

Caractérisation et modélisation hygrothermique de la structure
de murs de bâtiment en bois/argile renforcée par des fibres
végétales

par

Aguérata KABORE

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTREAL, LE 5 DÉCEMBRE 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Aguérata Kaboré, 2024

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Claudiane M. Ouellet-Plamondon, directrice de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Éric Wagnac, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Abdelatif Merabtine, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Arnaud Perrot, examinateur externe
Département de génie de génie civil, à l'Université de Bretagne-Sud

M. Emmanuel Keita, examinateur externe
Laboratoire Navier, à l'Université Gustave Eiffel, École des Ponts, CNRS

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 13 NOVEMBRE 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Au cours des années passées en doctorat, j'ai vécu des périodes denses et enrichissantes, avec des échanges souvent très productifs et hautement valorisants. Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes ces personnes qui m'ont apporté leur soutien et leur aide tout au long de ce projet.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à ma directrice, la Professeure Claudiane M. Ouellet-Plamondon, pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur un projet qui me tient particulièrement à cœur, rassemblant des industries québécoises de la construction qui croient en la construction en terre et en bois. Je la remercie également de m'avoir soutenue financièrement tout au long de cette thèse de doctorat et de m'avoir permis de commencer ma thèse au début de pandémie, me témoignant ainsi une confiance sans faille qui m'a permis de m'épanouir tout au long de la durée du doctorat. Ses précieux conseils, son orientation avisée et sa supervision attentive tout au long de mon parcours doctoral ont contribué à mon développement scientifique et ont représenté une expérience extrêmement enrichissante.

Je remercie également les partenaires industriels et financiers, le Bureau de promotion des bois du Québec (QWEB), AmeriCan Structures, Technologies Boralife inc., ENERGIES 2050, le Pôle de Recherche et d'Innovation en Matériaux avancés du Québec (PRIMA Québec), le programme Alliance du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), et Mitacs Accélération, pour leur soutien à cette étude.

Mes remerciements s'adressent également :

Aux membres du jury pour leur présence, ainsi que pour l'attention méticuleuse qu'ils porteront à la lecture de ma thèse. Leur expertise et leurs remarques constructives lors de cette soutenance seront inestimables pour améliorer et affiner mon travail. Je suis particulièrement reconnaissant du temps et des efforts qu'ils investiront dans l'évaluation de ma recherche.

À toute l'équipe de techniciens et professionnels du département de génie de la construction de l'École de Technologie Supérieure et de SEREX. Merci à Alexis Vadeboncoeur et Juan

VI

Mauricio Rios pour leur aide précieuse dans la réalisation de mes expériences en laboratoire. À M. Pape et M. Aziz de SEREX pour leur disponibilité dans la réalisation des mesures des propriétés des échantillons d'essai. Je tiens à exprimer ma reconnaissance particulière à M. Aziz pour sa contribution à la révision de mon mémoire de doctorat.

J'aimerais également adresser mes remerciements à Mathieu Bendouma pour sa disponibilité et sa contribution précieuse à ce travail, à Victor Brial pour son soutien et ses encouragements, à Patrick Brisebois pour son aide dans la révision de mes articles, à Inoussa Legrene, Niakalé Camara et Manassée Foksou pour leur soutien motivant, ainsi qu'à mes colocataires, en particulier Sandrine, pour son attention particulière à mon égard, surtout dans les moments difficiles.

Je souhaite également remercier ma sœur et à sa famille, mes parents, mes frères et sœurs, ainsi que mes ami(e)s, pour leur soutien constant et leurs encouragements. Malgré la distance, les appels téléphoniques réguliers depuis Ottawa, du Burkina Faso et de la Côte d'Ivoire ont toujours été des sources de réconfort et de bonheur.

Mes remerciements vont à l'ensemble de mes collègues de travail ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet.

Enfin, