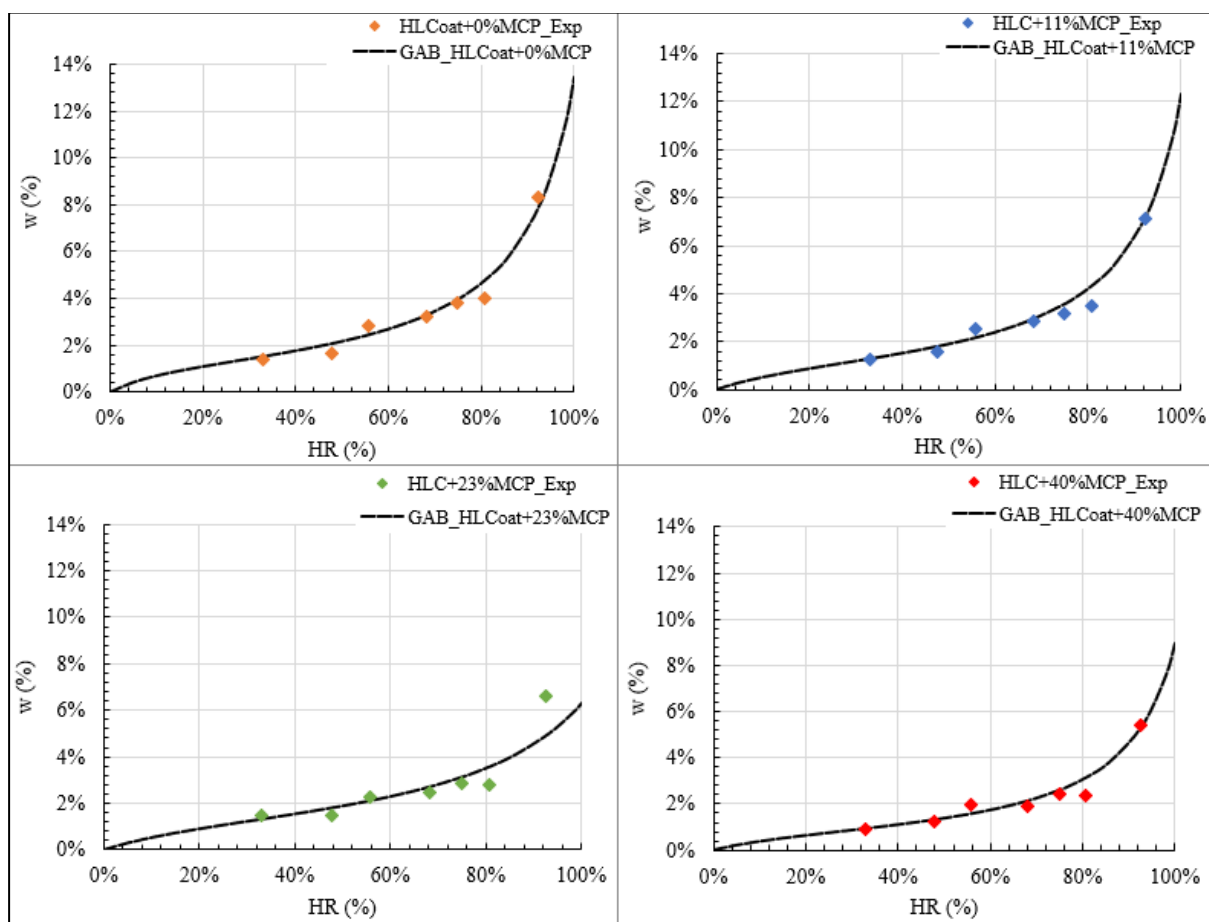


Figure III-6 : Isothermes d'adsorption des enduits de chanvre avec et sans MCP ajustés avec le modèle GAB.

L'une des plus récentes études sur la structure du béton de chanvre (Rima et al. 2021) montre que l'important réseau capillaire de ce dernier lui permet d'avoir une structure de pores très favorable aux transferts hygrothermiques. Avec ce réseau composé de macro et micropores, on peut facilement remarquer à travers les isothermes de la [Figure III-6] que le remplissage des pores du matériau s'effectue progressive en fonction des humidités relatives. Dans un premier temps, aux faibles hygroscopies (entre 0 et 33% HR) le remplissage des monocouches s'effectue progressivement jusqu'à leur remplissage. Ce remplissage des monocouches s'accompagne d'une adsorption presque linéaire avant le début de l'adsorption multicouche aux humidités relatives plus élevées. Comme pour les bétons de chanvre avec et sans MCP, les granulés de MCP viennent non seulement obstruer en partie les pores du béton de chanvre mais aussi ceux de la chènevotte elle-même ; ce qui réduit considérablement le réseau poreux des enduits.

Cette sous-section vient de présenter l'évolution des isothermes de sorption après ajout du MCP dans les bétons et enduits de chanvre. Dans la sous-section suivante, il sera présenté l'impact du MCP sur le transfert et la diffusion d'humidité dans ces nouveaux matériaux.

III.3 Perméabilité à la vapeur d'eau

III.3.1 Expérimentation

III.3.1.1 Méthodologie expérimentale

Lorsqu'un gradient de pression est soumis entre les deux faces opposées du béton de chanvre, ce dernier absorbe de l'humidité jusqu'à stabilisation avant de la transférer à la face exposée à la plus faible humidité. Cette capacité de transférer l'humidité après l'équilibre hydrique caractérise la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau. De ce fait, la perméabilité à la vapeur d'eau comprend le transfert de vapeur par diffusion et effusion, et le transfert de liquide.

Comme recommandé dans la norme NF EN 12572, la perméabilité à la vapeur d'eau se mesure dans des conditions isothermes (23°C dans notre cas) pour un ensemble d'humidités relatives. Cette perméabilité à la vapeur peut se mesurer par la méthode de la coupelle sèche et/ou celle de la coupelle humide. La norme spécifie que la mesure à la coupelle sèche communique des informations sur la perméabilité à la vapeur d'eau mesurée à de faible

humidité relative alors que le test à la coupelle humide s'effectue dans des conditions d'humidité relative élevée. Pour notre étude, on s'est limité au test à la coupelle sèche avec la plage standard de 0/50% HR, comme schématisé sur la [Figure III-7].

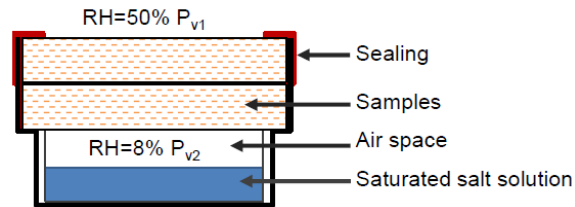


Figure III-7 : Schéma de l'assemblage de la coupelle sèche pour la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau (Seng, Magniont, et Lorente 2019b).

Après réalisation des bancs expérimentaux, un suivi de masse en fonction du temps est réalisé durant toute la durée de l'essai jusqu'à stabilisation. Après stabilisation de la masse en régime permanent, la perméabilité à la vapeur d'eau δ_v en [kg/(m.s.Pa)] peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$\delta_v = \frac{G d}{A (\Delta P_v)} = g_v \frac{d}{\Delta P_v} \quad \text{III-30}$$

Avec : d : épaisseur de l'échantillon (m), g_v : la densité de flux de vapeur [kg/ (m².s)], A : surface exposée (m²), ΔP_v : différence de pression de vapeur (Pa).

Où G représente le gain massique par régression linéaire de la cinétique de masse :

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad \text{III-31}$$

Avec : Δm , la variation de masse (kg), Δt : temps (s).

La pression de vapeur (P_v en Pa) a été calculée à partir de la température et l'humidité relative mesurées durant toute la période d'essai à l'aide de la relation suivante :

$$P_v = HR 100 e^{\left(18,989 - \frac{4052}{235,89 + T}\right)} \quad \text{III-32}$$

Avec : T , la température (K).

Après avoir calculé la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux et en considérant la perméabilité de l'air δ_a égale à 2.10^{-10} kg/(m.s.Pa), on a facilement déterminé le facteur de résistance à la vapeur d'eau des matériaux étudiés à l'aide de l'équation suivante :

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_v} \quad \text{III-33}$$

III.3.1.2 Expérimentation

En suivant les recommandations de la norme NF EN 12572, nous avons utilisé le gel de silice pour assurer une humidité relative inférieure à 8% HR dans l'air de la coupelle. Pour vérifier la répétabilité des résultats, il nous a paru représentatif de tester trois échantillons cylindriques (de 3 cm d'épaisseur et de 10 cm de diamètre) pour chaque formulation. Des moules spécifiques ont été réalisés pour la fabrication des échantillons.

Afin de garantir un transfert unidirectionnel de vapeur d'eau, le pourtour des échantillons a été recouvert d'un film en aluminium. Puis l'éprouvette a été scellée sur le couvercle de la coupelle qui contient le gel de silice et l'aire de la face exposée aux échanges mesurée. Pour contrôler l'humidité relative autour de la coupelle et maintenir un environnement isotherme autour des échantillons durant l'essai, l'ensemble échantillon + coupelle a été placé dans une chambre climatique maintenant constantes : une humidité relative de 50%RH et une température de 23°C.



Figure III-8 : Dispositif expérimental de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau.

Les coupelles permettent d'exploiter quasiment toute la surface des faces exposées des échantillons. Comme présenté sur la [Figure III-8], nous avons utilisé une balance ADAM, d'une précision de 0,001 g et de charge maximale 750 g, pour la pesée des échantillons durant

tout l'essai. On distingue sur la [Figure III-8], de gauche à droite : la préparation du gel de silice, la pesée d'une éprouvette avec son étanchéité périphérique, la disposition dans la chambre climatique et un aperçu de l'extérieur de cette chambre.

Les échantillons ont d'abord été placés dans une ambiance à 50% HR pendant 7 jours, avant d'être scellés, afin de réduire le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent dans les conditions d'essai de 23 °C et 0/50% HR. Dans chacune des coupelles, nous avons déposé 109 g de gel de silice et avons effectué la pesée des échantillons toutes les 24 h jusqu'à stabilisation de leur masse et saturation du gel de silice.

III.3.2 Résultats

III.3.2.1 Bétons de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP)

Les évolutions de masse en fonction du temps durant l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau sont présentées sur la [Figure III-9]. Les courbes de cette figure montrent que le BC+0%MCP, BC+20%MCP et BC+40%MCP présentent un comportement similaire à celui observé par d'autres auteurs (Collet et al. 2013; Collet 2004). De plus, on peut voir que durant les 3 premiers jours, l'évolution de la masse des trois matériaux est presque similaire en raison des conditions initiales de l'essai. A partir du quatrième jour, la masse du BC+0%MCP évolue plus rapidement au fils du temps que celle des deux autres formulations : BC+20%MCP et BC+40%MCP.

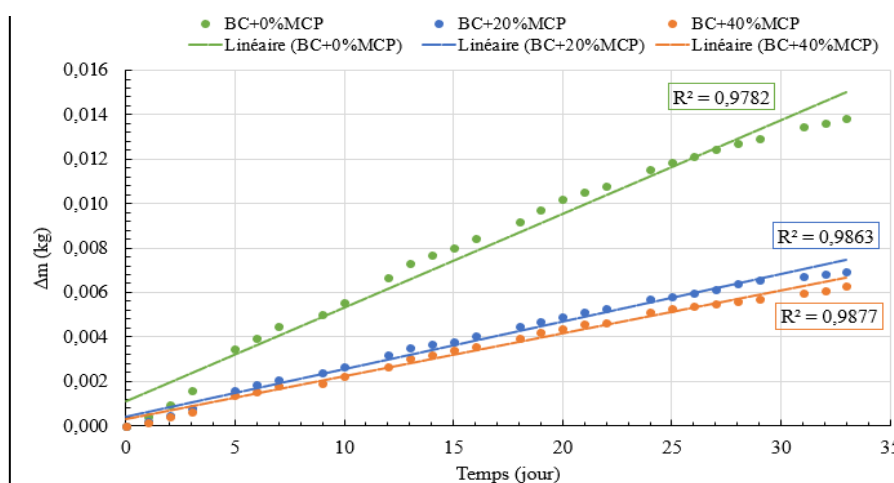


Figure III-9 : Cinétique d'évolution de la masse des échantillons de BC+%MCP en coupelle sèche «0 à 50%HR».

Comme déjà expliqué précédemment, cette différence de gain massique entre le béton de chanvre sans MCP et ceux avec MCP est due à la diminution du volume des pores causée par l'infiltration des microbilles de MCP. On remarque également un changement de la pente de chaque courbe à partir du 25^{ème} jour en raison de la saturation du gel de silice.

Le [Tableau III-8] présente les résultats obtenus pour la densité du flux de vapeur (g_v), la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) des différents bétons étudiés. Les calculs des valeurs ont été réalisés sans tenir compte de la résistance de la couche limite en surface des éprouvettes, ni de celle de la lame d'air entre l'échantillon et la solution saline. Ces valeurs sont proches de celles obtenues par d'autres auteurs (M. Rahim et al. 2015; Collet et al. 2013) avec les mêmes hypothèses. Elles sont aussi inférieures aux valeurs obtenues avec la prise en compte de ces résistances par Rahim et d'autres (M. Rahim et al. 2015; Seng, Magniont, et Lorente 2019b). On remarque néanmoins que le facteur de résistance à la vapeur d'eau du BC+0%MCP obtenu est largement supérieur à ceux obtenus par Seng et collaborateurs (Seng, Magniont, et Lorente 2019a).

	ρ_0 (kg/m ³)	Épaisseur (m)	Surface Exposée (m ²)	g_v [10 ⁻⁷ kg/ (m ² .s)]	δ_p [10 ⁻¹¹ kg/(m.s.Pa)]	μ
BC+0%MCP	540	0,03	0,01	2,91	2,38	8,41
BC+20%MCP	558	0,03	0,01	1,41	1,19	16,7 6
BC+40%MCP	662	0,03	0,01	1,37	1,13	17,7 6

Tableau III-8 : Résultats expérimentaux de la coupelle sèche (0 à 50%HR) sur les bétons de chanvre étudiés.

Ainsi, avec l'ajout du MCP, on remarque une diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau et de la densité de flux de vapeur en fonction du taux de MCP. Cet ajout s'accompagne aussi d'une augmentation du facteur de résistance à la vapeur d'eau : il passe de 8,4 pour le BC+0%MCP à 17,76 pour le BC+40%MCP. Aussi, les facteurs de résistance des bétons de

chanvre avec MCP sont supérieurs à ceux de la terre cuite (16) et du béton de copeaux de bois (15) (Collet 2004).

En comparaison avec d'autres matériaux de construction [Figure III-10], on remarque que le BC+0%MCP a une perméabilité à la vapeur d'eau trois fois supérieure à celle de la pâte de ciment et deux fois supérieure au béton de polystyrène expansé développé par (Maaroufi 2020). Alors que les formulations avec MCP ont une perméabilité proche de celle du béton de polystyrène expansé.

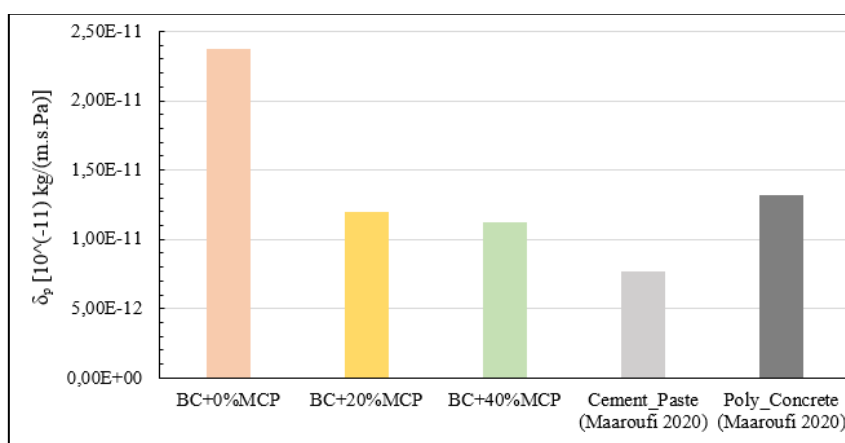


Figure III-10 : Perméabilité à la vapeur d'eau des BC+%MCP et comparaison avec d'autres matériaux.

III.3.2.2 Enduits de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP)

Les résultats obtenus pour les études de perméabilité à la vapeur d'eau sur les enduits de chanvre avec et sans MCP sont présentés dans le [Tableau III-9].

	ρ_0 (kg/m ³)	Épaisseur (m)	S (m ²)	g_v [10^{-7} kg/ (m ² .s)]	δ_p [10^{-11} kg/(m.s.Pa)]	μ
HLCoat+0%MCP	906	0,03	0,01	5,64	1,54	12,9
HLCoat+11%MCP	878	0,03	0,01	4,92	1,34	14,87
HLCoat+23%MCP	791	0,03	0,01	4,72	1,35	14,82
HLCoat+40%MCP	731	0,03	0,01	4,63	1,27	15,76

Tableau III-9 : Résultats expérimentaux de la coupelle sèche (0 à 50%HR) sur les enduits de chanvre étudiés.

A partir de ces résultats et l’histogramme de la [Figure III-11], on peut facilement voir que l’ajout du MCP dans l’enduit de chanvre conduit à une diminution de la perméabilité à la vapeur d’eau et de la densité de flux.

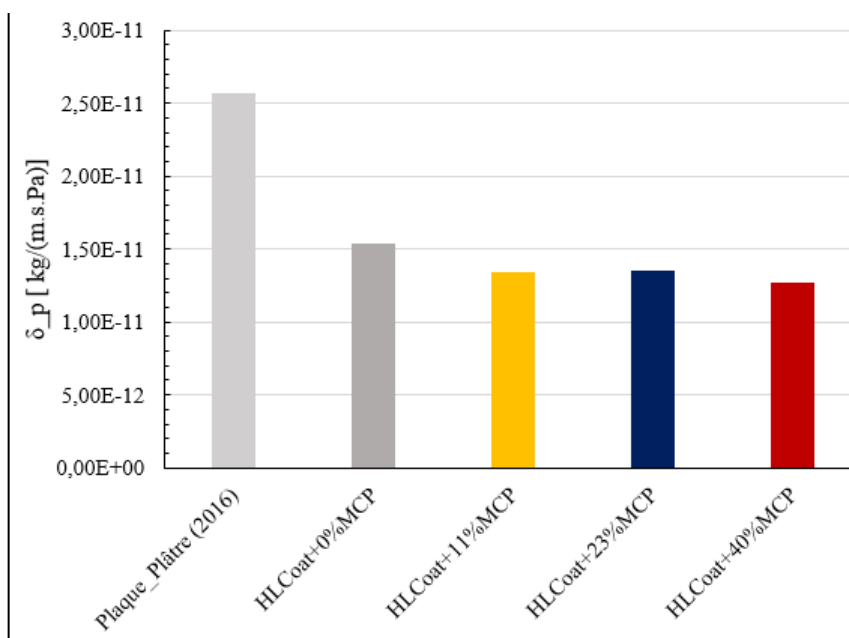


Figure III-11 Evolution de la perméabilité à la vapeur d’eau des HLCcoat+%MCP et comparaison avec celle de la plaque de plâtre.

Contrairement au constat fait sur la teneur en eau, les perméabilités à la vapeur d’eau du HLCcoat+11%MCP et du HLCcoat+23%MCP sont très proches l’une de l’autre, alors que celle du HLCcoat+0%MCP est un peu plus élevée et celle du HLCcoat+40%MCP légèrement plus faible. D’autre part, ces perméabilités, comprises entre $1,54$ et $1,27 \times 10^{-11}$ kg/(m.s.Pa) pour les enduits étudiés, sont proches de $1,44 \times 10^{-11}$ kg/(m.s.Pa) de celles obtenues par Chamoin (Chamoin 2010) et légèrement inférieures à $1,7 \times 10^{-11}$ kg/(m.s.Pa) de celles obtenues par Collet (Collet 2004) sur l’enduit de chanvre.

La perméabilité à la vapeur d’eau des enduits de chanvre avec et sans MCP obtenue est néanmoins faible par rapport à $2,02 \times 10^{-10}$ kg/(m.s.Pa) du mortier de chanvre étudié par Kosiachevskiy et collaborateurs (Kosiachevskiy et al. 2022) et à $2,57 \times 10^{-11}$ kg/(m.s.Pa) de la plaque de plâtre étudiée par Richter et Staněk (Richter et Staněk 2016).

III.3.3 Diffusivité hydrique

Sous un gradient de vapeur, le transfert d'humidité se produit à travers les pores interconnectés du matériau. Pour les matériaux de construction avec de large pores, la diffusivité à la vapeur peut être comparée à la diffusion de vapeur d'eau dans l'air. Alors que pour celui qui a des petits pores, les collisions entre les molécules et les parois des pores sont plus importantes que les collisions entre molécules. Donc, la diffusivité à la vapeur du matériau permet de caractériser le taux de variation de sa teneur en humidité lors d'un transfert d'humidité. Pour caractériser cette grandeur, on se base sur les données de sorption et celles de perméabilité à la vapeur d'eau comme (De Vries 1987; Collet, Pretot, et Lanos 2013; M. Rahim et al. 2016). La diffusivité hydrique (D_u en $[m^2/s]$) est calculée à partir de l'équation présentée à la section [III.1.3] suivante :

$$D_u = \frac{\delta_v p_{vs}}{\rho_0} \frac{1}{\left(\frac{\partial \omega}{\partial HR}\right)} \quad \text{III-25}$$

Avec : P_{vs} : la pression de vapeur saturante (Pa) et ω : la teneur en eau (%).

III.3.3.1 Bétons de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP)

L'évolution de la diffusivité à la vapeur d'eau en fonction de la teneur en eau gravimétrique pour les bétons de chanvre étudiés est présentée sur la [Figure III-12].

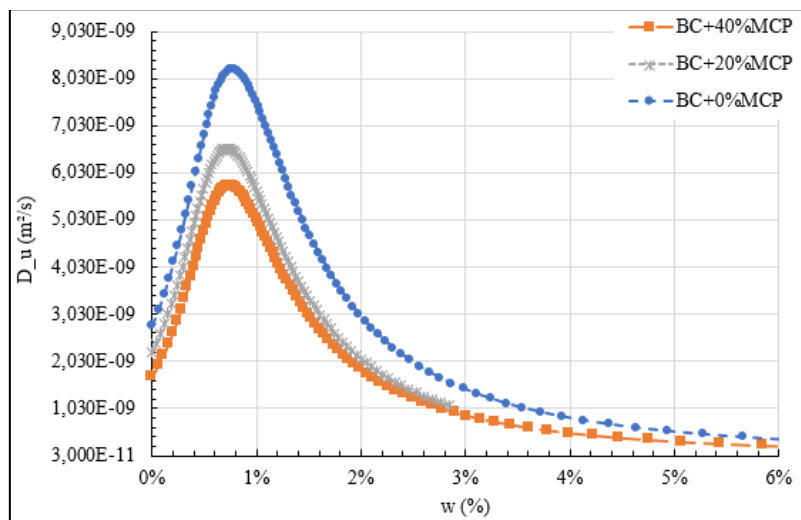


Figure III-12 : Variation de la diffusivité à la vapeur d'eau des bétons de chanvre avec et sans MCP

On peut remarquer sur la [Figure III-12] que plus la proportion de MCP augmente, plus la diffusivité à la vapeur d'eau diminue. De plus, les bétons de chanvre avec MCP montrent une évolution de la diffusivité hydrique similaire à celle du Béton de chanvre sans MCP. Comparé à la littérature, les courbes obtenues dans cette étude sont proches de celles obtenues par Rahim et collaborateurs (M. Rahim et al. 2015). Les courbes de diffusivité hydrique sont très liées aux isothermes de sorption.

	ρ_0 (kg/m ³)	$D_{u,50\% HR}$ [10 ⁻⁹ m ² /s]
BC+0%MCP	540	5,21
BC+20%MCP	558	5,73
BC+40%MCP	662	3,87

Tableau III-10 Diffusivité hydrique des bétons de chanvre avec et sans MCP à 50% HR.

Pour les trois bétons de chanvre, ces courbes de diffusivité hydrique atteignent la valeur maximale pour une teneur en eau d'environ 0,8%. Celle-ci passe de $8,24 \times 10^{-9}$ m²/s pour le BC+0%MCP à $6,56 \times 10^{-9}$ m²/s pour le BC+20%MCP, et à $5,76 \times 10^{-9}$ m²/s pour le BC+40%MCP. Pour le béton de chanvre avec 0 et celui avec 20%MCP, les valeurs maximales obtenues sont proches de celles obtenues par Collet et collaborateurs (Collet et al. 2013). Les écarts entre les trois matériaux peuvent être justifiés par les différences de : perméabilité à la vapeur d'eau et teneur en eau. Comme indiqué précédemment, ces différences peuvent être reliées à la diminution de la capillarité en raison de la présence des microbilles de MCP dans la matrice et dans les pores des particules végétales. Notons que, lors de ces phénomènes de transferts de vapeur d'eau, la capacité de stockage de chaleur sous forme latente du MCP peut également jouer un rôle et retarder le relargage de l'eau stockée dans le matériau sous forme vapeur.

III.3.3.2 Enduits de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP)

Tout comme pour le béton de chanvre, on peut voir sur la [Figure III-13] que la diffusivité hydrique de l'enduit de chanvre avec et sans MCP diminue aux teneurs en eau élevées. Pour des teneurs en eau proches de 1%, elle passe d'un maximum de $3,43 \times 10^{-9}$ m²/s pour le HLCoat+0%MCP, à $3,14 \times 10^{-9}$ m²/s pour le HLCoat+11%MCP, à $2,90 \times 10^{-9}$ m²/s pour le

HLCcoat+23%MCP et à $2,52 \times 10^{-9}$ m²/s pour le HLCcoat+40%MCP. Enfin, malgré quelques écarts sur la position du maximum, les courbes obtenues pour les différents enduits avec et sans MCP respectent l'allure de celles retrouvées dans la bibliographie.

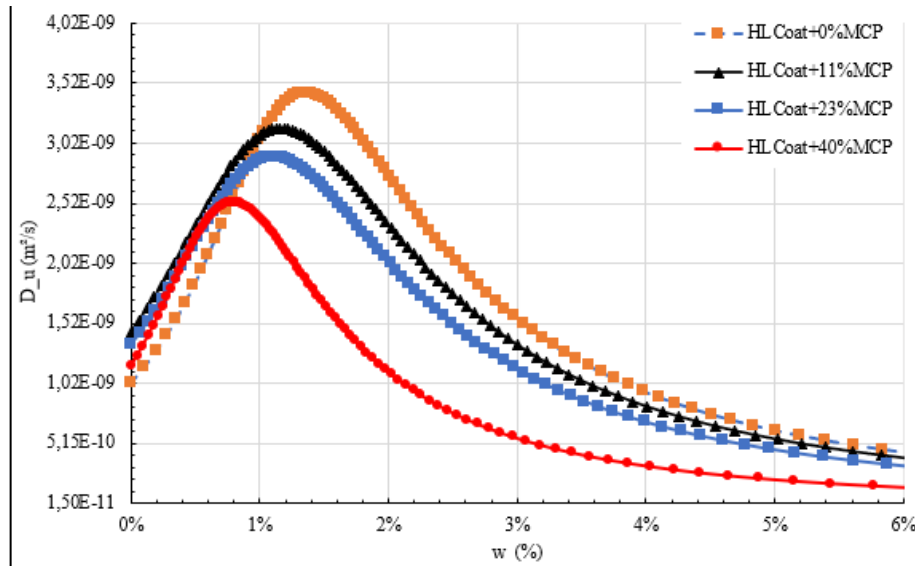


Figure III-13 : Evolution de la diffusivité à la vapeur d'eau des enduits de chanvre avec et sans MCP.

	ρ_0 (kg/m ³)	$D_{u,50\% HR}$ [10 ⁻⁹ m ² /s]
HLCcoat + 0%MCP	906	2,48
HLCcoat + 11%MCP	878	2,51
HLCcoat + 23%MCP	791	2,12
HLCcoat + 40%MCP	731	1,85

Tableau III-11 : Diffusivité à la vapeur d'eau des enduits de chanvre avec et sans MCP à 50% HR.

En se basant sur la théorie de De Vries, les premières vagues des courbes de la [Figure III-13] correspondent à la diffusion hygrique sous le transfert de vapeur. Tout comme observé par Collet et autres (Collet et al. 2013; Mourad Rahim et al. 2015), le transfert d'humidité sous forme vapeur est très élevé dans l'enduit de chanvre au plus bas niveau de teneur en eau. En effet, dans la première partie des courbes, on observe une augmentation de la diffusivité hygrique jusqu'à la valeur maximale due au mécanisme de diffusion et effusion d'humidité sous forme vapeur. Puis la diffusivité à la vapeur d'eau diminue progressivement en raison du transfert d'humidité par le mécanisme de condensation et d'évaporation aux interfaces vapeur

liquide causés par la condensation capillaire. Cette deuxième phase de transfert permet un transfert d'humidité en phase liquide plus important que celui sous forme vapeur et implique automatiquement une diminution de la valeur de la diffusivité hydrique.

Dans cette sous-section, il a été présenté l'impact du MCP sur le transfert et la diffusion d'humidité des matériaux étudiés. On complètera cette étude avec le critère de performance du matériau en ambiance humide qui est sa capacité tampon hydrique (ou MBV). La sous-section suivante présente donc l'impact de l'incorporation d'un MCP dans le matériau biosourcé sur la MBV.

III.4 Capacité tampon hydrique (MBV)

III.4.1 Méthodologie expérimentale

La capacité tampon hydrique donne une indication sur la quantité d'eau transférée ou extraite d'un matériau par surface libre lorsque ce dernier est soumis à des variations d'humidité relative de l'air ambiant. C'est un critère important pour évaluer le confort hygrothermique dans le bâtiment. Le protocole le plus couramment utilisé est celui défini dans le projet Nordtest (Rode et al. 2007); c'est celui que nous avons retenu pour notre étude.

Ce protocole expérimental consiste à soumettre l'échantillon à des cycles de changement d'humidité relative entre 33% HR pendant 16 heures et 75% HR pendant 8 heures à une température de 23 °C constante, comme représenté sur la [Figure III-14]. Dans notre cas, les créneaux en humidité relative et la température ont été planifiés sur 100 jours dans une enceinte climatique (Fitoclimat 300 ECP45) à l'aide de son programme (Fitlog). Cet équipement permet de contrôler de larges plages de température et d'humidité relative et est équipé de capteurs de contrôle.

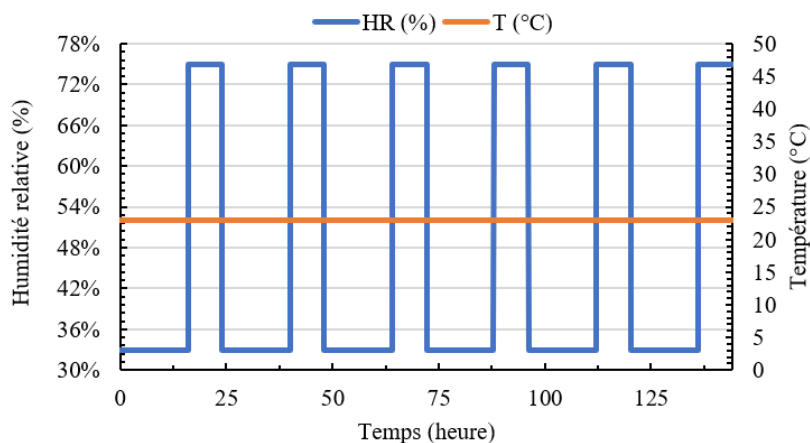


Figure III-14 : Créneau de température et d'humidité relative en fonction du temps utilisé par le Nordtest.

III.4.1.1 Conditionnement des échantillons

Les échantillons des différents matériaux testés sont cylindriques avec les caractéristiques suivantes : 10 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur. Lors du moulage, les échantillons sont légèrement compactés manuellement. Ces échantillons ont été préalablement séchés dans une

étuve à 63 °C jusqu'à stabilisation de leur poids afin de maîtriser les conditions initiales de l'essai. Après séchage, la face inférieure et le pourtour des échantillons ont été couverts d'un film en aluminium pour les rendre imperméables à la vapeur d'eau. Ils sont ensuite placés dans l'enceinte climatique pour une stabilisation à 50% HR et 23 °C pendant 14 jours avant de lancer le créneau d'humidité relative défini par le protocole.

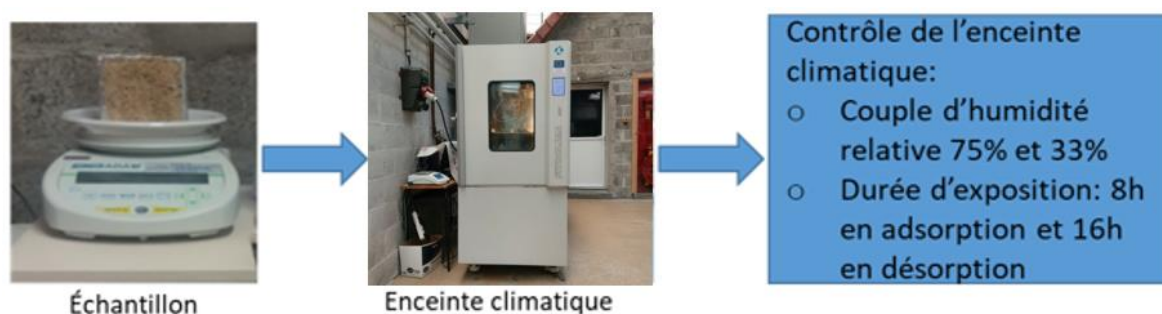


Figure III-15 : Processus du protocole d'essai du Nordtest projet pour l'évaluation de la MBV

D'un point de vue pratique, il est nécessaire de peser les échantillons à intervalles réguliers pour connaître leur évolution durant les différentes phases. Néanmoins, en raison des vibrations engendrées par le système de ventilation de l'enceinte climatique, l'enregistrement automatique des évolutions de masse des échantillons était impossible. Il a donc fallu sortir les échantillons de l'enceinte pour chaque mesure. La balance utilisée est de marque Adam DU avec une plage de mesure allant de 0 à 850 grammes et une résolution de 0,001 g. Afin de minimiser les perturbations des conditions hygrothermiques de l'ambiance lors de l'ouverture de l'enceinte, le relevé de masse s'est fait quatre fois pendant la période d'adsorption et quatre fois pendant la période de désorption (entre 6 et 20 h). Les mesures sont arrêtées lorsque la masse des échantillons se stabilise. Cet équilibre est atteint lorsque :

- ✓ La variation de masse (Δm) est inférieure à 5% entre le gain de masse pendant l'adsorption d'humidité et la perte de masse pendant la phase de désorption,
- ✓ La différence entre la perte et le gain de masse au sein de chaque cycle est inférieure à 5%.

III.4.1.2 Expression de la MBV

Après avoir recueilli toutes les données expérimentales jusqu'à stabilisation des cycles d'adsorption/désorption, on utilise la relation suivante pour calculer la valeur de la capacité tampon hydrique (MBV) des matériaux :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A (HR_{haute} - HR_{basse})} \quad \text{III-34}$$

Avec : Δm : variation de masse de l'échantillon (g) ;

HR_{min} et HR_{max} : humidités relatives minimale et maximale (%) ;

A : surface exposée (m²).

III.4.2 Résultats expérimentaux

III.4.2.1 Béton de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP)

A. Valeur de la capacité tampon hydrique (MBV) des BC+%MCP

La [Figure III-16] montre l'évolution de la masse des échantillons en fonction de l'humidité relative de l'enceinte climatique et du temps ; seuls les premiers cycles de stabilisation sont présentés ici.

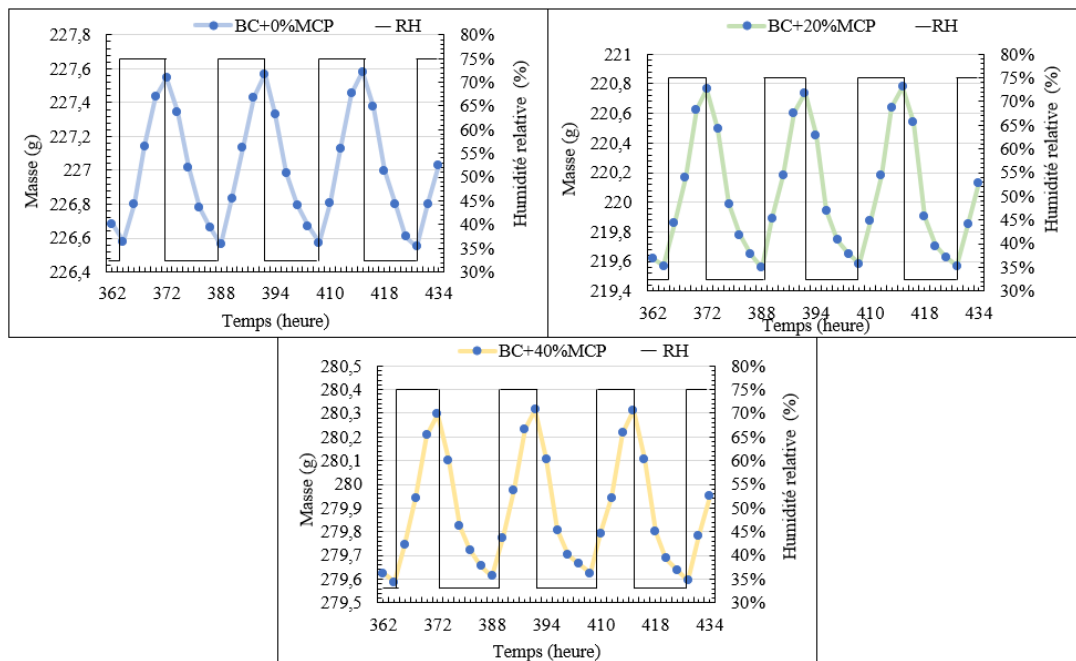


Figure III-16 : Evolution de la masse en adsorption/désorption en fonction du créneau d'humidité relative : BC+%MCP.

A l'aide des masses mesurées expérimentalement, on obtient les valeurs des MBV pour les trois matériaux, à l'aide de l'expression définie précédemment. La [Figure III-17] présente l'évolution des MBV des bétons de chanvre avec et sans MCP durant l'adsorption (MBV_{ads}), la désorption (MBV_{des}) et la MBV moyenne (MBV) entre l'adsorption et la désorption. On peut facilement remarquer les perturbations de la capacité tampon hydrique en adsorption et désorption dus aux troubles de l'ambiance.

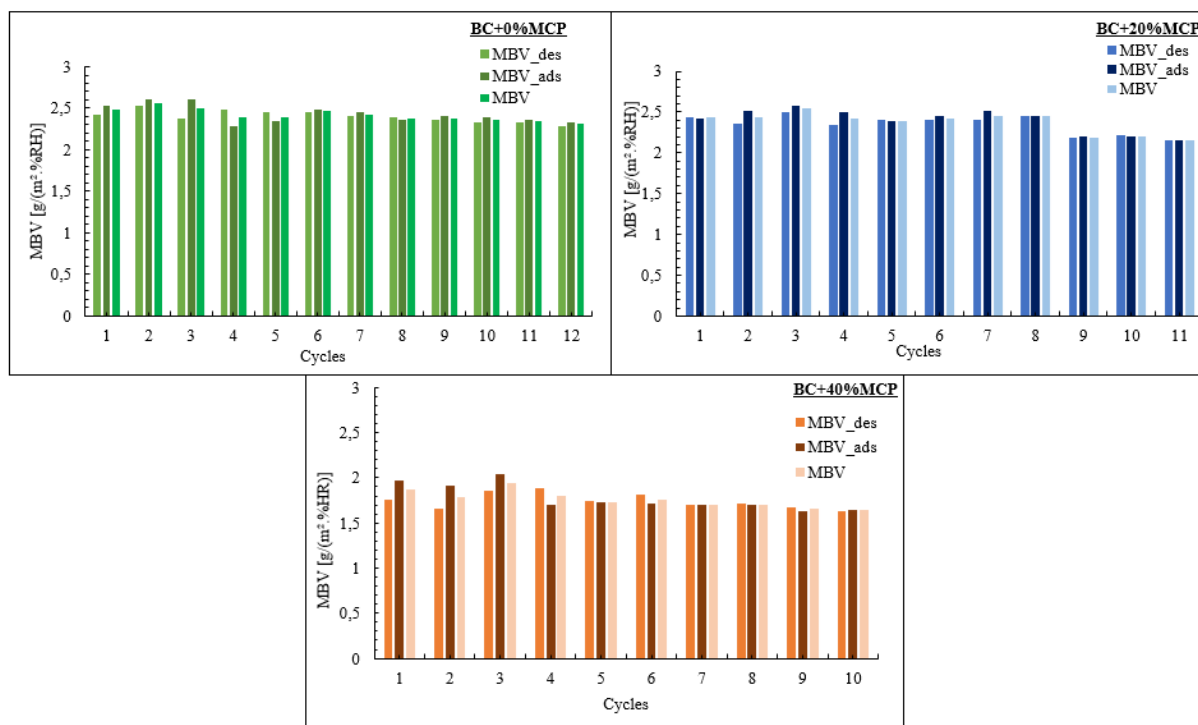


Figure III-17 : Evolution des MBV des bétons de chanvre avec et sans MCP tout au long de l'essai.

Avec : MBV_{ads} : valeur de la MBV calculée en se basant sur le gain de masse en adsorption,

MBV_{des} : valeur de la MBV calculée en se basant sur la perte de masse en désorption,

MBV : valeur de la MBV calculée en se basant sur la moyenne en adsorption/désorption.

Au début de l'essai, la MBV en adsorption est plus élevée que celle en désorption en raison des conditions initiales imposées. Mais, la stabilisation des matériaux commence à se remarquer

dès le neuvième cycle. Pour les trois matériaux : les deux capacités tampons hydriques sont très proches voire égales.

A partir des données de la [Figure III-16] et [Figure III-17] des bétons étudiés, il est possible d'affirmer que 15 jours (360 heures) sont largement suffisants pour que le béton de chanvre avec et sans MCP atteigne l'équilibre en adsorption/désorption.

	ρ_0 (kg/m ³)	Épaisseur (m)	Surface exposée (m ²)	MBV [g/(m ² .HR)]
BC+0%MCP	405	0,05	0,01	2,32
BC+20%MCP	443	0,05	0,01	2,27
BC+40%MCP	483	0,05	0,01	1,74

Tableau III-12 : Valeurs des MBV expérimentales des bétons de chanvre avec et sans MCP.

Le [Tableau III-12] donne la capacité tampon hydrique moyenne pour les trois types d'échantillons. On constate que les valeurs obtenues pour BC+0%MCP (2,32 g/(m².HR) et BC+20%MCP (2,27 g/(m².HR) sont assez proches et cohérentes avec les résultats obtenus par d'autres auteurs (Collet et Pretot 2012b; Dubois, Evrard, et Lebeau 2012; Asli et al. 2021). Comparativement, le BC+40%MCP (1,74 g/(m².HR) donne une MBV d'environ 25% plus faible ; sa MBV est inférieure à 2,3 g/(m².HR) obtenu par Sawadogo (Sawadogo et al. 2022) sur le béton de chanvre avec MCP. La raison, déjà évoquée plus haut, est que l'ajout des microbilles de MCP comble partiellement les pores de la matrice et des granulats.

D'autre part, on a mentionné que le changement de phase du MCP peut avoir une influence sur les transferts hygrothermiques. A cet effet, il nous a paru intéressant d'évaluer l'impact que pourrait avoir le MCP et la température ambiante sur la capacité tampon hydrique des matériaux.

B. Impact de la température sur la Valeur MBV des BC+%MCP

Le matériau à changement de phase utilisé pour la fabrication des échantillons a une température de fusion de 26 °C. Il semble intéressant d'étudier l'effet que peut avoir le changement de phase du Micronal PCM[®] DS 5001X sur la MBV des matériaux étudiés. En plus, la température intérieure réelle n'est pas constante et égale à 23 °C comme le protocole Nordtest pour la mesure des MBV. Par conséquent, dans cette section, la capacité tampon

hydrique a été déterminée en suivant le Protocole du Projet Nordtest comme détaillé en [III.4.1.1], avec les mêmes créneaux d'humidité relative (16 heures à 33% HR et 8 heures à 75% HR) mais en maintenant différentes températures ambiantes. Nous comparons ici les résultats pour les 3 températures de consigne suivantes :

- ✓ Pour le premier cas : les échantillons sont d'abord stabilisés à 50% HR et 10 °C dans la chambre climatique. Puis, la température est maintenue constante à 10 °C durant tout l'essai.
- ✓ Pour le deuxième cas : les résultats sont ceux présentés au paragraphe [III.4.1.1] pour la température à 23 °C, telle que recommandée dans le Projet Nordtest. Notons que la température est proche de celle du changement de phase du MCP.
- ✓ Pour le troisième cas : la température de consigne est de 30 °C, soit au-dessus de la température de changement de phase du MCP. Comme pour le premier cas, les échantillons sont stabilisés à 50% HR et 30 °C avant d'appliquer les créneaux d'humidité relative à 30 °C constante.

	ρ_0 (kg/m ³)	Température (°C)	Épaisseur (m)	Surface exposée (m ²)	MBV [g/ (m ² . %HR)]
BC+0%MCP	692	10	0,05	0,01	2.12
		23	0,05	0,01	2,32
		30	0,05	0,01	3,88
BC+20%MCP	789	10	0,05	0,01	1.67
		23	0,05	0,01	2,27
		30	0,05	0,01	2.97
BC+40%MCP	946	10	0,05	0,01	1.27
		23	0,05	0,01	1,74
		30	0,05	0,01	2.32

Tableau III-13 : Récapitulatif des valeurs des MBV obtenues en fonction des températures pour chaque formulation de béton de chanvre.

Le [Tableau III-13] présente les résultats obtenus pour les bétons de chanvre avec différents taux de MCP et aux trois températures définies précédemment.

Les résultats confirment que, pour les températures ambiantes de 10 et 30 °C, la capacité tampon hydrique diminue quand le taux de MCP augmente, comme pour le cas à 23 °C. La raison déjà évoquée est que les microbilles occupent en partie les pores de la matrice du matériau et des granulats.

Par ailleurs, les valeurs de MBV montrent que, quel que soit le taux de MCP, la capacité tampon hydrique des matériaux augmente avec la température de consigne ; comme remarqué par Igue et autres (Igue et al. 2021; Sawadogo et al. 2022). Ici, l'augmentation de la capacité tampon hydrique est de l'ordre de 80% entre 10 °C et 30 °C, quel que soit le taux de MCP. En effet, lorsque la température augmente, la pression de vapeur croît de façon non linéaire pour un taux d'humidité relative constant. Ainsi, les écarts de masse des échantillons entre les phases d'adsorption et de désorption du cycle sont plus importants aux températures plus élevées.

Néanmoins, on constate que sans MCP (BC+0%MCP), la MBV augmente d'environ 9% entre les essais à 10 et 23 °C, et de 67% entre 23 et 30 °C. Alors que pour les échantillons avec MCP, l'augmentation de la MBV est plus régulière : 36% et 37% respectivement pour BC+20%MCP et BC+40%MCP entre 10 °C et 23 °C, et 31% et 33% pour ces deux formulations entre 23 °C et 30 °C. On note que la température de 23 °C est proche de celle de changement de phase des microbilles de MCP. Ainsi, l'absorption de la chaleur par le MCP lors de la condensation de la vapeur d'eau peut favoriser la phase d'adsorption du béton de chanvre. Et, inversement en phase de désorption, ce qui augmente la variation de masse des échantillons au cours des cycles, comparativement au béton sans MCP.

C. Classification de la MBV des BC+%MCP par le projet Nordtest

Outre la détermination de la valeur de la capacité tampon hydrique (MBV), le protocole du projet Nordtest propose une classification des matériaux partant de négligeable à excellent régulateur hygrique (Rode et al. 2007). Nous nous sommes basés sur cette classification pour comparer la performance des matériaux étudiés à d'autres matériaux de construction.

La [Figure III-18] présente la classe des matériaux étudiés par rapport à d'autres. En premier, on remarque que le béton (0,4 g/ (m². %HR)) et le béton cellulaire (1 g/(m².HR)) sont tous les deux classés parmi les matériaux ayant une capacité de régulation de l'humidité limitée. En second, les matériaux étudiés ici apparaissent comme excellents et bons régulateurs d'humidité. En effet, le BC+0%PCM et le BC+20%PCM sont classés excellent alors que le HLC+40%PCM

est classé bon régulateur hygrique comme le béton de chanvre (1,75 g/(m².HR)) étudié par Evrard (Evrard 2008). Ces résultats permettent de confirmer que malgré la diminution de la MBV causée par l'ajout du MCP, nos bétons de chanvre sont encore de bons régulateurs de l'humidité ambiante.

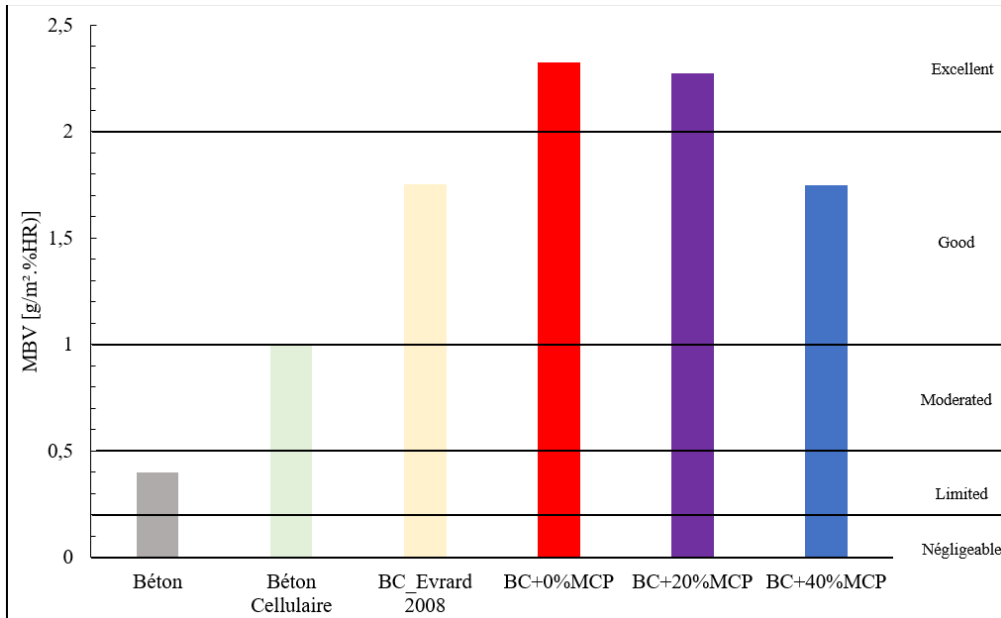


Figure III-18 : Classification des bétons de chanvre avec et sans MCP.

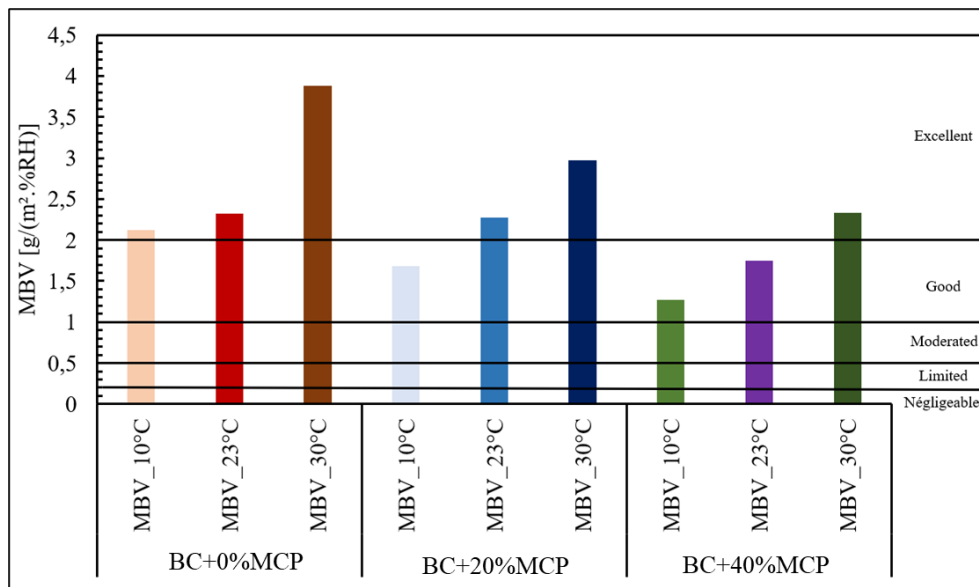


Figure III-19 : Evolution du classement des MBV en fonction des températures pour les trois bétons de chanvre.

Si on compare les résultats aux différentes températures ambiantes testées présentées sur [Figure III-19] ci-dessus, on remarque que le BC+0%MCP reste excellent régulateur d'humidité malgré l'évolution de sa MBV en fonction de la température. Alors que, le BC+20%MCP passe de bon régulateur à 10 °C à excellent entre 23 et 30 °C, et le BC+40%MCP reste bon régulateur entre 10 et 23 °C et passe excellent à 30 °C. Sur cet aspect, et en toutes circonstances, nos bétons de chanvre restent plus performants qu'un béton cellulaire.

III.4.2.2 Enduit de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP)

A. Valeur de la capacité tampon hydrique (MBV) des HLCoat+%MCP

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons au comportement des enduits de chanvre étudiés vis-à-vis de l'humidité ambiante. Nous avons soumis les échantillons aux mêmes consignes que pour les bétons de chanvre (cf.§ III.4.2.1 page. 123).

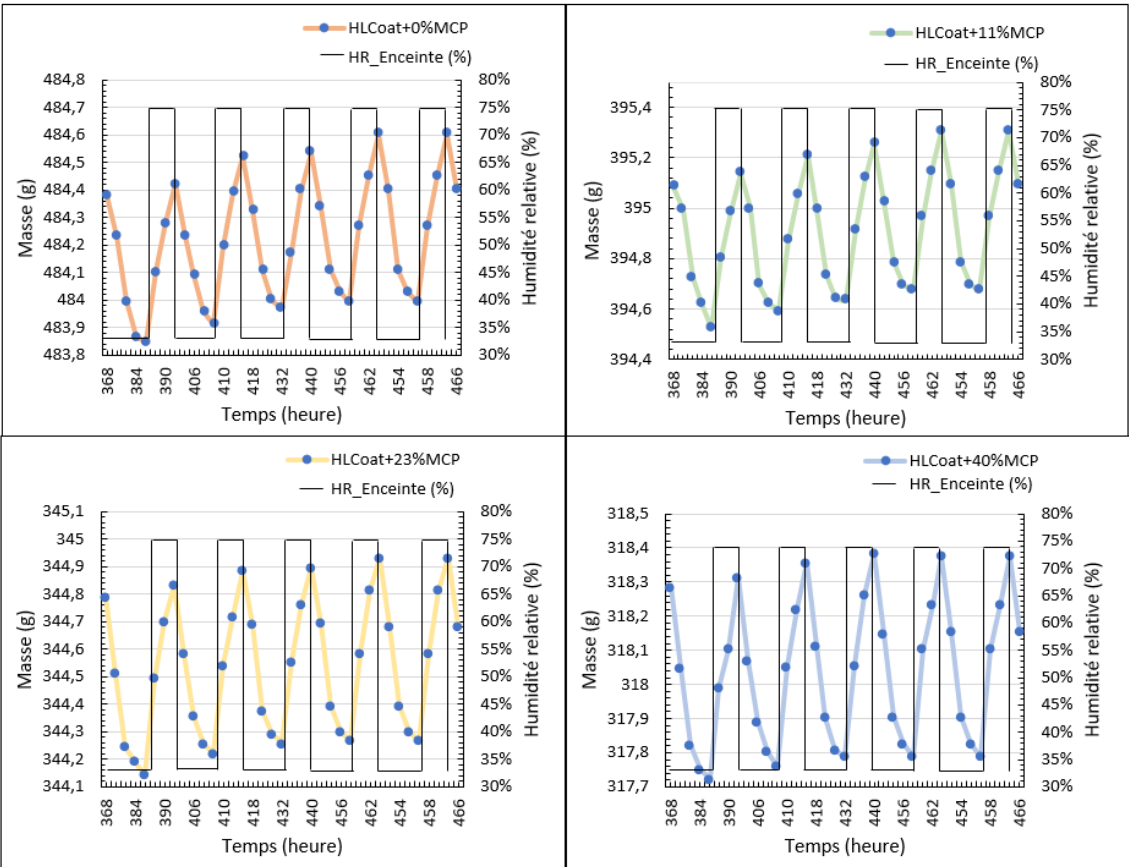


Figure III-20 : Evolution de la masse en adsorption/désorption en fonction du créneau d'humidité relative : HLCoat+%MCP.

La [Figure III-20] montre la cinétique d'adsorption/désorption à 23 °C des enduits avec et sans MCP en fonction du temps après stabilisation. On peut facilement remarquer que les comportements des enduits de chanvre avec et sans MCP sont similaires. Néanmoins, en comparaison au HLCcoat+0%MCP, la variation de masse des échantillons au cours des créneaux d'humidité diminue de 8% pour le HLCcoat+11%MCP, de 32% pour le HLCcoat+23%MCP et de 40% pour le HLCcoat+40%MCP.

Les valeurs de la MBV de stabilisation en adsorption/désorption calculées au cours des cycles successifs pour les différentes formulations d'enduit sont présentées sur la [Figure III-21]. Ces diagrammes permettent d'observer que lorsque la quantité de MCP dans l'enduit augmente, la stabilisation de la valeur de MBV est plus rapidement atteinte : les HLCcoat + 11, 23% et 40%MCP commencent à se stabiliser au 9^{ème} jour après démarrage de l'essai. Alors que pour HLCcoat + 0%, la stabilisation n'apparaît qu'au 12^{ème} jour.

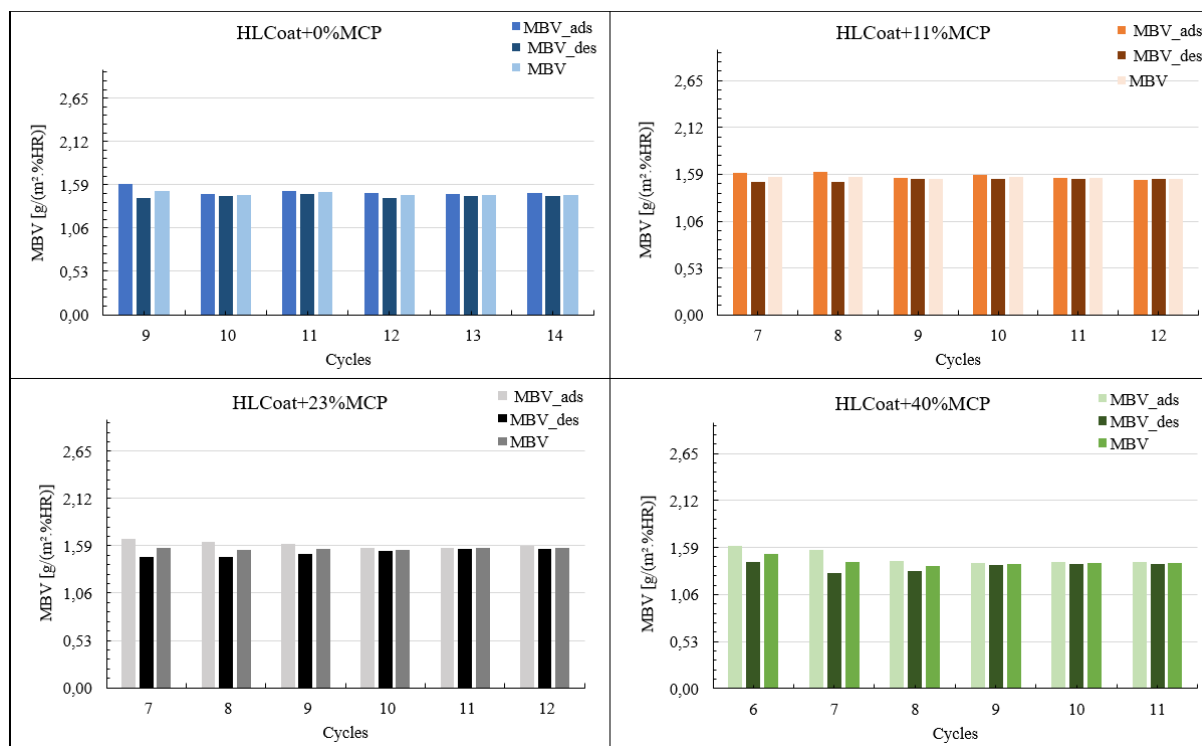


Figure III-21 : Evolution de la MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP tout au long de l'essai.

On remarque également qu'au début de l'essai la MBV_{ads} est plus élevée que la MBV_{des} en raison des conditions initiales des échantillons à 23 °C et 50% HR.

La [Figure III-22] et le [Tableau III-14] présentent les résultats expérimentaux des MBV calculés après stabilisation des enduits de chanvre avec et sans MCP. Ces résultats permettent de constater que l'ajout de 11 et 23% de MCP dans l'enduit permet une légère augmentation de la MBV. Alors qu'avec 40% de MCP, la capacité tampon hydrique diminue sensiblement. Toutefois, les valeurs de la capacité tampon hydrique des quatre formulations sont assez voisines, entre 1,43 et 1,53 g/ (m². %HR), et proches des résultats obtenus par d'autres auteurs, tels : 1,23 et 1,64 g/ (m². %HR) de (Mazhoud et al. 2016).

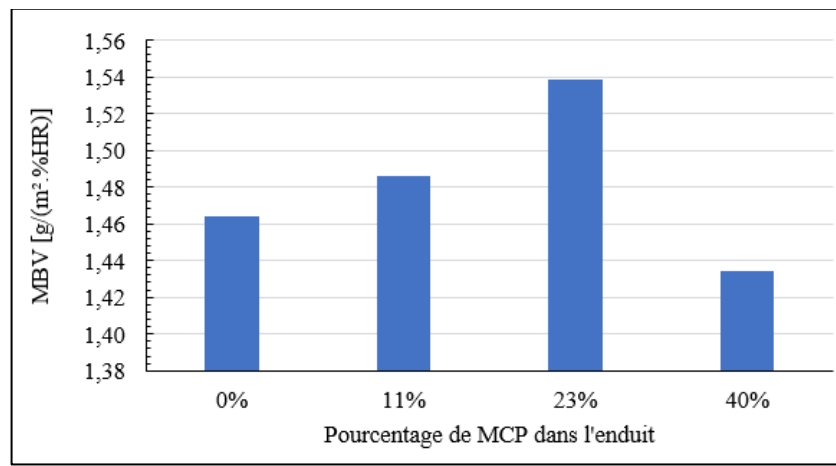


Figure III-22 : Evolution de la MBV expérimentale en fonction du pourcentage de MCP ajouté dans l'enduit de chanvre.

	ρ_0 (kg/m ³)	Épaisseur (m)	Surface exposée (m ²)	MBV [g/ (m ² . %HR)]
HLCcoat+0%MCP	989	0,05	0,01	1,46
HLCcoat+11%MCP	830	0,05	0,01	1,48
HLCcoat+23%MCP	705	0,05	0,01	1,53
HLCcoat+40%MCP	646	0,05	0,01	1,43

Tableau III-14 : MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP obtenue après application du Nordtest protocole.

Contrairement au béton de chanvre, l'ajout du MCP a un faible impact sur la valeur MBV obtenue sur les enduits de chanvre avec MCP. Cependant, en augmentant le taux de MCP, le colmatage de certains pores de la matrice et de la chènevotte par les microbilles l'emporte et la MBV diminue, comme on l'a vu précédemment pour le béton de chanvre avec 40% de MCP.

Pour nos enduits de chanvre, on pourrait donc conclure que la meilleure formulation pour réguler les variations de l'humidité ambiante, est celle avec 23% de MCP.

B. Impact de la température sur la MBV des HLCcoat+%MCP

La [Figure III-23] et le [Tableau III-15] présentent les résultats de l'étude expérimentale de l'évolution de la MBV des enduits en fonction de la température. Ces résultats montrent que la température ambiante influence fortement la valeur de la capacité tampon hydrique du matériau. Comme on peut le voir à travers cette figure et ce tableau, la valeur de la MBV augmente et diminue en fonction de la température.

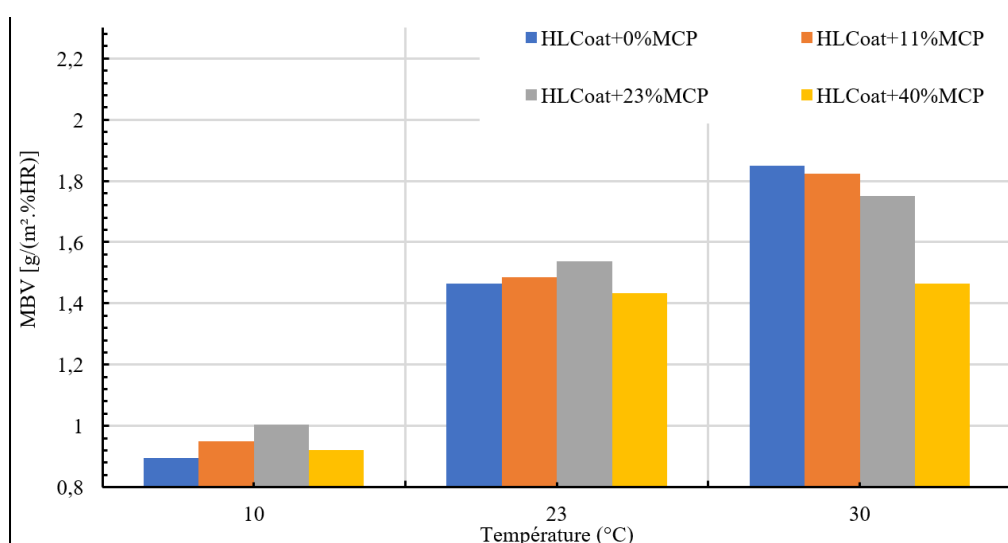


Figure III-23 : Evolution de la MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP en fonction de la température.

Entre 10 et 23 °C, la valeur de la MBV des enduits augmente en moyenne de 50% de façon à peu près uniforme pour les quatre formulations, c'est-à-dire quel que soit le taux de MCP. Entre 23 et 30 °C, l'augmentation de la MBV reste quasi linéaire pour les échantillons comprenant 0% et 11% de MCP, avec une croissance de l'ordre de 25%. Alors que pour les formulations avec 23% et 40% de MCP, cette augmentation est beaucoup plus faible : 14% pour HLC+23% et seulement 2% pour HLC+40%. Là encore, on constate qu'à humidité relative constante, comme l'ont montré Colinart et collaborateurs (Colinart et Glouannec 2017; Colinart et al. 2017), la quantité d'eau adsorbée par le matériau change avec la température. Ce qui impacte directement la valeur de la MBV. Néanmoins, on vérifie ici que pour les taux de

MCP élevés (23% et 40%) la proximité de la température de changement de phase des microbilles (26 °C) a un impact sur les résultats à 23 °C et 30 °C.

	ρ_0 (kg/m ³)	Température (°C)	Épaisseur (m)	Surface exposée (m ²)	MBV [g/ (m ² . %HR)]
HLCoat + 0%MCP	989	10	0,05	0,01	0,89
		23	0,05	0,01	1,46
		30	0,05	0,01	1,84
HLCoat + 11%MCP	830	10	0,05	0,01	0,95
		23	0,05	0,01	1,48
		30	0,05	0,01	1,82
HLCoat + 23%MCP	705	10	0,05	0,01	1,00
		23	0,05	0,01	1,53
		30	0,05	0,01	1,75
HLCoat + 40%MCP	646	10	0,05	0,01	0,92
		23	0,05	0,01	1,43
		30	0,05	0,01	1,46

Tableau III-15 : MBV obtenue en faisant varier la température de consigne sur les enduits avec et sans MCP

C. Classification de la MBV des HLCoat+%MCP par le projet Nordtest

Comme pour les bétons de chanvre, on a repris la classification pratiquée par le Nordtest pour les enduits de chanvre avec et sans MCP. A travers la [Figure III-24], l'enduit de chanvre avec et sans MCP est classé bon régulateur d'humidité, tout comme l'enduit de chanvre (CHLP) étudié par Mazhoud (Mazhoud et al. 2016). Malgré les quelques écarts de valeurs de MBV entre l'enduit de chanvre sans et avec MCP, le classement ne change pas.

En comparaison à d'autres matériaux de construction, les enduits de chanvre développés dans cette étude ont une capacité de régulation d'humidité relative supérieure à celle du plâtre (0,6 g/ (m². %HR)) et du mortier avec polystyrène expansé (0,55 g/ (m². %HR)) étudiée par Maaroufi (Maaroufi 2020).

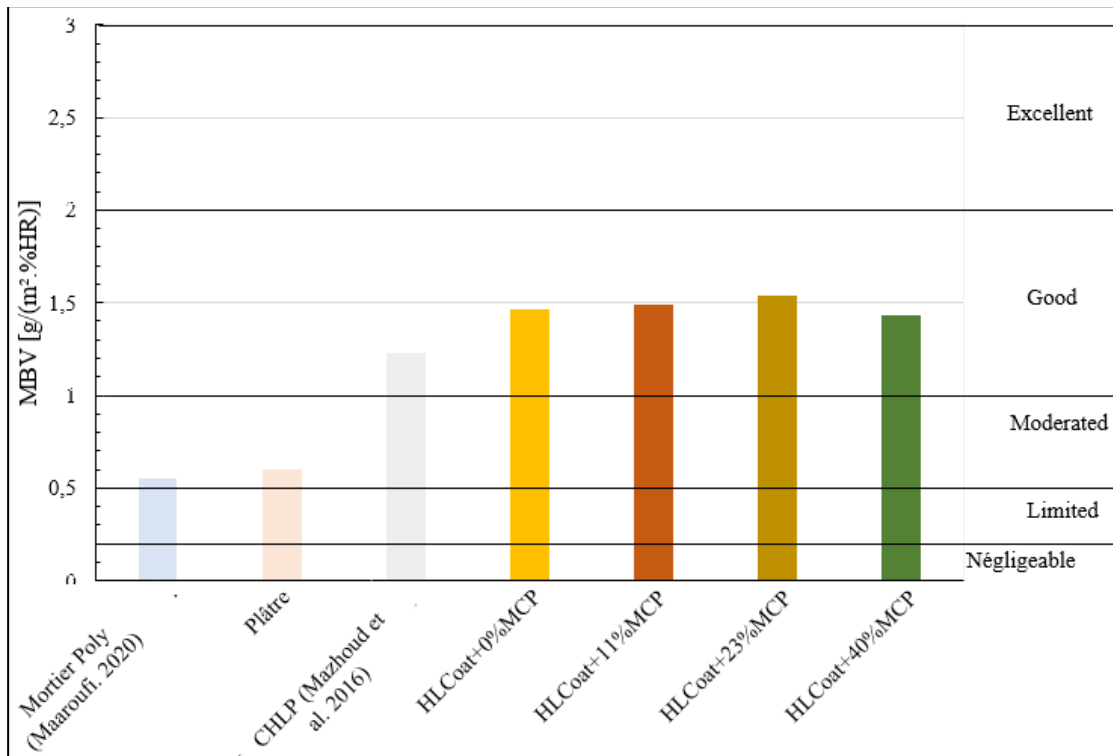


Figure III-24 : Classification des enduits de chanvre avec et sans MCP.

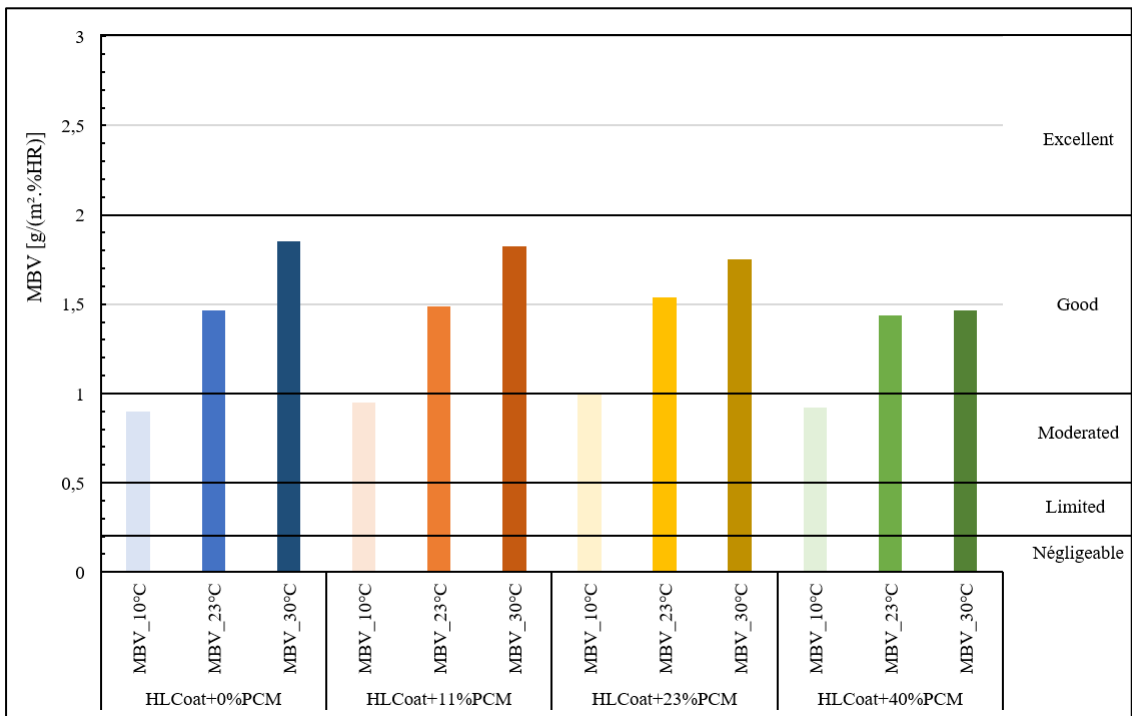


Figure III-25 : Classification de l'évolution de la MBV des enduits de chanvre avec et sans MCP.

La [Figure III-25] présente le classement des enduits étudiés aux différentes températures de consigne. Ce classement est le même quelle que soit la formulation. De modéré à 10 °C, il passe à bon régulateur d'humidité ambiante aussi bien à 23 °C qu'à 30 °C, avec ou sans MCP.

III.4.3 Capacité tampon hydrique idéale (MBV_{idéale})

La valeur de la capacité tampon hydrique idéale, telle que définie par (Rode et al. 2007), peut être considérée comme une caractéristique du matériau représentant sa capacité d'adsorption ou de libération de la vapeur d'eau dans une ambiance humide. Par comparaison à la MBV obtenue expérimentalement, la valeur de la MBV idéale est théorique et est calculée en négligeant la résistance de la lame d'air à la surface du matériau.

Pour ce faire, à l'aide de la fonction du signal de humidité (8 heures en adsorption et 16 heures en désorption) et l'analyse de Fourier prédisant le flux d'humidité de surface en fonction du temps, (Rode et al. 2007) Rode et collaborateurs décrivent le stockage et déstockage d'humidité qui se produisent en adsorption et désorption dans le temps pour une période t_p . Il exprime cette humidité accumulée en adsorption comme suite :

$$G(t) = \int_0^t g(t)dt = b_m \Delta p h(\alpha) \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} \quad \text{III-35}$$

Où : α est la fraction de période durant laquelle le niveau d'humidité est élevé.

Pour le créneau de MBV proposé, $\alpha = 1/3$ et $h(\alpha) = 1,007$, l'humidité échangée devient :

$$G(t) = 0,568 b_m \Delta p \sqrt{t_p} \quad \text{III-36}$$

NB : l'humidité emmagasinée en adsorption pendant 8 h correspond à l'humidité libérée en désorption pendant 16 h.

Ainsi, la valeur théorique ou MBV_{idéale} s'exprime : en [g/ (m². %HR)], en fonction de l'humidité emmagasinée et par l'équation [III-36] normalisée avec le changement d'humidité en surface. Cette MBV est proportionnelle à l'effusivité hydrique du matériau (b_m) multipliée par la racine carrée de la période d'adsorption/désorption d'humidité (t_p). Donc, elle peut s'exprimer à l'aide de la relation suivante :

$$MBV_{idéale} \approx \frac{G(t)}{\Delta HR} = 5,68 \cdot 10^{-3} P_{vs} b_m \sqrt{t_p} \quad \text{III-37}$$

III.4.3.1 Effusivité hydrique (b_m)

L'effusivité hydrique (b_m en $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{S}^{1/2} \cdot \text{Pa})]$) représente la capacité du matériau à absorber ou libérer rapidement l'humidité dans son environnement lorsque sa surface est exposée à un changement soudain d'humidité. Cette effusivité peut être calculée à partir de l'équation suivante (Rode et al. 2007) :

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \rho_0 \frac{\partial w}{\partial HR}}{P_{vs}}} \quad \text{III-38}$$

Où : δ_p est perméabilité à la vapeur d'eau du matériau en $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ et ρ_0 sa masse volumique sèche en $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

En somme, l'équation [III-38] permet d'estimer théoriquement le taux d'humidité absorbé par le matériau lorsque sa surface est soumise à une variation d'humidité relative soudaine. Alors que l'équation [III-37] permet d'estimer approximativement la valeur de la MBV du matériau dans des conditions expérimentales idéales.

A. Bétons de chanvre avec et sans MCP (BC+%MCP)

L'évolution de l'effusivité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative du BC+0%MCP, BC+20%MCP et BC+40%MCP est représentée par les courbes de la [Figure III-26]. Les valeurs qui ont permis de tracer ces courbes ont été obtenues à l'aide de l'équation [III-38] et en se basant sur les courbes d'ajustement des données de sorption à partir du modèle GAB et les valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau.

Toutes ces courbes ont la même allure et sont similaires à celles obtenues par d'autres auteurs (Collet et Pretot 2012b; Håkansson 1998). D'une manière générale, on constate que, quelle que soit l'hygrométrie ambiante, les bétons contenant le MCP présentent quasiment la même effusivité. Mais, ils sont moins effusifs que BC+0%MCP en raison de la présence des microbilles de paraffine qui obstruent partiellement les pores du matériau. Par ailleurs, et pour

toutes les formulations, cette effusivité augmente considérablement au-delà de 70% d'humidité relative, là où s'amorce la condensation capillaire.

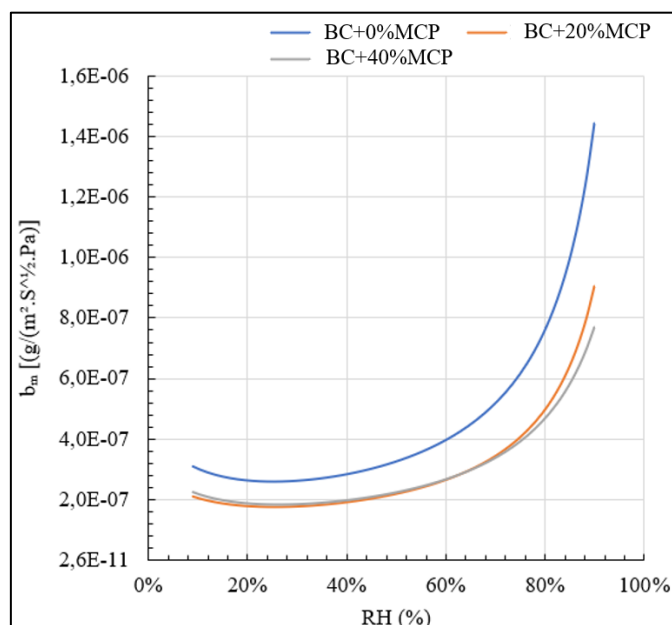


Figure III-26 : Evolution des effusivités hygriques des bétons de chanvre avec et sans MCP.

A titre indicatif, le [Tableau III-16] donne les valeurs de l'effusivité hydrique moyenne (entre 33 et 75% HR) et celles à 50% HR obtenues à l'aide de l'équation de l'effusivité hydrique. Ces résultats confirment qu'en présence de MCP, l'effusivité à la vapeur d'eau des échantillons de béton de chanvre est presque divisée par deux.

	ρ_0 (kg/m ³)	$b_{m_Moyenne}$ [10 ⁻⁷ g/ (m ² . S ^{1/2} . Pa)]	$b_{m_50\% HR}$ [10 ⁻⁷ g/ (m ² . S ^{1/2} . Pa)]
BC+0%MCP	692	3,79	3,30
BC+20%MCP	789	2,54	2,22
BC+40%MCP	946	2,54	2,26

Tableau III-16 : Effusivité hydrique (b_m) du BC+0%MCP, BC+20%MCP et BC+40%MCP.

B. Enduits de chanvre avec et sans MCP (HLCoat+%MCP)

Les courbes de la [Figure III-27] montrent l'évolution de l'effusivité à la vapeur d'eau des différents enduits avec et sans MCP. Contrairement au béton de chanvre, l'effusivité hydrique

des enduits varie peu en fonction du taux de MCP en particulier jusqu'à environ 70% d'humidité relative. Au-delà, la valeur de l'enduit sans MCP (HLC+0%MCP) s'écarte en augmentant plus rapidement que les autres.

	ρ_0 (kg/m ³)	$b_{m_Moyenne}$ [10 ⁻⁷ g/ (m ² . S ^{1/2} . Pa)]	$b_{m_50\% HR}$ [10 ⁻⁷ g/ (m ² . S ^{1/2} . Pa)]
HLCcoat + 0%MCP	989	6,52	5,90
HLCcoat + 11%MCP	830	4,98	4,58
HLCcoat + 23%MCP	705	4,39	4,03
HLCcoat + 40%MCP	646	3,34	3,03

Tableau III-17 : Effusivité hygrique des enduits de chanvre avec et sans MCP.

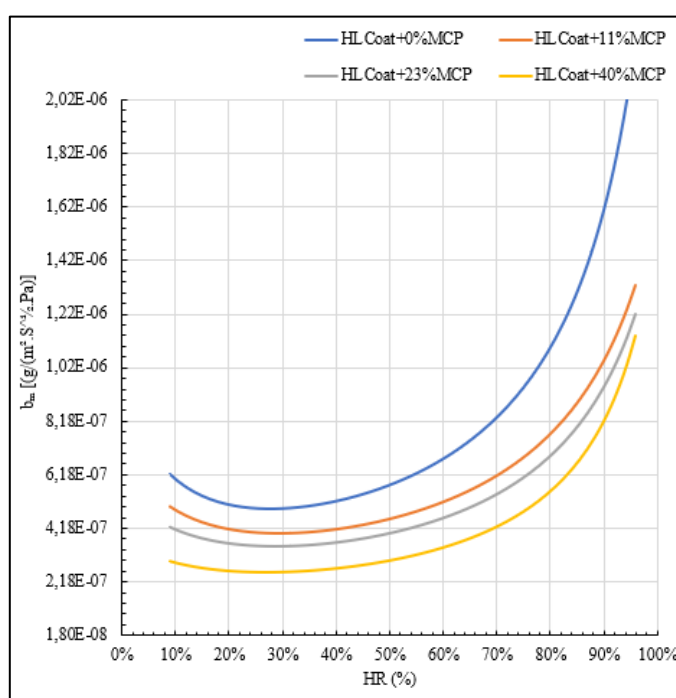


Figure III-27 : Evolution des effusivités des enduits de chanvre avec et sans MCP.

Les valeurs moyennes et celles à 50% HR reprises dans le [Tableau III-17] confirment ces observations. D'une manière générale, l'effusivité diminue lorsque le taux de MCP augmente, mais les écarts constatés sont moins importants que dans le cas des bétons de chanvre.

III.4.3.2 Valeur de la capacité tampon hydrique idéale ($MBV_{idéale}$)

Le [Tableau III-18] permet de comparer les valeurs de la MBV obtenues expérimentalement à la $MBV_{idéale}$ calculées à l'aide de l'effusivité hydrique moyenne entre 33 et 75% HR pour les bétons et les enduits avec les divers taux de MCP.

	ρ_0 (kg/m^3)	MBV [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$]	$MBV_{idéale}$ [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$]
BC+0%MCP	405	2,32	2,67
BC+20%MCP	443	2,27	1,51
BC+40%MCP	483	1,74	1,34
HLCoat+0%MCP	989	1,46	1,39
HLCoat+11%MCP	830	1,48	1,28
HLCoat+23%MCP	705	1,53	1,16
HLCoat+40%MCP	646	1,43	1,12

Tableau III-18 : Comparaison des MBV expérimentales aux MBV idéales pour tous les matériaux étudiés.

On peut voir qu'excepté pour le BC+0%MCP, les valeurs de la $MBV_{idéale}$ sont toutes inférieures aux valeurs expérimentales. On constate également que, pour le béton de chanvre et l'enduit sans MCP, l'écart entre ces deux valeurs est proportionnellement moins important que pour les échantillons avec MCP. Cependant, comparé à la bibliographie, Latif et collaborateurs (Latif et al. 2015) obtiennent une MBV idéale de 3,24 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ inférieure à celle expérimentale de 3,47 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$; tout comme remarqué sur les enduit et bétons de chanvre avec MCP étudiés. Alors que Rahim et collaborateurs (M. Rahim et al. 2016) obtiennent une MBV idéale de 2,66 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ supérieure à celle expérimentale de 2,02 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$; tout comme remarqué sur le BC+0%MCP. On ne peut donc pas affirmer si une MBV idéale inférieure ou supérieure à celle expérimentale permet de donner une meilleure estimation de la MBV dans des conditions idéales.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'évaluation des propriétés hygriques d'un béton de chanvre et d'un enduit avec incorporation de différents taux d'un matériau à changement de phase sous forme de microbilles de paraffine (Micronal PCM® DS 5001X).

La première partie se focalise sur l'étude de la capacité de sorption des bétons et enduits de chanvre avec et sans MCP. Elle permet de montrer, après détermination des isothermes de sorption, que l'ajout de MCP réduit dans tous les cas la capacité de sorption des matériaux, en raison notamment du colmatage partiel par les microbilles, d'une partie des pores des composants (matrice et/ou granulats végétaux).

Dans un second temps, on analyse l'évolution du comportement de la capacité de transfert et de diffusion d'humidité du béton et de l'enduit de chanvre après ajout du MCP. Au sortir de cette étude, on constate que la perméabilité à la vapeur des bétons de chanvre diminue fortement (quasiment de moitié) en présence de MCP. Alors que celle de l'enduit de chanvre/chaux ne baisse que légèrement. De même, la diffusivité à la vapeur d'eau des matériaux diminue en présence de MCP, particulièrement aux faibles taux d'humidité relative.

Cette partie se termine par une étude de la capacité tampon hydrique des différents matériaux élaborés avec et sans MCP et dans plusieurs conditions de température ambiante. L'étude expérimentale montre que la MBV du béton de chanvre diminue avec l'ajout du MCP. Alors que pour l'enduit, elle augmente sensiblement pour un taux de MCP modéré (11 et 23%). De plus, on a constaté dans tous les cas que la MBV du matériau augmente avec la température ambiante. Cette variation n'est pas linéaire mais diffère en fonction du taux de MCP incorporé dans le matériau de base. Néanmoins, l'étude de la $MBV_{idéale}$ confirme que le béton et l'enduit de chanvre demeurent de bons régulateurs d'humidité, y compris avec l'ajout de MCP.

Le tableau ci-après reprend la synthèse des résultats thermohydrques de l'évolution des propriétés du béton et de l'enduit de chanvre avec et sans MCP à l'échelle du matériau. Dans le chapitre suivant, nous tenterons de vérifier si ces comportements se confirment à l'échelle d'une paroi ou d'un local.

		BC + 0% MCP	BC +20% MCP	BC + 40% MCP	HLCcoat + 0% MCP	HLCcoat + 11% MCP	HLCcoat + 23% MCP	HLCcoat + 40% MCP
PROPRIETES THERMIQUES	ρ_0 (kg/m ³)	447	482	578	929	838	732	670
	λ (W/(m.K))	0,12	0,14	0,18	0,42	0,30	0,15	0,11
	C_p (J/(kg.K))	1 428	$C_S = 1 698$ $C_L = 1 677$	$C_S = 2 048$ $C_L = 2 019$	1 328,9	$C_S = 1 491$ $C_L = 1 436$	$C_S = 1 577$ $C_L = 1 526$	$C_S = 1 608$ $C_L = 1 560$
	L_F (J/kg)	-	28 980	57 620	-	12 951,1	32 034,5	46 766,7
	Enthalpie (kJ/kg)	-	-	-	26 720,4	42 068,6	61 769,2	76 258,5
PROPRIETES HYDRIQUES	W_{Exp} (à 33%HR) (%)	0,80	0,74	0,75	1,36	1,34	1,27	0,91
	δ_p [10 ⁻¹¹ kg/(m.s.Pa)]	2,38	1,19	1,13	1,54	1,34	1,35	1,27
	μ	8,40	16,67	17,76	12,90	14,87	14,82	15,76
	$D_{W_{50\%HR}}$ [10 ⁻⁷ m ² /s]	5,21	5,73	3,87	2,48	2,51	2,12	1,85
	$b_{m_{50\%HR}}$ [10 ⁻⁷ kg/(m ² .s ^{1/2} .Pa)]	3,30	2,22	2,26	5,90	4,58	4,03	3,03
	MBV [g/(m ² .%HR)]	2,32	2,27	1,74	1,46	1,48	1,53	1,43

Tableau III-19 : Synthèse des propriétés hygrothermiques des matériaux étudiés

Chapitre IV Etude numérique de l'impact des matériaux étudiés sur la performance énergétique et le confort hygrothermique d'une maison.

Les chapitres précédents font état de l'impact de l'ajout du MCP sur les propriétés : mécaniques, thermiques et hydriques de bétons et d'enduits de chanvre. De ces précédents chapitres, on peut retenir que l'ajout du MCP permet de renforcer l'inertie thermique du béton et de l'enduit de chanvre tout en conservant leurs capacités de régulation hydrique. Ces premiers résultats à l'échelle du matériau suscitent plusieurs questionnements. Dans ce chapitre, on se concentrera seulement sur l'enduit de chanvre avec et sans MCP et on tâchera de répondre à la question de son impact sur la performance thermique et le confort hygrothermique intérieur d'une maison.

L'étude numérique d'une maison individuelle revêtue à l'intérieur d'enduits de chanvre avec et sans MCP à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique (PLEIADES_STD_COMFIE) sera présentée dans la première partie du chapitre afin d'évaluer le confort thermique et la performance énergétique. Ensuite, l'évolution du confort hydrique à l'intérieur de la chambre de cette même maison sera étudiée à l'aide du logiciel SPARK. Ces études ont été menées au Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV).

IV.1 Impact des enduits étudiés sur le confort thermique et les besoins énergétiques d'une maison individuelle

IV.1.1 Présentation du logiciel PLEIADES

PLEIADES est un logiciel complet pour l'écoconception des bâtiments et des quartiers. Il permet d'effectuer la simulation dynamique du comportement thermique d'un bâtiment afin d'évaluer les performances thermiques de ce dernier. Pour la prise en compte des phénomènes physiques très variés, le modèle aux différences finies peut être utilisé. Cependant, ce dernier utilise des systèmes d'équations linéaires et non-linéaires pour représenter les phénomènes liés à l'évolution thermique des bâtiments. Ce qui est coûteux en temps calcul. Dans PLEIADES, une réduction du modèle aux différences finies par analyse modale a été utilisée (Salomon, Mikolasek, et Peuportier 2005).

Ce logiciel est écrit dans l'environnement Delphi en langage pascal dans lequel un problème en bâtiment est décrit sous la forme d'une structure d'objets reliés par des pointeurs. C'est-à-dire qu'une zone thermique contient des pointeurs sur ses parois et chaque paroi contient elle-même des pointeurs sur des : vitrages, masques, Etc. Dans cet environnement, les composants de base sont combinés pour former des structures plus complexes.

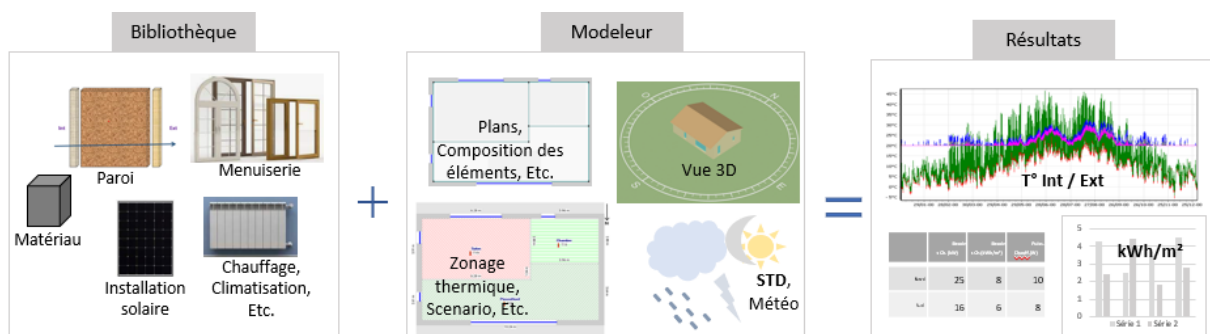


Figure IV-1 : Schéma du fonctionnement de PLEIADES_STD_COMFIE

Depuis sa création jusqu'à nos jours, l'environnement de PLEIADES n'a pas cessé d'évoluer. Il a été conçu et développé par Gefosat puis IZUBA énergie avec le soutien de l'ADEME. Ce logiciel a été enrichi avec différents outils et modules dédiés : au dimensionnement, à la conception énergétique et environnementale, et à la simulation thermique. Parmi ces modules et outils, on retrouve : STD (Simulation Thermique Dynamique),

COMFIE, BIM, Règlementation Thermique (RT), Règlementation Environnementale (RE2020), Etc. Dans le cadre de notre étude, nous ne nous limiterons qu'à l'utilisation de la Bibliothèque, le Modeleur et le Résultats ; présentés sur la [Figure IV-1].

L'outil « Bibliothèque » est constitué de données thermiques sur : les parois et les menuiseries, les ponts thermiques, les scénarios, Etc. Cette bibliothèque laisse à l'utilisateur la possibilité d'y ajouter de nouveaux matériaux, éléments, scénarios avec la possibilité d'importer et exporter son contenu.

Concernant le modeleur de PLEIADES, ce dernier est constitué d'onglets dépliant en fonction des besoins. Dans notre cas, nous n'avons utilisé que les cinq onglets suivants : généralités, plan, STD, 3D et Calcul. L'onglet Généralités permet de : nommer le projet, configurer les éléments du bâtiment, Etc. Alors que l'onglet Plan permet de : importer ou dessiner le plan du bâtiment étudié, définir les scénarios, faire un zonage thermique, Etc. En revanche, le STD permet de : vérifier le zonage thermique, situé le projet dans une zone météorologique, Etc. Puis, l'onglet 3D permet de visualiser le projet en trois dimensions par niveau ou entièrement en fonction de : l'orientation, la course du soleil, Etc. Enfin, l'onglet de calcul permet de lancer la simulation après avoir renseigné tous les paramètres de simulation : période, pas de temps de simulation, limite haute et basse d'inconfort, Etc.

Le module Résultats présente les résultats de simulation. Il permet de visualiser ces résultats à l'aide d'un éditeur de graphes offrant la possibilité de comparer les résultats des variantes pour donner un aperçu rapide des performances du bâtiment étudié. De plus, tous ces résultats peuvent être exportés au format de document Word ou Excel. Si besoin, il existe aussi la possibilité d'extraire un rapport complet du projet.

IV.1.2 Maison individuelle étudiée

L'étude portera sur une maison individuelle située à Croisilles (Pas-de-Calais) d'une superficie de 66,76 m² (10,24 m de long et 6,52 m de large) avec une hauteur sous plafond de 2,5 m. Cette maison est identique à celle présentée et étudiée dans la thèse de Leang (Leang 2020).

La [Figure IV-2] présente une vue 3D avec boussole et une vue 2D du plan délimitant la superficie de la maison en zone et donnant leurs caractéristiques. L'aménagement des pièces (la PiècesNord, le Salon et la Chambre) est aussi présenté sur cette figure.

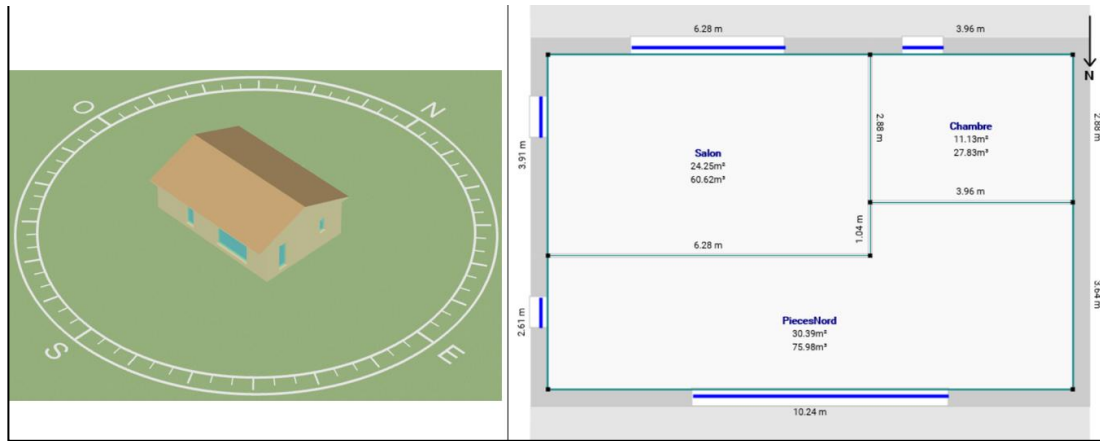


Figure IV-2 : Vue 3D et Vue plan de la maison étudiée.

A. Configuration de l'enveloppe

Les parois verticales extérieures de l'enveloppe de cette maison ont une épaisseur de 34 cm dont 30 cm en béton de chanvre comme montré sur [Figure IV-3]. Cette épaisseur est idéale pour procurer à la paroi en béton de chanvre des caractéristiques suffisantes pour assurer : une bonne isolation thermique, des déphasages temporels et une capacité d'amortissement des variations de températures. De plus, un mur de béton de chanvre de 30 cm permet d'assurer un confort d'été optimal : un amortissement de température d'environ 95% en été.

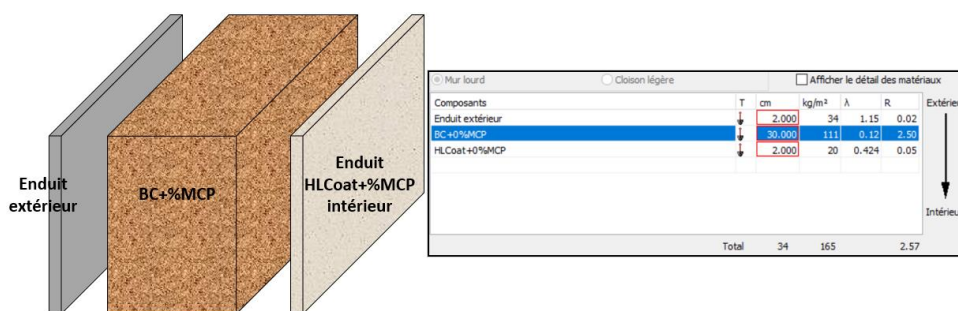


Figure IV-3 : Configuration des parois verticales de l'enveloppe de la maison.

Les enduits HLCoat+%MCP seront utilisés comme enduits intérieurs de la paroi et à l'extérieur un enduit existant dans la bibliothèque de PLEIADES sera utilisé comme montré sur la [Figure IV-3]. Les propriétés thermiques des HLCoat+%MCP et du BC+0%MCP obtenues

dans le Chapitre 2 sont utilisées pour réaliser les simulations et leurs valeurs sont rappelées dans le [Tableau IV-1].

	ρ (kg/m ³)	T° fusion (°C)	λ (W/(m.K))	C _P (J/(kg.K))	L _F (J/kg)
Enduit extérieur	1700	-	1,15	1000	-
BC + 0% MCP	370	-	0,12	1 428	-
HLCcoat+0%MCP	1008	-	0,424	1 328,9	-
HLCcoat+11%MCP	900,5	24,4	0,304	C _S = 1 491 C _L = 1 436	12 951,1
HLCcoat+23%MCP	620,9	24,5	0,148	C _S = 1 577 C _L = 1 526	32 034,5

Tableau IV-1 : Rappel des caractéristiques thermiques des matériaux étudiés.

Enfin, toutes les configurations des parois étudiées sont répertoriées dans le [Tableau IV-2] et leurs compositions dans le [Tableau IV-3]. Pour les parois horizontales, nous avons considéré les configurations étudiées par Leang (Leang 2020). Dans le cadre de nos études, on considérera le Cas 1 comme cas de référence.

	Matériaux	Epaisseurs (cm)
Cas 1	Enduit extérieur	2
	BC+0%MCP	30
	HLCcoat+0%MCP	2
Cas 2	Enduit extérieur	2
	BC+0%MCP	30
	HLCcoat+11%MCP	2
Cas 3	Enduit extérieur	2
	BC+0%MCP	30
	HLCcoat+23%MCP	2

Tableau IV-2 : Configurations des murs extérieurs utilisés.

	Matériaux	Epaisseurs (cm)	λ (W/(m.K))
Mur extérieur	Enduit extérieur	2	Cf. § Tableau IV-1
	BC+0%MCP	30	
	HLCcoat+%MCP	2	
Cloison intérieure	Carreau de plâtre	7	0,35
Plancher	Laine de verre ($30 \leq \rho < 40$)	10	0,039
	Béton	20	1,75
	Carrelage	2	1,7
Plafond	Laine de verre	20	0,041
	Plâtre	1	0,35
Toiture	Terre cuite	2	1,15

Tableau IV-3 : Composition des parois verticales et horizontales de la maison étudiée

- Fenêtres

Pour bien profiter des apports solaires et de l'éclairage naturelle, ainsi que réduire la déperdition thermique en hiver, les fenêtres utilisées sont de BBC-Double-vitrage peu émissif argon avec les dimensions présentées dans le [Tableau IV-4].

	Orientation	Longueur * hauteur
Fenêtre de la chambre	Sud	0,8 m * 2,15 m
Fenêtre du séjour	Sud	3 m * 2,15 m
Fenêtre du séjour	Est	0,8 m * 2,15 m
Fenêtre des pièces nord	Est	0,6 m * 1,15 m
Fenêtre des pièces nord	Nord	5 m * 1 m

Tableau IV-4 : Caractéristiques des fenêtres du logement étudié.

Ces fenêtres ont toutes les mêmes caractéristiques : des coefficients de transmission égaux ($U_{\text{vitrage}}=1,3 \text{ W/ (m}^2\cdot\text{K)}$ et $U_{\text{cadre}}=2,1 \text{ W/ (m}^2\cdot\text{K)}$) et un facteur solaire de 0,549.

Puisque l'objectif principal de ce chapitre est d'avoir une idée sur l'impact de l'enduit de chanvre avec MCP par rapport au cas de référence (sans MCP), afin de simplifier les simulations et réduire les paramètres à étudier, les ponts thermiques ne sont pas considérés dans cette étude.

B. Météo

Sachant que la maison étudiée est située à Croisilles (Pas-de-Calais), la station météo de Trappes est la station météorologique dans le logiciel PLEIADES la plus proche de cette ville de la région Hauts-De-France. Sur la [Figure IV-4], on peut voir la localisation géographique de la station météorologique en fonction des zones climatiques (été et hiver) de la France. A l'aide des points rouges sur les deux cartes, la station météo de Trappe est située dans la zone climatique H1 en hiver et dans la zone Eb en été.

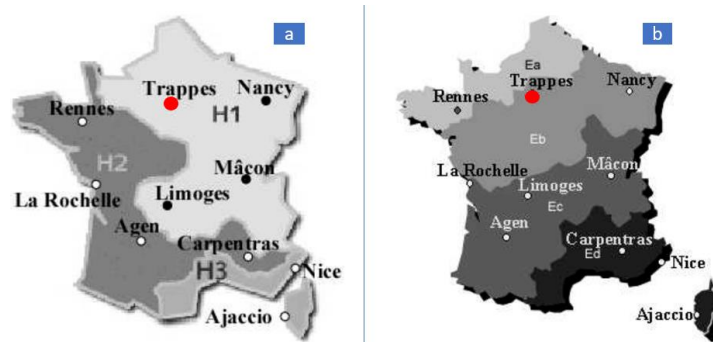


Figure IV-4 : Zone climatique d'hiver (a) et zone climatique d'été (b) (Cron et Inard 2003).

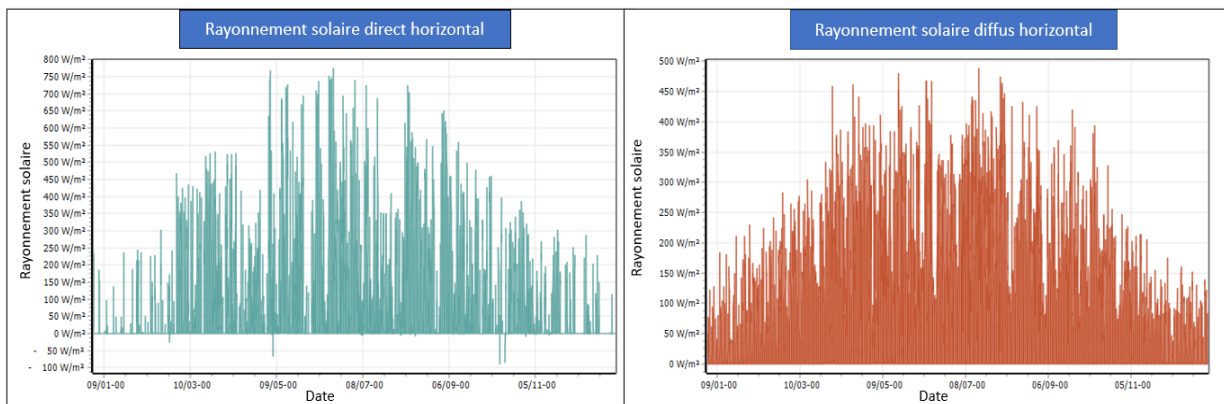


Figure IV-5 : Rayonnements solaires directs et diffus annuels de Trappes.

La [Figure IV-5] présente l'évolution du rayonnement solaire direct et diffus horizontal tout au long de l'année. On peut noter que le rayonnement reçu varie en fonction des saisons. Il peut atteindre une valeur maximale de 775 W/m² et de 475 W/m² pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus, respectivement. Il est à noter que le logiciel PLEIADES COMFIE prend automatiquement en compte ces rayonnements solaires dans le calcul.

La [Figure IV-6] présente l'évolution de la température extérieure de Trappes tout au long de l'année. A travers cette figure, la semaine la plus chaude de la zone climatique étudiée se situe entre 13/08 et le 20/08 alors que celle la plus froide se situe entre le 26/11 et le 03/12. La température extérieure de notre zone climatique peut descendre jusqu'à -6 °C en hiver et atteindre une valeur maximale de 32,5 °C en été.

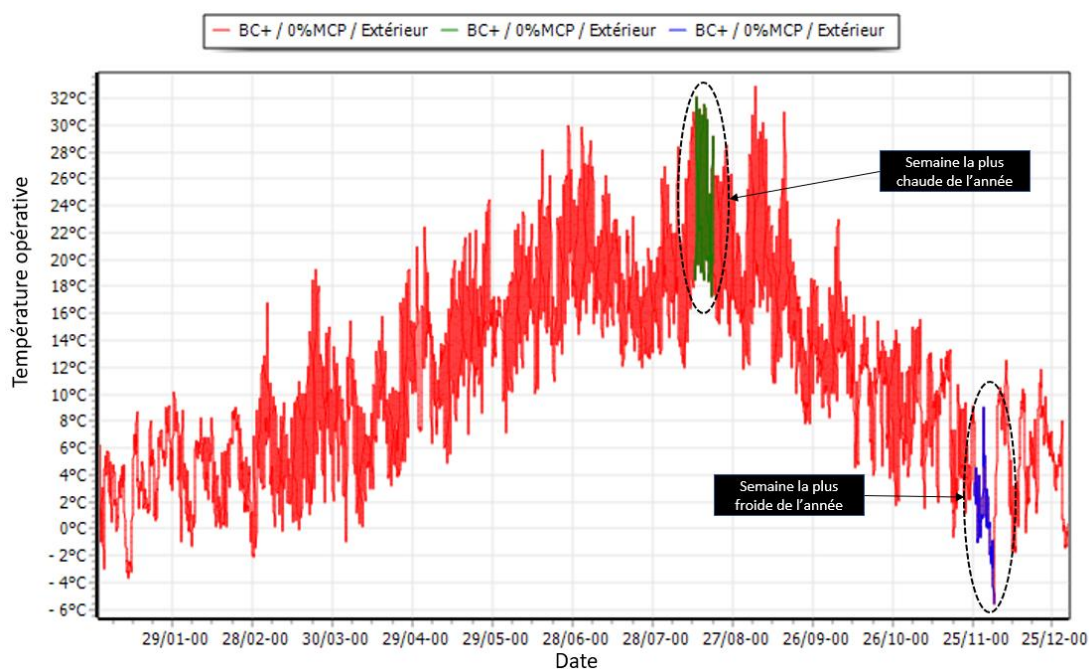


Figure IV-6 : Evolution annuelle de la température extérieure de Trappes

C. Différents scénarios considérés

Dans cette étude, la ventilation simple flux est considérée avec un débit fixe de 0,5 l/h. Comme pour la plupart des auteurs et en accord avec la recommandation en vigueur, nous considérons une température de consigne de 19 °C à l'intérieur du logement en hiver pour évaluer le besoin de chauffage. En été, on considère une variation de température intérieure libre et sans climatisation et une température limite de confort de 28 °C.

Enfin, il est nécessaire de souligner qu'après la simulation, le logiciel PLEIADES donne la température opérative qui est la moyenne pondérée de la température de l'air et les températures des surfaces des parois. Il s'agit d'une température résultante considérée comme un bon indicateur du confort thermique.

IV.1.3 Résultats

Dans cette section, nous allons présenter les résultats obtenus sur l'impact de l'enduit avec MCP sur la performance thermique de la maison étudiée. Comme déjà mentionné dans la section [IV.1.2], nous considérons le Cas 1 (enduit intérieur est HLCcoat+0% MCP) comme cas de référence. Les autres cas sont : le HLCcoat+11%MCP (Cas 2) et le HLCcoat+23%MCP (Cas 3).

D'autre part, rappelons que pour évaluer le besoin en chauffage, la température de consigne de chauffage des zones thermiques de la maison est maintenue à 19 °C durant toute l'année. La [Figure IV-7] rappelle les zones thermiques et leurs orientations. Il ne sera présenté que la variation de la température opérative de la maison durant la semaine la plus chaude car l'impact de l'ajout du MCP est plus significatif. Cette semaine part du 13 au 20/08 et a une température extérieure qui varie entre 17,3 et 32,2 °C.

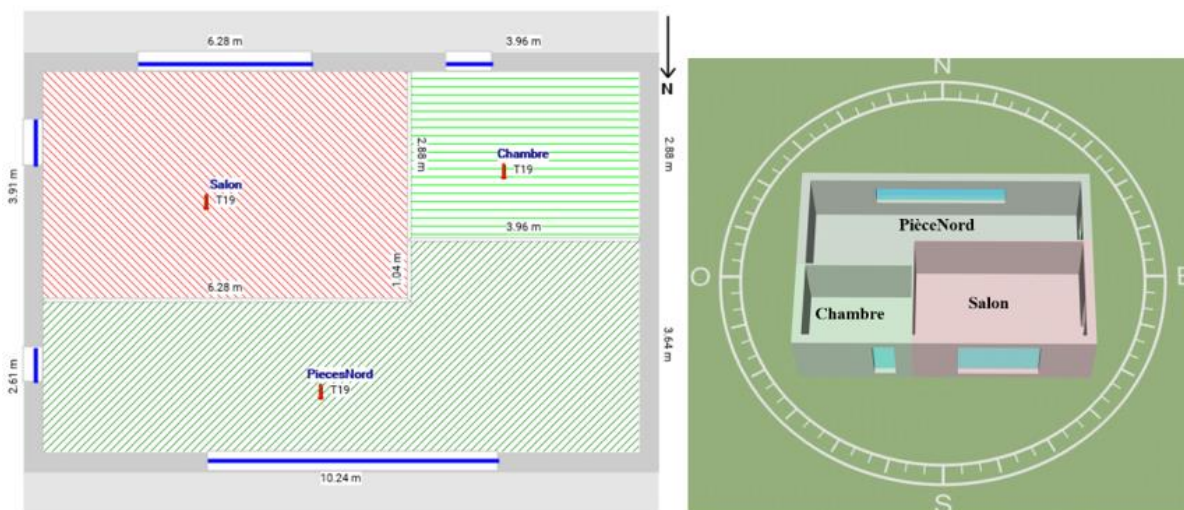


Figure IV-7 : Zonage thermique et température de consigne fixée dans chaque zone.

IV.1.3.1 Impact de l'enduit avec MCP sur le confort thermique de la maison

A. Impact des enduits utilisés sur la température opérative de la maison

On présentera tout d'abord l'évolution de la température opérative de la maison pour les trois cas étudiés.

HLCcoat+0%MCP : Cas 1 (référence)

La [Figure IV-8] présente l'évolution des températures opératives des trois zones thermiques du logement étudié durant la semaine la plus chaude pour le Cas 1. Sur cette figure, on remarque une différence maximale de 2 °C entre la température maximale atteinte dans le Salon (Tmax = 32 °C) et celle des autres zones thermiques (Tmax = 30 °C). On remarque aussi que les températures minimales entre le Salon, la Chambre et la PiècesNord sont très proches. Aussi, l'amplitude de variation de température dans le salon est plus élevée (environ 5 °C) que celles des deux autres zones thermiques (environ 3 °C).

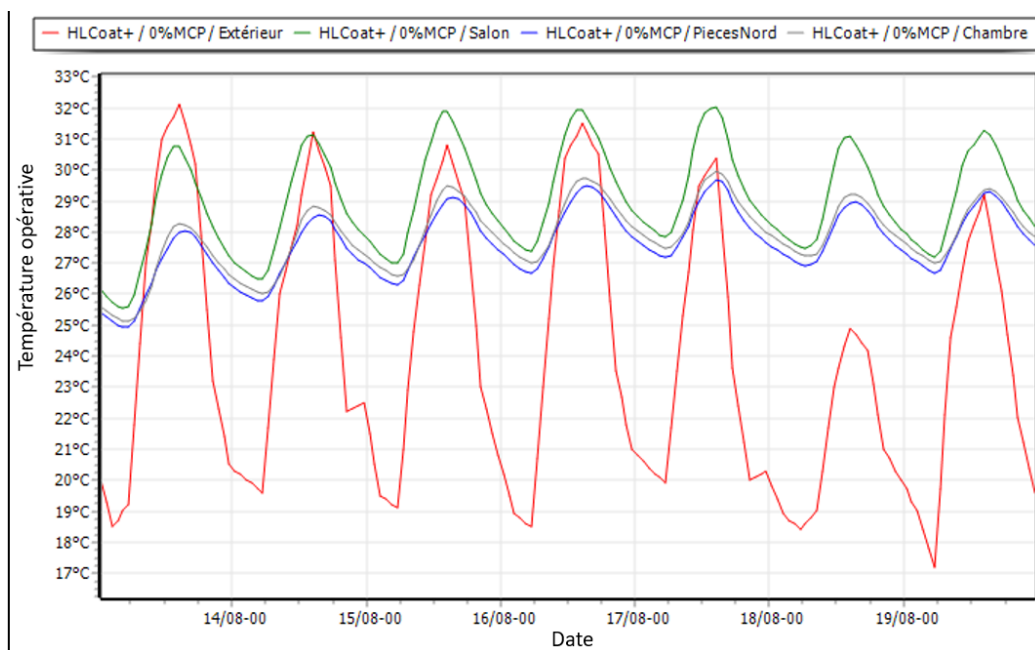


Figure IV-8 : Evolution de la température des zones thermiques : Cas 1.

Il est aussi intéressant de noter que du 18 au 20/08, la température intérieure du Salon est nettement supérieure à celle de l'extérieur. Ces observations peuvent être expliquées par l'apport solaire dans les pièces comme montré sur la [Figure IV-9]. Cette figure montre qu'en raison de l'orientation et la surface des fenêtres [Figure IV-7], l'apport solaire est beaucoup

plus élevé dans le salon par rapport aux autres pièces. Du 15 au 16/08, l'apport solaire dans le Salon peut atteindre 1300 W comparé à 410 W et 280 W pour la PiècesNord et la Chambre, respectivement.

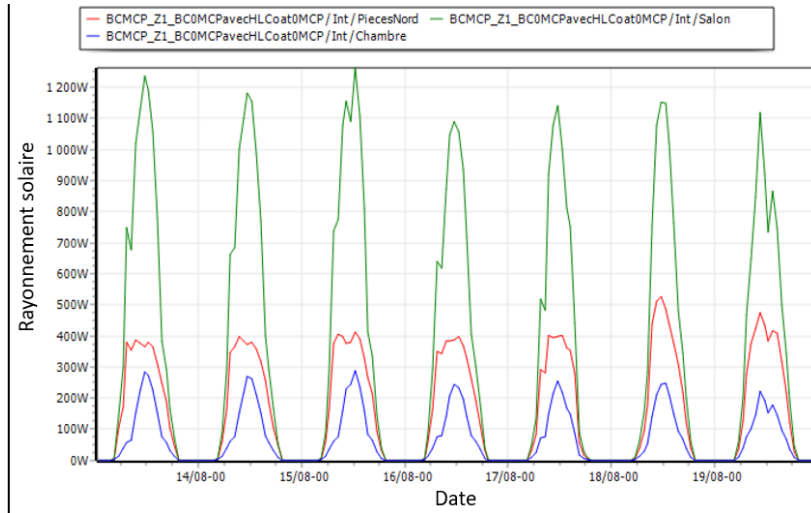


Figure IV-9 : Apport solaire du 13 au 20/08 dans la PiècesNord, le Salon et la Chambre.

HLCoat+11%MCP : Cas 2

Dans cette configuration, la couche d'enduit intérieur « HLCoat+0%MCP » du cas de référence a été remplacée par une couche d'enduit HLCoat+11%MCP (Cas 2).

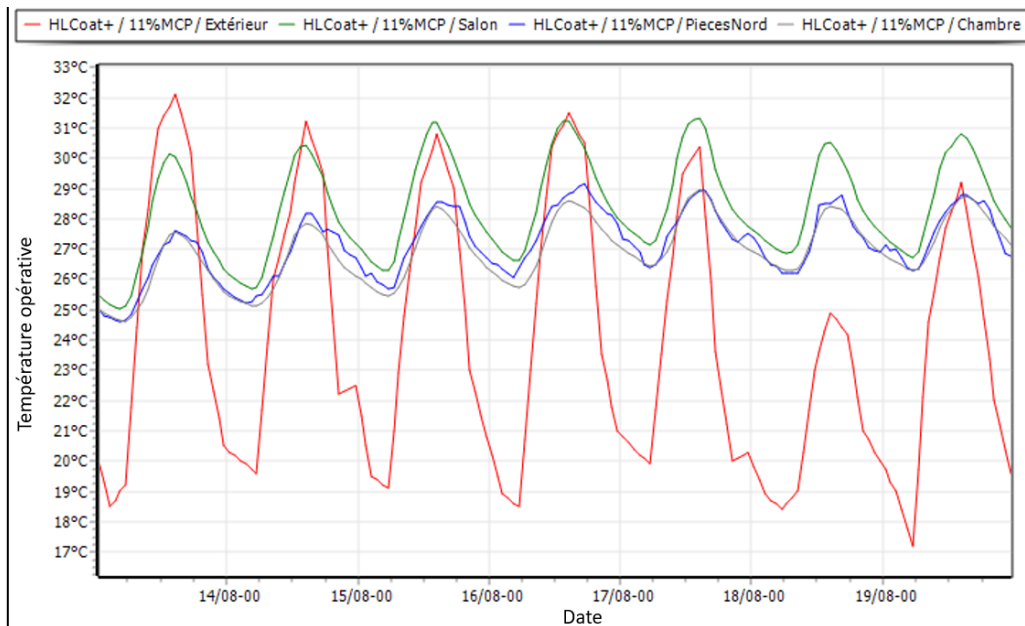


Figure IV-10 : Evolution de la température des zones thermiques : Cas 2.

Durant la semaine la plus chaude de l'année présentée sur la [Figure IV-10], on remarque que la température maximale dans le salon reste inférieure à 31,5 °C, celle de la PiècesNord et la Chambre reste inférieure à 29 °C.

Comme sur le cas 1, on observe une amplitude de variation de la température du Salon nettement supérieure à celle de la PiècesNord et de la Chambre. Les pics de températures sont entre 0,5 °C et 1 °C dans le salon (inférieurs à ceux du cas précédent) et d'environ 0,5 °C pour la PiècesNord. Ce comportement différent pourrait être expliqué par l'influence de l'enduit avec MCP qui tempore les surchauffes dans les zones thermiques les plus exposées à l'ensoleillement.

HLCcoat+23%MCP : Cas 3

Pour cette configuration, l'enduit intérieur a été remplacé par le HLCcoat+23%MCP (Cas 3) avec une quantité de MCP plus importante que pour le cas précédent. Durant cette période-là, la plus chaude de l'année, la température du salon évolue entre 24,9 °C et 31,16 °C alors que celle de la Chambre évolue entre 24,7 et 28,5 °C ; comme présenté sur [Figure IV-11]. Pour la PiècesNord, le comportement est similaire au cas précédent.

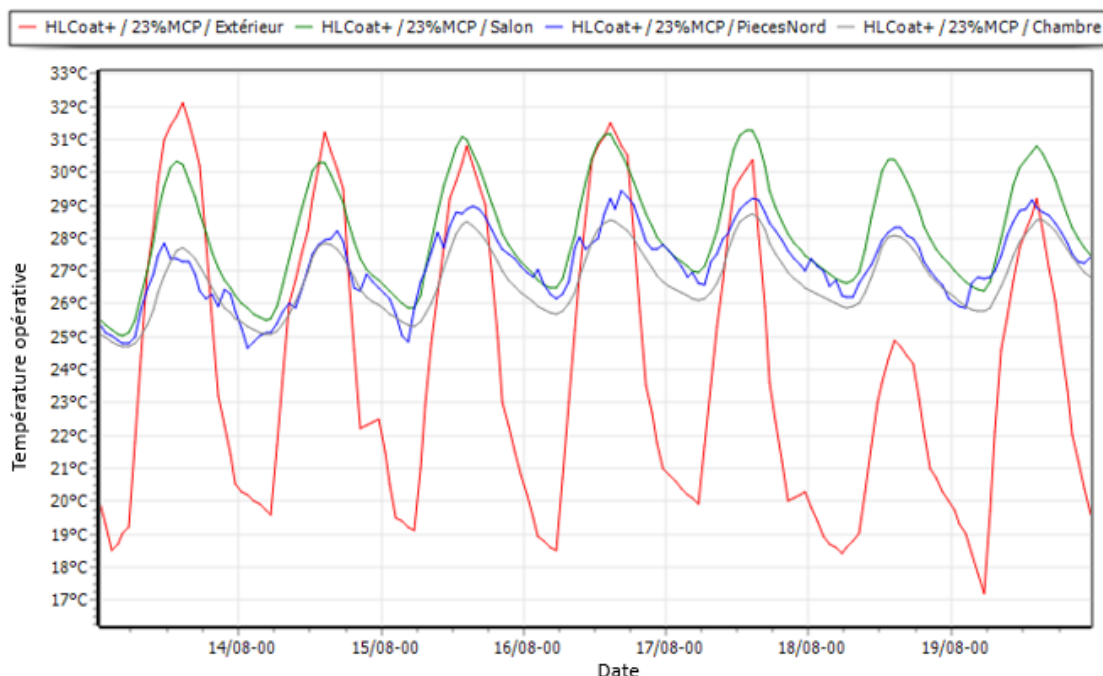


Figure IV-11 : Evolution de la température des zones thermiques : Cas 3.

En somme, en été, nous remarquons que les températures du Salon, la Chambre et la PiècesNord atteignent des valeurs supérieures à la température de fusion de notre MCP. Par conséquent, l'utilisation de l'enduit avec MCP permet de réduire le pic de température dans les pièces étudiées. De plus, son impact sur l'évolution de la température et l'amplitude de variation diffère en fonction des zones thermiques considérées dans la maison.

Afin de mieux évaluer l'impact des enduits utilisés sur l'évolution de la température de chaque zone thermique, la [Figure IV-12] présente la variation de la température opérative des pièces du logement et pour les trois cas étudiés : (a) pour le Salon, (b) pour la Pièces Nord et (c) pour la Chambre.

On peut voir sur la [Figure IV-12 a] que la température opérative maximale dans le Salon diminue au fur et à mesure que la quantité de MCP dans l'enduit intérieur augmente. En effet, entre le Cas 1 et le Cas 2, on observe une diminution du pic de température de $0,68\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alors qu'entre le Cas 1 et le Cas 3, une réduction du pic de la température maximale de $0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ est observée.

En ce qui concerne la Chambre, les résultats obtenus et présentés sur la [Figure IV-12 b] montrent que le pic de la température maximale entre la Cas 1 et le Cas 2 diminue de $1,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ comparée à une valeur de $1,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre le Cas 1 et le 3.

Cependant, dans la PiècesNord présentée sur la [Figure IV-12 c], l'analyse de l'évolution de la température en fonction du taux de MCP contenu dans l'enduit montre une réduction du pic de la température assez faible entre les trois cas étudiés. Comme expliqué précédemment, une simulation thermique avec un autre logiciel pourrait être faite pour confirmer ces résultats.

En somme, le Cas 2 et le Cas 3 permettent une meilleure régulation de température intérieure que le Cas 1. L'ajout du MCP dans l'enduit intérieur permet donc d'améliorer le confort thermique de la maison en été. Regardons, néanmoins, l'influence du MCP dans l'enduit sur le nombre d'heures d'inconfort estival.

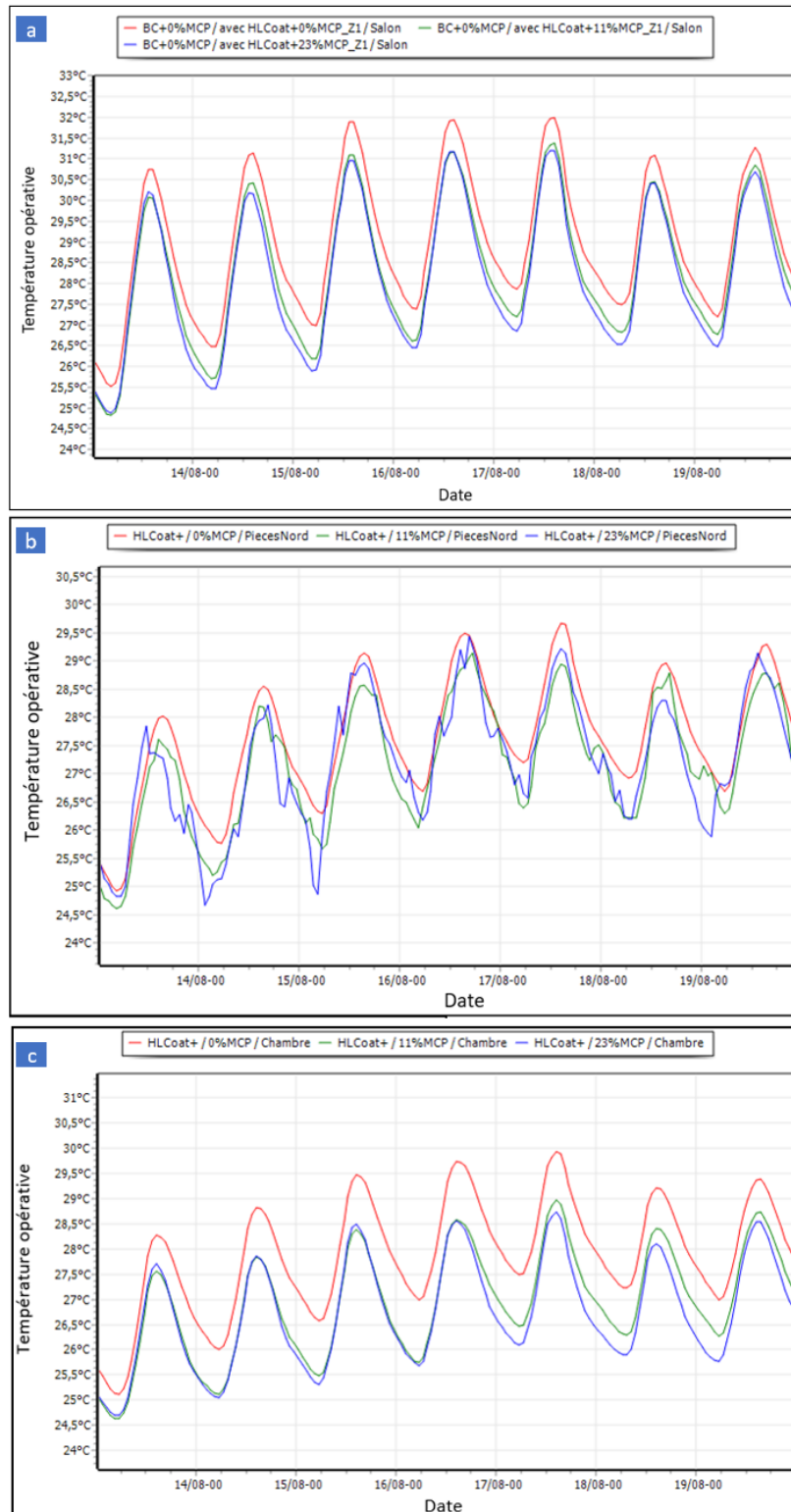


Figure IV-12 : Température opérative des pièces : Salon (a), PiècesNord (b) et Chambre (c) en fonction de l'enduit HLCoat+%MCP.

D. Influence des enduits utilisés sur le nombre d'heures d'inconfort estival

La [Figure IV-13] présente l'évolution du nombre d'heures d'inconfort estival en considérant une température de confort en été jusqu'à 28 °C. Comme montré sur cette figure, le nombre d'heures pendant lesquelles la température opérative est supérieure à la température d'inconfort diminue proportionnellement à la quantité de MCP ajoutée dans l'enduit. En effet, entre le Cas 1 et le Cas 3, on remarque une diminution du nombre d'heures d'inconfort de : 22,12% pour le Salon, 38,7% pour la PiècesNord et 53,6% pour la Chambre. Ainsi, le taux d'inconfort, indiqué dans le [Tableau IV-5], diminue dans chaque zone thermique en fonction du taux de MCP présent dans l'enduit.

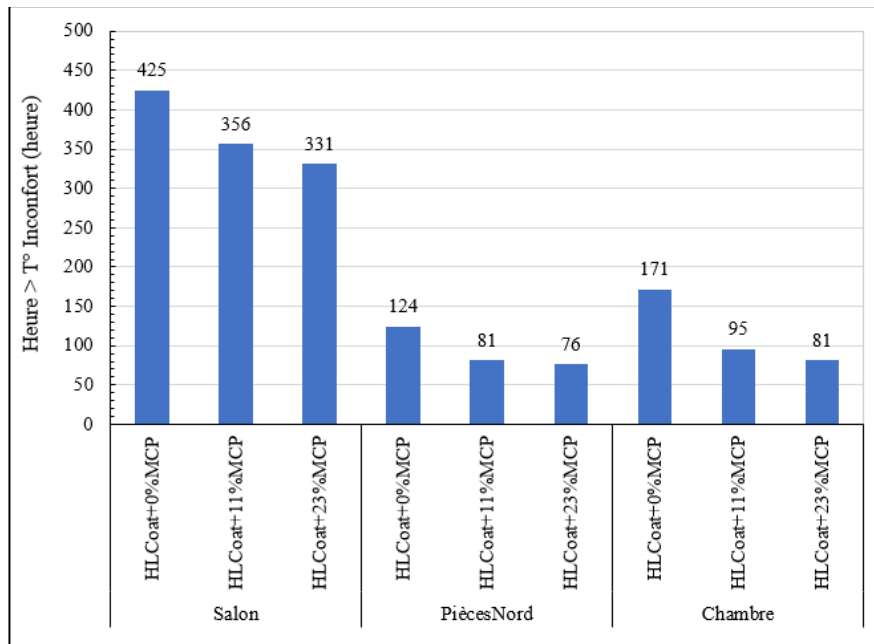


Figure IV-13 : Evolution du nombre d'heures d'inconfort en fonction de l'enduit utilisé.

IV.1.3.2 Impact des enduits utilisés sur les besoins en chauffage de la maison

La [Figure IV-14] et le [Tableau IV-5] présentent l'évolution des besoins en chauffage de chaque zone thermique de la maison étudiée. Les résultats montrent une légère diminution des besoins en chauffage de 1 kWh/m² dans chaque zone thermique entre le Cas 1 et Cas 3. Cette réduction relative peut être due, d'une part à la diminution de la conductivité thermique de l'enduit en fonction du taux de MCP (de 0,424 à 0,148 W/(m.K)), et d'autre part à l'augmentation de sa chaleur massique (de 1329 à 1577 J/(Kg.K) [cf. § Tableau IV-1].

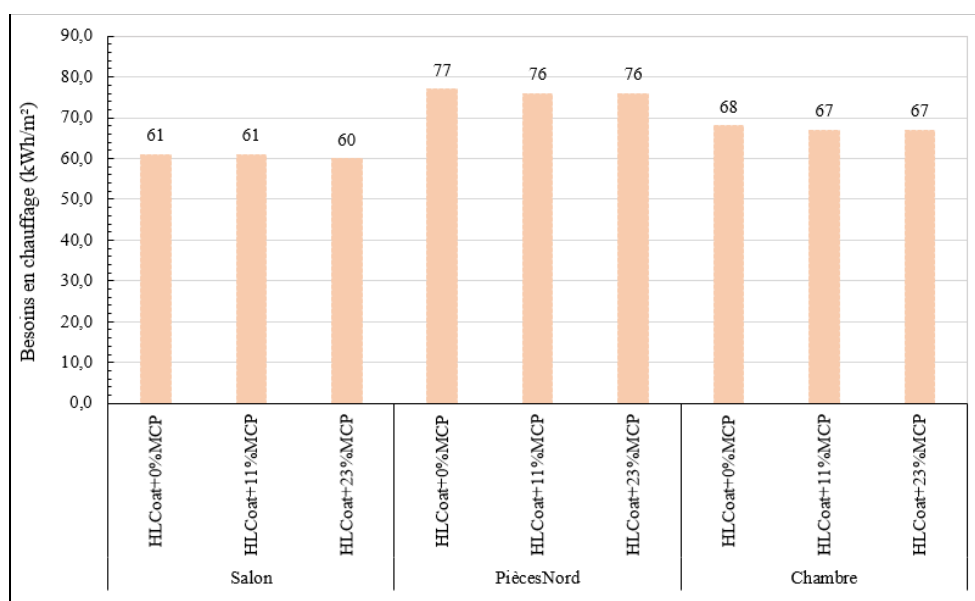


Figure IV-14 : Evolution des besoins en chauffage en fonction du HLCcoat+%MCP appliqué.

	Zones Thermiques	Besoins Ch. (kWh/m²)	Apports Solaires bruts (kWh)	Heures > T° Inconfort (heure)	Taux d'inconfort (%)	Surface (m²)	Volume (m³)
HLCcoat+0%MCP	PiecesNord	77	861	124	1,42	30,39	75,98
	Salon	61	2 249	425	4,86	24,25	60,68
	Chambre	68	445	171	1,96	11,13	27,83
HLCcoat+11%MCP	PiecesNord	76	861	76	0,87	30,39	75,98
	Salon	61	2 249	361	4,13	24,25	60,68
	Chambre	67	445	96	1,10	11,13	27,83
HLCcoat+23%MCP	PiecesNord	76	861	81	0,93	30,39	75,98
	Salon	60	2 249	344	3,94	24,25	60,68
	Chambre	67	445	82	0,94	11,13	27,83

Tableau IV-5 : Résultats obtenus de la maison en fonction de l'enduit utilisé.

IV.2 Impact des enduits étudiés sur le confort hygrique

IV.2.1 Modélisation

Les problèmes de modélisation des transferts hygrothermiques dans le bâtiment intègrent : les transferts à l'échelle du matériau et de la paroi, le modèle pour les volumes d'air, ainsi que les échanges entre les surfaces et les ambiances intérieures et extérieures. D'autre part, les modèles physiques qui permettent de faire un couplage de ces transferts thermo-aérauliques dans un bâtiment sont décrits par des systèmes d'équations complexes. La complexité de ces systèmes d'équations rend impossible une résolution analytique.

Il existe différents outils de simulation numérique offrant une résolution de ces problèmes qui peuvent être classés en trois catégories : monolithiques, modulaires ou environnements basés sur les systèmes d'équations (Mora 2003). Les environnements monolithiques sont caractérisés par une architecture de calcul conçue en un seul bloc algorithmique et donc difficile à modifier. Alors que les environnements modulaires sont basés sur l'assemblage des modules pour la formulation et la réalisation du problème. Ils sont facilement modifiables mais l'inconvénient est que les sorties et entrées sont fixées. Concernant les environnements basés sur les systèmes d'équation, il s'agit de formuler le problème, puis d'y associer des équations. L'inconvénient principal de cette catégorie est une prise en main assez longue pour l'utilisateur.

Dans cette section, on a besoin d'un outil de simulation permettant d'évaluer l'impact de l'enduit utilisé sur le confort hygrique à partir des valeurs de MBV déterminées dans le Chapitre III. Ce couplage MBV-confort hygrique existe rarement sur les logiciels commerciaux. Par conséquent, nous orientons notre choix vers SPARK, un outil de simulation orienté objet et basé sur les systèmes d'équations qui sera présenté dans la suite.

IV.2.1.1 Logiciel SPARK

A. Description du logiciel

Le logiciel SPARK (Simulation Problem Analysis Research Kernel) est un environnement qui permet de développer des modèles informatiques pour la simulation thermique et hydrique des bâtiments. Ce dernier permet l'implémentation des équations différentielles décrivant des systèmes physiques pour obtenir des solutions efficaces des problèmes (Sowell et Moshier

2003; Nataf et Winkelmann 1994; Wurtz 1995; Sowell et Haves 2001). Dans SPARK, la description du problème se fait par la décomposition de ce dernier en objets.

A l'aide de l'interface, l'utilisateur peut : définir les équations des systèmes physiques (ou définir les objets), relier ces objets entre eux pour définir le problème de simulation à résoudre, spécifier les paramètres et les données d'entrée, et spécifier les sorties souhaitées. Par la suite, ces objets sont définis dans des fichiers textes sous forme d'équations mathématiques. Enfin, ces fichiers sont traités par SPARK de façon à traduire des fonctions en langage C++ et des objets stockés dans des bibliothèques.

Un exemple présenté sur la [Figure IV-15] montre la méthode pour définir des équations de transfert de chaleur radiatif et convectif dans SPARK. Les variables de ces équations peuvent être considérées comme des liens auxquels on peut attribuer des valeurs ou associer des variables d'autres équations. De plus, en associant deux objets, une ou plusieurs des variables de ces objets sont partagées par les équations, comme illustré sur la [Figure IV-15].

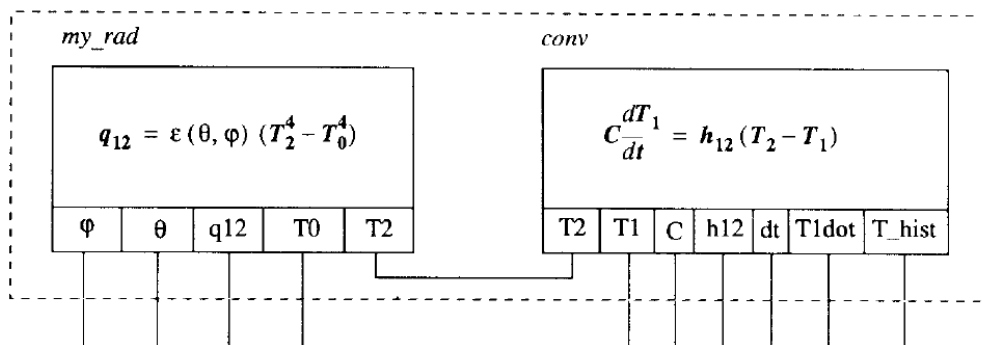


Figure IV-15 : Classes macroscopique et microscopique représentant le transfert de chaleur radiatif et celui convectif dans SPARK (Nataf et Winkelmann 1994).

En somme, selon Tran Le (Tran Le 2010), il s'agit d'un environnement qui prend en compte toutes les phases de la simulation : en partant de la traduction des modèles fournis par l'utilisateur jusqu'à l'obtention des résultats, en passant par l'établissement d'un algorithme et son implémentation. Comme mentionné et démontré précédemment, l'environnement orienté objet de SPARK a une grande modularité dans l'architecture logicielle. Il offre la facilité d'intégrer des modèles de différentes natures et les entrées et sorties ne sont ni fixées ni limitées.

B. Librairie de modèle du logiciel

Grâce aux différentes études portant sur la modélisation des transferts hygrothermiques dans le bâtiment, une librairie de modèle présentant les trois domaines du bâtiment a été développée dans SPARK : l'air intérieur, l'enveloppe et les différents systèmes (climatisation, ventilation, Etc.) (Wurtz 1995; Mendonça et al. 2002; Chadi Maalouf 2006; Bourdoukan 2008; Tittlein 2008)(Tran Le 2010).

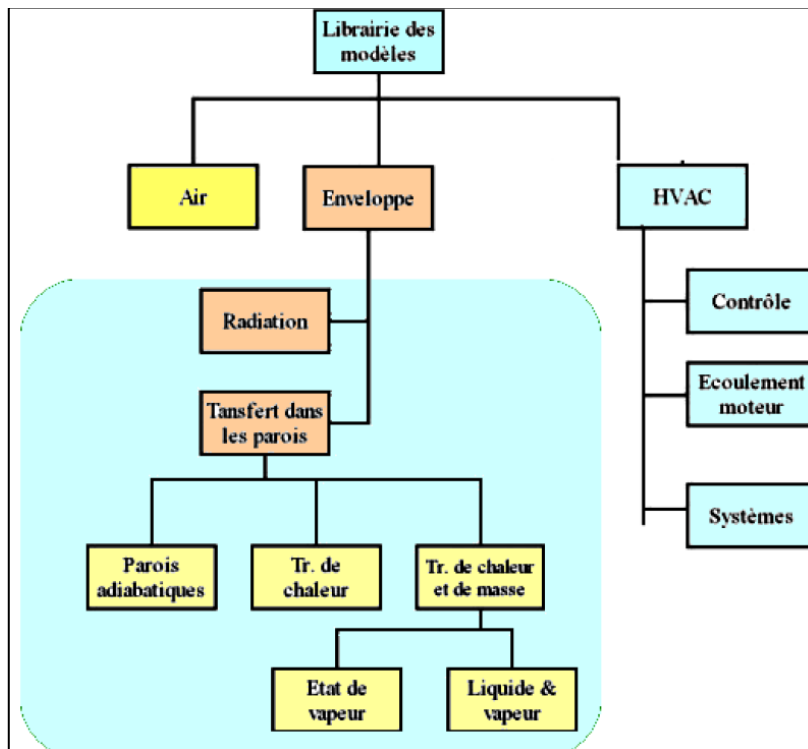


Figure IV-16 : Diagramme de la librairie des modèles de SPARK, (Anh Dung Tran Le 2010; Mendonça et al. 2002).

De plus, la [Figure IV-16] montre la structure de cette librairie de modèles en trois grands groupes :

- ✓ L'air intérieur, il concerne les équations de l'air intérieur ;
- ✓ L'enveloppe, il contient : les équations de l'échange radiatif entre l'enveloppe du bâtiment et l'ambiance ; les équations de transferts hygrothermiques dans une paroi ;
- ✓ Le troisième groupe contient : les modèles de systèmes de conditionnement de chauffage, de ventilation et de climatisation, Etc.

Dans cette librairie de modèles de SPARK, le modèle de la capacité effective présenté par Janssen et Staf (Janssen et Staf 2009) a été développé et sera utilisé dans le cadre de cette étude.

IV.2.1.2 Description du modèle physique : Modèle de la capacité effective

Le modèle de la capacité effective suppose donc que la capacité tampon hydrique de l'enveloppe ou du matériau étudié soit toujours en équilibre avec les conditions climatiques intérieures du local. Selon Janssen et Staf (Janssen et Staf 2009), le modèle de la capacité effective est établi à partir de l'équation de conservation de masse et peut être écrit comme suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{V}{R_v T_i} + \frac{100 HIR^* V}{P_{v,sat}(T_i)} \right) \cdot \frac{\partial P_{vi}}{\partial t} = (P_{ve} - P_{vi}) \cdot \frac{nV}{3600 R_v T_i} + G_{vp} \\ HIR^* = \left(\sum_k A_k \cdot MBV_k \right) / V \end{array} \right. \quad \text{IV-1}$$

Avec : V : volume du locale (m³), R_v : constante de gaz parfait = 462 J/(kg.K), T_i : température intérieure (K), HIR* : capacité tampon hydrique normalisée par le volume (kg/ (m³. %HR)) ; P_{v,sat} : pression de vapeur saturante (Pa), P_{vi} : pression de vapeur intérieure (Pa), P_{ve} : pression de vapeur extérieure (Pa), n : taux de ventilation (l/h), G_{vp} : source de vapeur d'eau (kg/s), A_k : surface exposée de l'élément k (m²), MBV_k : capacité tampon hydrique du matériau k (kg/ (m². %HR)).

Il est à noter que ce modèle permet d'évaluer facilement et rapidement l'impact des matériaux hygroscopiques (capacité tampon hydrique mesurée dans cette thèse) et d'autres paramètres (taux de ventilation, surface effective, temps d'exposition, volume, source de vapeur, Etc.) sur l'humidité relative intérieure d'un local en utilisant la valeur de la MBV expérimentale.

IV.2.1.3 Description du cas étudié

Pour mettre en évidence l'influence de la valeur de la capacité tampon hydrique (MBV) de l'enduit utilisé sur l'humidité relative intérieure, nous nous concentrerons sur la Chambre de la maison décrite dans la section précédente et dont le plan est présenté sur la [Figure IV-7]. Cette chambre a les caractéristiques suivantes : 11,13 m² de surface et 27,83 m³ de volume. On suppose qu'elle est occupée par 1 personne de 22 h à 9 h. Cette occupation correspond à une production de vapeur de 71 g/h. De plus, nous avons considéré un taux de renouvellement d'air

de 0,5 l/h, une température constante de 20 °C et une humidité relative extérieure 50% HR. Pour ne considérer que les échanges d'humidité par : les parois verticales, le plancher bas et le plafond ont été considérés imperméable à la vapeur d'eau. Le [Tableau IV-6] rappelle les propriétés hydriques (MBV) des matériaux utilisés pour la simulation de cette chambre.

	ρ_0 (kg/m ³)	MBV [g/(m ² .%HR)]
HLCcoat+0%MCP	929	1,46
HLCcoat+11%MCP	838	1,48
HLCcoat+23%MCP	732	1,53

Tableau IV-6 Valeurs des MBV des matériaux utilisés pour la simulation.

IV.2.2 Résultats

Après avoir renseigné les données d'entrée et choisi les sorties dans le programme de simulation exécutable du modèle de la capacité effective dans SPARK, nous présentons les résultats relatifs à l'influence de la MBV des HLCcoat+%MCP sur l'humidité relative intérieure du local.

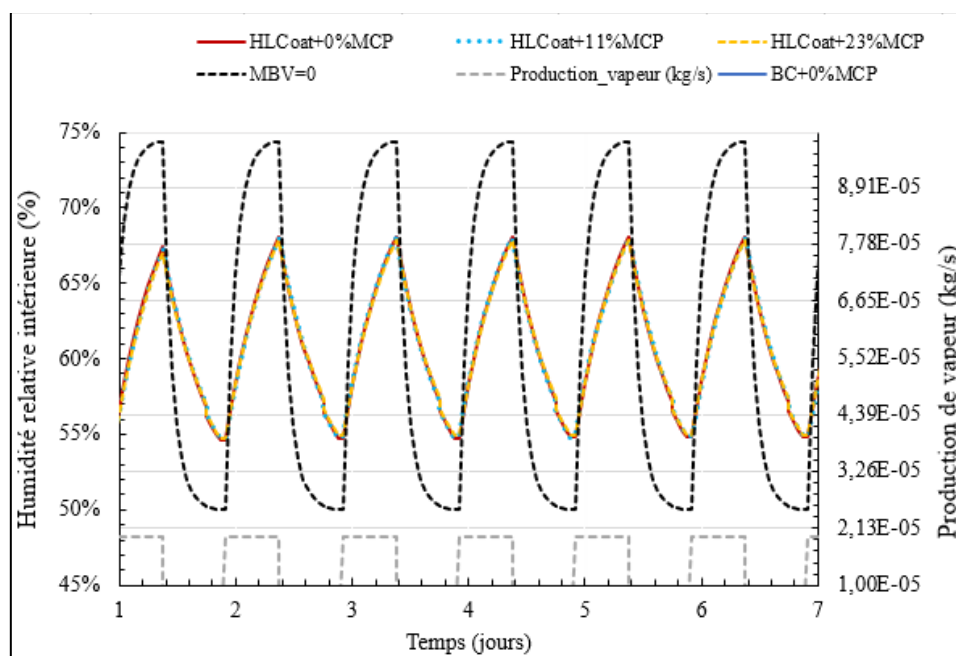


Figure IV-17 Evolution de l'humidité relative intérieure en fonction de la MBV des HLCcoat+%MCP.

La [Figure IV-17] présente l'évolution de l'humidité relative intérieure de la Chambre en fonction des enduits intérieurs (contenant : 0, 11 et 23% de MCP) comparativement à un cas fictif où la capacité tampon hygrique est insuffisante ($MBV=0$). D'une part, on remarque que l'évolution de l'humidité relative intérieure dépend du scénario d'occupation. D'autre part, on remarque que plus la valeur de la MBV est faible, plus l'amplitude de variation de l'humidité relative intérieure est grande. De plus, les variations d'humidité relative dans la chambre pour les enduits avec et sans MCP sont très proches, soit entre 68% et 54,3% pour une amplitude de 13,7% HR. En revanche, dans le cas où la $MBV=0$, l'humidité relative intérieure varie entre la valeur minimale de 50% et celle maximale de 74,4%, soit une amplitude de 24,4% HR.

L'amplitude de variation de l'humidité à l'intérieur de la pièce est donc quasiment réduite de moitié, grâce à l'enduit, par rapport au cas où la capacité tampon hydrique est nulle, mais sans vraiment de distinction entre les différents taux de MCP. On peut conclure que l'application d'un enduit de chanvre (sans ou avec MCP) permet d'atténuer les variations d'humidité intérieure du local ; et donc contribuer à l'amélioration du confort des occupants.

Conclusion

Dans ce chapitre, il était question d'étudier la performance hygrothermique des matériaux étudiés à l'échelle d'un logement et d'une chambre. Pour ce faire, nous avons commencé par l'étude de la performance thermique des enduits de chanvre avec et sans MCP à travers la simulation thermique dynamique d'une maison individuelle en utilisant le logiciel PLEIADES. Ensuite, une simulation de l'impact des enduits avec et sans MCP sur la performance hydrique à l'aide du logiciel SPARK a été réalisée à l'échelle d'une chambre.

La première étude portant sur l'évolution du confort thermique d'une enveloppe en béton de chanvre revêtue à l'intérieur d'enduits de chanvre avec et sans MCP a permis de démontrer que l'ajout du MCP (les cas HLCoat avec 11 et 23%MCP) diminue l'amplitude de variation des températures intérieures en période estivale et sans pour autant réduire les besoins de chauffage en période hivernale.

D'autre part, la deuxième étude portant sur l'évolution de l'humidité relative intérieure d'une chambre en fonction de la MBV a permis de montrer que la MBV des enduits avec et sans MCP

a un impact sur la régulation hydrique de l'ambiance intérieure. De plus, la présence du MCP n'a pas d'influence sur la capacité de régulation hygrique de l'enduit de chanvre.

Par conséquent, ces études préliminaires par l'approche numérique montrent que l'application des enduits de chanvre avec et sans MCP dans l'enveloppe contribue à l'amélioration du confort hygrothermique d'un bâtiment.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette thèse contribuent à l'optimisation des performances hygrothermiques des matériaux biosourcés pour mieux répondre aux exigences de la RE2020. Dans ce cadre, nous avons proposé d'approfondir les études sur un matériau biosourcé communément utilisé dans le bâtiment (le béton de chanvre) en y intégrant un matériau à changement de phase (MCP). Ces travaux visaient deux objectifs principaux : le premier était de caractériser les propriétés hygrothermiques du béton de chanvre contenant un MCP, et le deuxième d'évaluer l'impact du MCP incorporé sur le confort hygrothermique intérieur.

Une première partie faisant l'état de l'art des matériaux utilisés dans ce travail constitue le Chapitre I. De cet état de l'art, il ressort que durant ces dernières décennies, plusieurs études expérimentales et numériques ont été menées pour contribuer à une meilleure connaissance des propriétés du béton de chanvre et des matériaux à changement de phase. En ce qui concerne le béton de chanvre, l'analyse bibliographique montre dans un premier temps qu'il s'agit d'un matériau écologique, hétérogène et très poreux. D'un point de vue mécanique, il présente un comportement élastoplastique avec une rupture non fragile en compression et un comportement ductile en flexion. Ses performances hydriques mettent en lumière une excellente capacité de stockage et de régulation de l'humidité ambiante, en comparaison à d'autres matériaux de construction. Ses caractéristiques varient néanmoins en fonction des formulations et de son usage. D'autre part, une large série d'études sur les matériaux à changement de phases nous ont permis de mieux connaître leur composition et leur conditionnement ; ainsi que leur domaine d'application et leurs performances. Ces travaux mettent en avant la grande capacité de stockage de chaleur des MCP, grâce aux changements d'état du constituant. En outre, les études portant sur l'incorporation d'un MCP dans un matériau de construction montrent qu'il permet de renforcer l'inertie thermique du composite final qui contribue ainsi au maintien d'une ambiance thermique intérieure confortable et atténue les variations de température liées au chauffage ou au climat.

La deuxième partie de ce mémoire a été consacrée à la caractérisation des propriétés mécaniques et thermiques des bétons et enduits de chanvre avec et sans MCP. Dans un premier temps, la caractérisation mécanique réalisée à l'aide d'une presse électromécanique a permis de montrer que l'ajout du MCP n'a pas d'impact négatif sur le comportement mécanique du béton de chanvre. Une légère amélioration de la résistance mécanique est remarquée quelle que soit la direction de l'effort appliqué. Secundo, des études expérimentales et numériques ont

montré que l'ajout du MCP au béton de chanvre a un impact important sur les propriétés thermiques du composite. Il permet une augmentation de la capacité de stockage de chaleur sensible et ajoute sa capacité de stockage par chaleur latente. L'ajout du MCP à la composition d'un enduit ou d'un béton de chanvre permet de renforcer considérablement son inertie thermique.

Le Chapitre III présente les résultats d'une campagne de caractérisation expérimentale des propriétés hydriques des bétons et enduits de chanvre avec et sans MCP. Cette campagne a été réalisée à l'échelle du matériau et en utilisant les protocoles et normes existantes ou recommandations internationales. L'étude de sorption sur les bétons et enduits de chanvre avec et sans MCP a montré une légère réduction de la capacité de sorption pour toutes les formulations avec MCP, en raison notamment du colmatage partiel d'une partie des pores par les microbilles constituant le MCP. La perméabilité à la vapeur d'eau, quant à elle, diminue fortement (environ 50%) en présence de MCP pour le béton de chanvre, alors que celle de l'enduit de chanvre ne baisse que légèrement. De même, la diffusivité à la vapeur d'eau des matériaux avec MCP diminue particulièrement aux faibles taux d'humidité relative. On termine cette troisième partie avec l'étude de la capacité tampon hydrique des différents matériaux élaborés en fonction de différentes températures ambiantes. Cette étude expérimentale montre que la MBV du béton de chanvre diminue avec l'ajout du MCP, alors qu'elle augmente sensiblement pour un taux de MCP modéré (11 et 23%) dans l'enduit. De plus, on a constaté une augmentation non linéaire de la MBV du matériau avec la température ambiante et en fonction du taux de MCP incorporé dans tous les cas étudiés. Néanmoins, les études expérimentales confirment que le béton et l'enduit de chanvre demeurent de bons régulateurs d'humidité, y compris avec l'ajout de MCP.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude numérique de l'évolution du comportement hygrothermique des matériaux développés à l'échelle d'un local ou d'un logement. La première étude portant sur l'évolution du comportement thermique intérieur d'une enveloppe revêtue à l'intérieur d'enduits de chanvre avec et sans MCP montre que l'ajout du MCP (HLCoat avec 11 et 23%MCP) entraîne une diminution de la température opérative et des heures d'inconfort. D'autre part, la deuxième étude portant sur l'évolution du comportement hygrique d'une chambre en fonction de la MBV du matériau vient montrer que la MBV des enduits avec et sans MCP a un impact considérable sur la régulation hygrique de l'ambiance

intérieure. L'ajout du MCP dans l'enduit ne semble néanmoins pas avoir d'influence significative sur sa capacité de régulation hydrique. Par conséquent, l'application d'un enduit de type chanvre/chaux avec ou sans MCP permet d'améliorer considérablement le confort hygrothermique à l'intérieur du bâtiment.

Perspectives

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse pourront faire l'objet de plusieurs études complémentaires et ouvrent des pistes de réflexion sur l'usage des matériaux à changement de phase dans le bâtiment.

La caractérisation des propriétés mécaniques et hygrothermiques a besoin d'être complétée pour permettre de mieux cerner l'influence du MCP dans le béton et l'enduit de chanvre. Il serait donc intéressant de :

- ✓ Approfondir l'étude du comportement mécanique des composites avec MCP en flexion.
- ✓ Déterminer expérimentalement la courbe de désorption.
- ✓ Etudier expérimentalement le profil des températures et de l'humidité au sein d'une paroi en béton de chanvre avec MCP et dans une paroi enduite avec un enduit de chanvre avec MCP.
- ✓ Déterminer expérimentalement les propriétés acoustiques.

En ce qui concerne les études numériques, le chapitre IV de cette thèse est une étude préliminaire de l'impact de l'enduit avec MCP sur la performance hygrothermique de l'enveloppe d'un bâtiment. Il serait donc intéressant d'étudier cette performance sous différents climats et d'autres configurations des bâtiments.

Bibliographie

- « 8 chanvre_rapport_final_ACVd235d.pdf ». <https://www.ekopolis.fr/>
- « 702_FichePrismeATP4_Materiaux_Construction_Biosources-4.pdf ». <https://www.ifdd.francophonie.org/>
- « 150520_FDES_BetonChanvre_EN15804_vdef.pdf ». <http://www.base-inies.fr/>
- « 202004_Guide Matériaux biosourcés et commande publique_DGALN.pdf ». 2020 <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/>
- « 210518-performance-beton-de-chanvre.pdf ». <https://www.cerema.fr/>
- Abdellatef, Yaser, et Miroslava Kavcic. 2020. « Thermal, Microstructural and Numerical Analysis of Hempcrete-Microencapsulated Phase Change Material Composites ». *Applied Thermal Engineering* 178 (septembre): 115520. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115520>.
- Ahmad, Maha. 2004. « Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires ». Thèse de doctorat, Grenoble, France: Université Joseph Fourier.
- Aït Oumeziane, Yacine, Sophie Moissette, Marjorie Bart, et Christophe Lanos. 2016. « Influence of Temperature on Sorption Process in Hemp Concrete ». *Construction and Building Materials* 106 (mars): 600-607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.117>.
- Almitani, Khalid H., Mashhour A. Alazwari, Muhammad Basha, Ahmed Khoshaim, Nidal H. Abu-Hamdeh, et Arash Karimipour. 2022. « Examining the Effects of Interior Setpoint Temperature on Phase Change Materials Usefulness through a Performing Annual Analysis in the Air Handling Units: A Building Energy Management Study ». *Journal of Energy Storage* 48 (avril): 103991. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103991>.
- Anderson, Robert B. 1946. « Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation ¹ ». *Journal of the American Chemical Society* 68 (4): 686-91. <https://doi.org/10.1021/ja01208a049>.
- Arcy, R. L. d', et I. C. Watt. 1970. « Analysis of sorption isotherms of non-homogeneous sorbents ». *Transactions of the Faraday Society* 66: 1236-45.
- Asli, M., F. Brachelet, E. Sassine, et E. Antczak. 2021. « Thermal and Hygroscopic Study of Hemp Concrete in Real Ambient Conditions ». *Journal of Building Engineering* 44 (décembre): 102612. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102612>.
- Bahrar, Myriam. 2018. « Contribution au développement et à l'analyse d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle dans le cadre de l'optimisation du confort dans l'habitat ». Theses, Université de Lyon. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01891577>.

- Barquin, Fabrice de, et Gilles Flamant. 2010. « Des enduits pour une climatisation douce ? » Centre scientifique et technique de la construction. 2010. <https://www.cstc.be/publications/dossiers-du-cstc/2010-03.11/>.
- Bedecarrats, Jean-Pierre, Damien David, Didier Defer, Jean-Pierre Dumas, Erwin Franquet, Stéphane Gibout, Didier Haillot, et al. 2015. « Caractérisation des matériaux à changement de phase pour la simulation thermique des bâtiments », 9.
- Borderon, Julien. 2012. « Intégration des Matériaux à Changement de Phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique ». Theses, ENTPE. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01614879>.
- Bourdoukan, Paul. 2008. « Etude numérique et expérimentale destinée à l'exploitation des techniques de rafraîchissement par dessiccation avec régénération par énergie solaire ». These de doctorat, La Rochelle. <https://www.theses.fr/2008LAROS247>.
- « BrochureBetonsChanvreTradical2016.pdf ». s. d. Consulté le 24 février 2021. <https://www.bcb-tradical.com/ressources/document/BrochureBetonsChanvreTradical2016.pdf>.
- Bruijn, Paulien Brigitte de, Knut-Håkan Jeppsson, Kenneth Sandin, et Christer Nilsson. 2009. « Mechanical Properties of Lime–Hemp Concrete Containing Shives and Fibres ». *Biosystems Engineering* 103 (4): 474-79. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>.
- Brunauer, Stephen, P. H. Emmett, et Edward Teller. 1938. « Adsorption of Gases in Multimolecular Layers ». *Journal of the American Chemical Society* 60 (2): 309-19. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
- Castanet, Robert. 1991. « Enthalpie d'échauffement des solides », 10.
- Cerezo, Véronique. 2005. « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique ». Lyon: Institut Nationale des Sciences Appliquées De Lyons.
- Chamoin, Julien. 2010. « Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation », 206.
- « chanvre_rapport_final_d235d.pdf ». <https://www.construire-en-chanvre.fr/>
- Cheng, Rui, Michal Pomianowski, Xin Wang, Per Heiselberg, et Jinping Zhang. 2013. « A New Method to Determine Thermophysical Properties of PCM-Concrete Brick ». *Applied Energy* 112 (décembre): 988-98. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.046>.
- Cherif, Yassine, Annabelle Joulin, Laurent Zalewski, et Stéphane Lassue. 2009. « Superficial Heat Transfer by Forced Convection and Radiation in a Horizontal Channel ». *International Journal of Thermal Sciences* 48 (9): 1696-1706. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.01.017>.
- Colinart, T., et P. Glouannec. 2017. « Temperature Dependence of Sorption Isotherm of Hygroscopic Building Materials. Part 1: Experimental Evidence and Modeling ». *Energy and Buildings* 139 (mars): 360-70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.082>.

- Colinart, T, P. Glouannec, M. Bendouma, et P. Chauvelon. 2017. « Temperature Dependence of Sorption Isotherm of Hygroscopic Building Materials. Part 2: Influence on Hygrothermal Behavior of Hemp Concrete ». *Energy and Buildings*, 10.
- Collet, Florence. 2004. « Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faible impacts environnementaux ».
- Collet, Florence, Julien Chamoin, Sylvie Pretot, et Christophe Lanos. 2013. « Comparison of the Hygric Behaviour of Three Hemp Concretes ». *Energy and Buildings* 62 (juillet): 294-303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>.
- Collet, Florence, et Sylvie Pretot. 2012a. « Variation de la capacité hydrique tampon de bétons de chanvre en fonction de la formulation », mars.
- . 2012b. « Experimental Investigation of Moisture Buffering Capacity of Sprayed Hemp Concrete ». *Construction and Building Materials* 36 (novembre): 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139>.
- Collet, Florence, Sylvie Pretot, et Christophe Lanos. 2013. « Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques », 10.
- Cordeiro CavaIcanti, Fabiano. 2005. « Caractérisation thermique de produits de l'état liquide à l'état solide », 243.
- Crini, Grégorio, Eric Lichtfouse, Gilles Chanet, et Nadia Morin-Crini. 2020. « Applications of Hemp in Textiles, Paper Industry, Insulation and Building Materials, Horticulture, Animal Nutrition, Food and Beverages, Nutraceuticals, Cosmetics and Hygiene, Medicine, Agrochemistry, Energy Production and Environment: A Review ». *Environmental Chemistry Letters* 18 (5): 1451-76. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01029-2>.
- Cron, Florence, et Christian Inard. 2003. « ANALYSIS OF HYBRID VENTILATION PERFORMANCE IN FRANCE », 8.
- De Vries, Daniel A. 1987. « The Theory of Heat and Moisture Transfer in Porous Media Revisited ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 30 (7): 1343-50. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90166-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90166-9).
- « depliant-Betons-de-Chanvre-Tradical.pdf ». <https://www.weber-tradical.com/>
- Dubois, Samuel, Arnaud Evrard, et Frédéric Lebeau. 2012. « Hygrothermal Modelling of Lime-Hemp Concrete Used as Building Material and Indoor Climate Buffering Characterization ». <https://orbi.uliege.be/handle/2268/120753>.
- Dumas, Jean Pierre, Stéphane Gibout, Pierre Cézac, Erwin Franquet, et Didier Haillot. 2013. « Model for the DSC Thermograms of the Melting of Ideal Binary Solutions ». *Thermochimica Acta* 571 (novembre): 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.08.005>.
- Dumas, Jean-Pierre, Stéphane Gibout, Laurent Zalewski, Kévyn Johannes, Erwin Franquet, Stéphane Lassue, Jean-Pierre Bédécarrats, Pierre Tittlein, et Frédéric Kuznik. 2014. « Interpretation of Calorimetry Experiments to Characterise Phase Change Materials ». *International Journal of Thermal Sciences* 78 (avril): 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.014>.

- Evrard, Arnaud. 2008. « Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials ». Thèse, Louvain: Université Catholique de Louvain.
- « fiche-technique-Tradical-PF-70.pdf ». <https://www.weber-tradical.com/>
- Franquet, Erwin, Stéphane Gibout, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, et Jean-Pierre Dumas. 2014. « Experimental and Theoretical Analysis of a Cement Mortar Containing Microencapsulated PCM ». *Applied Thermal Engineering* 73 (1): 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.053>.
- Franquet, Erwin, Stéphane Gibout, Laurent Zalewski, Jean-Pierre Dumas, et Pierre Tittlein. 2014. « Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM ». *Applied Thermal Engineering* 73 (1): 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.053>.
- Furmaniak, Sylwester, Artur P. Terzyk, Piotr A. Gauden, et Gerhard Rychlicki. 2007. « Applicability of the Generalised D'Arcy and Watt Model to Description of Water Sorption on Pineapple and Other Foodstuffs ». *Journal of Food Engineering* 79 (2): 718-23. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.036>.
- « Global Status Report ». 2018, 82.
- Gres-Roque, Emmanuelle. 2016. « Chaux hydrauliques », 12.
- Guichard, Stéphane. 2013. « Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale ». Theses, Université de La Réunion. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01186458>.
- Haik, R., A. Peled, et I. A. Meir. 2020. « The Thermal Performance of Lime Hemp Concrete (LHC) with Alternative Binders ». *Energy and Buildings* 210 (mars): 109740. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109740>.
- Håkansson, Håkan. 1998. « Retarded sorption in wood: experimental study, analyses and modeling ». Thèse de doctorat (monographie), Département des sciences du bâtiment, Institut de technologie de Lund Urgences -.
- Herrier, Gontran, Didier Lesueur, et Daniel Puiatti. 2011. « Chaux aérienne - Applications en Génie Civil », 19.
- Herrier, Gontran, Marc Pelletier, et Daniel Puiatti. 2010. « Chaux aérienne - Contexte, fabrication, domaines applicatifs », 22.
- Igue, Fathia Dahir, Anh Dung Tran Le, Alexandra Bourdot, Geoffrey Promis, Sy Tuan Nguyen, Omar Douzane, Laurent Lahoche, et Thierry Langlet. 2021. « Impact of Temperature on the Moisture Buffering Performance of Palm and Sunflower Concretes ». *Applied Sciences* 11 (12): 5420. <https://doi.org/10.3390/app11125420>.
- Janssen, Hans, et Roels Staf. 2009. « Qualitative and Quantitative Assessment of Interior Moisture Buffering by Enclosures ». *Energy and Buildings* 41 (4): 382-94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.007>.
- Joulin, Annabelle, Zohir Younsi, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue, Daniel R. Rouse, et Jean-Paul Cavrot. 2011. « Experimental and Numerical Investigation of a Phase Change

- Material: Thermal-Energy Storage and Release ». *Applied Energy* 88 (7): 2454-62. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.036>.
- Joulin, Annabelle, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue, et Hassane Naji. 2014. « Experimental Investigation of Thermal Characteristics of a Mortar with or without a Micro-Encapsulated Phase Change Material ». *Applied Thermal Engineering* 66 (1-2): 171-80. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.027>.
- Kodjo, Jérôme. 2019. « Modélisation multi échelle du comportement thermomécanique des bétons incluant des matériaux à changement de phase micro encapsulés », 163.
- Kosiachevskiy, D., K. Abahri, A. Daubresse, E. Prat, et M. Chaouche. 2022. « Assessment of the Hygrothermal, Microstructural and Chemical Evolution of a Hemp-Based Cementitious Mortar under ETICS Total Weathering Aging Protocol ». *Construction and Building Materials* 314 (janvier): 125471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125471>.
- Kristombu Baduge, Shanaka, Priyan Mendis, Rackel San Nicolas, Kate Nguyen, et Ailar Hajimohammadi. 2019. « Performance of Lightweight Hemp Concrete with Alkali-Activated Cenosphere Binders Exposed to Elevated Temperature ». *Construction and Building Materials* 224 (novembre): 158-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.069>.
- Kuznik, Frédéric, Joseph Virgone, et Jean-Jacques Roux. 2008. « Energetic Efficiency of Room Wall Containing PCM Wallboard: A Full-Scale Experimental Investigation ». *Energy and Buildings* 40 (2): 148-56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.022>.
- Langmuir, Irving. 1918. « THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM. », 43.
- Latif, Eshrar, Mike Lawrence, Andy Shea, et Pete Walker. 2015. « Moisture Buffer Potential of Experimental Wall Assemblies Incorporating Formulated Hemp-Lime ». *Building and Environment* 93 (novembre): 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>.
- Laurence Le Stum. 2006. « Matériaux à Changement de Phase Phase Change Material (PCM) Micronal ». Présenté à BASF France The chemical Company, France.
- Le Dû, Mathieu. 2012. « Procédure de caractérisation thermophysique d'un matériau à changement de phase composite pour le stockage thermique ». Masters, École de technologie supérieure. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1061/>.
- Leang, Enghok. 2020. « Performance énergétique d'un mur solaire utilisant un stockage latent », 210.
- Lelièvre, Dylan. 2015. « Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés », 184.
- Li, Dehong, Biaorong Zhuang, Yuchen Chen, Bin Li, Véronique Landry, Alireza Kaboorani, Zhenzeng Wu, et Xiaodong Alice Wang. 2022. « Incorporation Technology of Bio-Based Phase Change Materials for Building Envelope: A Review ». *Energy and Buildings* 260 (avril): 111920. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111920>.

- Maalouf, C., A.D. Tran Le, S.B. Umurigirwa, M. Lachi, et O. Douzane. 2014. « Study of Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope under Summer Conditions in France ». *Energy and Buildings* 77 (juillet): 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>.
- Maalouf, Chadi. 2006. « Étude du potentiel de rafraîchissement d'un système évaporatif à désorption avec régénération solaire », 221.
- Maaroufi, Maroua. 2020. « Modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux de construction: incidence de l'hystérésis », 206.
- Madjoudj, N. 2016. « Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique », 16.
- Magniont, Camille. 2010. « Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources ». Université de Toulouse.
- Mathis, Damien. 2019. « Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois et matériaux à changement de phase biosourcés », 123.
- Mazhoud, Brahim, Florence Collet, Sylvie Pretot, et Julien Chamoin. 2016. « Hygric and Thermal Properties of Hemp-Lime Plasters ». *Building and Environment* 96 (février): 206-16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.013>.
- Mendonça, KC, C Inard, E Wurtz, FC Winkelmann, et F Allard. 2002. « A Zonal Model for Predicting Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Buildings ». *Indoor Air*, 6.
- Mora, Laurent. 2003. « Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet ». Phdthesis, Université de la Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00003984>.
- Nataf, Jean-Michel, et Frederick Winkelmann. 1994. « Symbolic Modeling in Building Energy Simulation ». *Energy and Buildings* 21 (2): 147-53. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)90007-8).
- Nguyen, Tai Thu. 2010. « Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre », 169.
- Oumeziane, Yacine Ait. 2013. « Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre », 354.
- Philip, J. R., et D. A. De Vries. 1957. « Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients ». *Transactions, American Geophysical Union* 38 (2): 222. <https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222>.
- Pomianowski, Michal, Per Heiselberg, Rasmus Lund Jensen, Rui Cheng, et Yinping Zhang. 2014. « A New Experimental Method to Determine Specific Heat Capacity of Inhomogeneous Concrete Material with Incorporated Microencapsulated-PCM ». *Cement and Concrete Research* 55 (janvier): 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.012>.
- Rahim, M., O. Douzane, A. D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, et T. Langlet. 2015. « Characterization of Flax Lime and Hemp Lime Concretes: Hygric

- Properties and Moisture Buffer Capacity ». *Energy and Buildings* 88 (février): 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043>.
- Rahim, M., O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, et T. Langlet. 2016. « Characterization and Comparison of Hygric Properties of Rape Straw Concrete and Hemp Concrete ». *Construction and Building Materials* 102 (janvier): 679-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>.
- Rahim, Mourad, D. Samri, O. Douzane, G. Promis, T. Langlet, et Anh Dung Tran Le. 2015. « Effect of Temperature-Dependent Sorption Characteristics on The Hygrothermal Behavior of Hemp Concrete ». *Energy Procedia* 78 (novembre): 1449-54. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.169>.
- Rawa, Muhyaddin J.H., Nidal H. Abu-Hamdeh, Arash Karimipour, Osama K. Nusier, Ferial Ghaemi, et Dumitru Baleanu. 2022. « Phase Change Material Dependency on Solar Power Plant Building through Examination of Energy-Saving ». *Journal of Energy Storage* 45 (janvier): 103718. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103718>.
- Raynal, Ludovic, et Sina Tebianian. 2020a. « Captage du CO₂ - Technologie pour la transition énergétique », 24.
- . 2020b. « Captage et stockage du CO₂ dans le contexte de la transition énergétique », 20.
- « reglementation-thermique.pdf ». <https://www.economie.gouv.fr/>
- Richter, Jan, et Kamil Staněk. 2016. « Measurements of Water Vapour Permeability – Tightness of Fibreglass Cups and Different Sealants and Comparison of μ -Value of Gypsum Plaster Boards ». *Procedia Engineering, Ecology and new building materials and products* 2016, 151 (janvier): 277-83. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.377>.
- Rima, Aya, Kamilia Abahri, Fares Bennai, Chady El Hachem, et Marc Bonnet. 2021. « Microscopic Estimation of Swelling and Shrinkage of Hemp Concrete in Response to Relative Humidity Variations ». *Journal of Building Engineering* 43 (novembre): 102929. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102929>.
- Rode, Carsten, Ruut Peuhkuri, Kaisa Svennberg, Tuomo Ojanen, Phalguni Mukhopadhyaya, M. Kumaran, et S. Dean. 2007. « Moisture Buffer Value of Building Materials ». *Journal of Astm International* 4 (janvier). <https://doi.org/10.1520/JAI100369>.
- Safari, Vahid, Hossein Abolghasemi, Leila Darvishvand, et Babak Kamkari. 2021. « Thermal Performance Investigation of Concentric and Eccentric Shell and Tube Heat Exchangers with Different Fin Configurations Containing Phase Change Material ». *Journal of Energy Storage* 37 (mai): 102458. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102458>.
- Salomon, Thierry, Renaud Mikolasek, et Bruno Peuportier. 2005. « Outil de simulation thermique du bâtiment, Comfie ». *Journée thématique SFT-IBPSA, La Rochelle*, mars.
- Samri, Driss. 2008. « Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique », 353.
- Sawadogo, Mohamed, Ferhat Benmahiddine, Ameer El Amine Hamami, Rafik Belarbi, Alexandre Godin, et Marie Duquesne. 2022. « Investigation of a Novel Bio-Based

- Phase Change Material Hemp Concrete for Passive Energy Storage in Buildings ». *Applied Thermal Engineering* 212 (juillet): 118620. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118620>.
- Sedan, David. 2007. « Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite. » Limoges: Université de Limoges.
- Seng, Billy, Camille Magniont, et Sylvie Lorente. 2019a. « Characterization of a Precast Hemp Concrete Block. Part II: Hygric Properties ». *Journal of Building Engineering* 24 (juillet): 100579. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.09.007>.
- . 2019b. « Characterization of a Precast Hemp Concrete. Part I: Physical and Thermal Properties ». *Journal of Building Engineering* 24 (juillet): 100540. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.07.016>.
- Sing, K. S. W. 1985. « Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) ». *Pure and Applied Chemistry* 57 (4): 603-19. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>.
- Soupart-Caron, Adèle. 2015. « Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase ». Grenoble Alpes: Université de Grenoble Alpes.
- Sowell, Edward F, et Philip Haves. 2001. « Efficient Solution Strategies for Building Energy System Simulation ». *Energy and Buildings*, Special Issue: BUILDING SIMULATION'99, 33 (4): 309-17. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00113-4).
- Sowell, Edward F, et Michael A Moshier. 2003. « Application of the SPARK Kernel », 8. « synthese-beton-chanvre-2008_1450942013.pdf ». <http://www.vegetal-e.com/>
- Tittlein, Pierre. 2008. « Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation ». Phdthesis, Université de Savoie. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00350664>.
- Tittlein, Pierre, Stéphane Gibout, Erwin Franquet, Kevyn Johannes, Laurent Zalewski, Frédéric Kuznik, Jean-Pierre Dumas, Stéphane Lassue, Jean-Pierre Bédécarrats, et Damien David. 2015. « Simulation of the Thermal and Energy Behaviour of a Composite Material Containing Encapsulated-PCM: Influence of the Thermodynamical Modelling ». *Applied Energy* 140 (février): 269-74. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.055>.
- Tittlein, Pierre, Stéphane Gibout, Erwin Franquet, Laurent Zalewski, et Didier Defer. 2015. « Identification of Thermal Properties and Thermodynamic Model for a Cement Mortar Containing PCM by Using Inverse Method ». *Energy Procedia* 78 (novembre): 1696-1701. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.265>.
- Toifane, Hachmi, Pierre Tittlein, Yassine Cherif, Laurent Zalewski, et Hervé Leuck. 2022. « Thermophysical Characterization of a Thermoregulating Interior Coating Containing a Bio-Sourced Phase Change Material ». *Applied Sciences* 12 (8): 3827. <https://doi.org/10.3390/app12083827>.
- Toifane, Hachmi, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, Emmanuel Antczak, Anh Dung Tran Le, Omar Douzane, et Thierry Langlet. 2019. « Caractérisation thermophysiques de béton

- de chanvre intégrant un matériau a changement de phase microencapsule ». In *XIVème Colloque International Franco-Québécois en énergie (CIFQ)*. Baie St-Paul, Canada. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03552977>.
- Tran Le, Anh D., Driss Samri, Omar Douzane, Geoffrey Promis, Anh T. Nguyen, et Thierry Langlet. 2020. « Effect of Temperature Dependence of Sorption on Hygrothermal Performance of a Hemp Concrete Building Envelope ». In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, édité par Saleem Hashmi et Imtiaz Ahmed Choudhury, 68-77. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10597-1>.
- Tran Le, Anh Dung. 2010. « Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous titre: simulation numérique et approche expérimentale) », 220.
- Tran Le, Anh Dung, Sy-Tuan Nguyen, et Thierry Langlet. 2019. « A Novel Anisotropic Analytical Model for Effective Thermal Conductivity Tensor of Dry Lime-Hemp Concrete with Preferred Spatial Distributions ». *Energy and Buildings* 182 (janvier): 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.043>.
- Tronet, Pierre, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte, et Christophe Baley. 2011. « Béton de chanvre: Effet du dosage en granulats sur les propriétés thermique et mécanique. », 12.
- Van Genuchten, Martinus. 1980. « A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1 ». *Soil Science Society of America Journal* 44 (septembre). <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- Wang, Lepeng, Hélène Lenormand, Hafida Zmamou, et Nathalie Leblanc. 2021. « Effect of Variability of Hemp Shiv on the Setting of Lime Hemp Concrete ». *Industrial Crops and Products* 171 (novembre): 113915. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113915>.
- Wang, Zhiyuan, Sixian Zhu, Xiangyu Zhao, Li Huang, et Deqiu Zou. 2022. « Preparation and Thermal Performance of a Novel Alloy Microencapsulated Phase Change Material (MEPCM)/Ceramic Composite ». *International Journal of Thermal Sciences* 176 (juin): 107478. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107478>.
- Wurtz, Etienne. 1995. « Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérodynamiques dans le bâtiment en environnement orienté objet », 221.
- Youssef, Alice. 2017. « Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre ». Phdthesis, Université de Bretagne Sud. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01535694>.
- Youssef, Alice, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte, et Noël Challengel. 2015. « Comportement du béton de chanvre en compression simple et cisaillement ». In *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Bayonne, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167596>.
- Zalewski, Laurent, Erwin Franquet, Stéphane Gibout, Pierre Tittlein, et Didier Defer. 2019. « Efficient Characterization of Macroscopic Composite Cement Mortars with Various Contents of Phase Change Material ». *Applied Sciences* 9 (6): 1104. <https://doi.org/10.3390/app9061104>.

- Zalewski, Laurent, Annabelle Joulin, Stéphane Lassue, et Thierry Chartier. 2014. « Caractérisation thermophysique du comportement de matériaux à changement de phase à échelle macro », 6.
- Zeraouli, Youssef, Ahmed Jamal Ehmimed, et Jean-Pierre Dumas. 2000. « Modèles de transferts thermiques lors de la fusion d'une solution binaire dispersée ». *International Journal of Thermal Sciences* 39 (8): 780-96. [https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(00\)00275-1](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)00275-1).
- Zerrouki, Redouane, Amar Benazzouk, Matthieu Courty, et Haikel Ben Hamed. 2022. « Potential Use of Matakaolin as a Partial Replacement of Preformulated Lime Binder to Improve Durability of Hemp Concrete under Cyclic Wetting/Drying Aging ». *Construction and Building Materials* 333 (mai): 127389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127389>.
- Zhang, Yinping, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, et Hongfa Di. 2007. « Application of Latent Heat Thermal Energy Storage in Buildings: State-of-the-Art and Outlook ». *Building and Environment* 42 (6): 2197-2209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.023>.

Optimisation des performances hygrothermiques des matériaux biosourcés pour application dans le bâtiment

Résumé

La préoccupation environnementale a donné naissance à diverses réflexions dans le but de répondre à deux exigences primordiales : diminuer la consommation d'énergie et les impacts sur l'environnement extérieur, et assurer la qualité et le confort des bâtiments. Il est évident que les solutions utilisées actuellement ne sont pas universelles et leur efficacité dépend de nombreux facteurs comme le climat environnant, le type d'utilisation, Etc. Le choix de matériaux utilisés et la compréhension des phénomènes physiques sont des facteurs essentiels à la réussite de la conception d'un bâtiment à hautes qualités environnementale et énergétique. Le recours à l'utilisation de matériaux biosourcés dans la construction (de type co-produits agricoles) est une démarche en plein développement dans le monde qui doit permettre de limiter l'utilisation des ressources fossiles et réduire la facture énergétique. Parmi les nouveaux matériaux, ceux développés à base d'agro-ressources ont fait l'objet depuis plusieurs années d'un regain d'intérêt et de reprise d'études, mettant en valeur leur capacité à réguler les variations hygrométriques ambiantes. Cependant, l'étude bibliographique montre que ces matériaux biosourcés possèdent une inertie thermique faible qui pourrait être améliorée en intégrant un matériau à changement de phase (MCP), capable d'échanger de façon réversible de l'énergie avec son environnement. L'objectif de la thèse est d'étudier les performances hygrothermiques de bétons et enduits de chanvre intégrant différents ratios d'un matériau à changement de phase pour application dans le bâtiment.

Mots clés : matériaux biosourcés, béton de chanvre, confort hygrothermique, matériau à changement de phase (MCP), inertie thermique.

Optimization of hygrothermal performances of biobased materials for building applications

Abstract

The environmental concern has given rise to various reflections in order to meet two essential requirements: reduce energy consumption and impact on the external environment and ensure the quality and comfort of buildings. It is obvious that the solutions used today are not universal and their effectiveness depends on many factors such as the surrounding climate, the type of use, Etc. The choice of materials used, and the understanding of the basic physical phenomena related to the climate are essential factors for the success of the design of a building with high environmental and energy qualities. The use of biobased materials in construction (agricultural co-products) is a rapidly developing approach worldwide that aims to limit the use of fossil fuels and reduce the energy bill. Among the new materials, those developed based on agro-resources have been the subject for several years of renewed interest and resumption of studies, highlighting their ability to regulate ambient hygric variations. However, the literature review shows that these materials have a low thermal inertia that could be improved by using phase change material (PCM) which can absorb and release heat energy when phase change occurs. The aim of the thesis is to study the hygrothermal performance of hemp concrete and hemp coating incorporating phase change material for application in building.

Keywords: Bio-sourced materials; Hemp concrete; hygrothermal comfort; Phase Change Material (PCM); Thermal inertia.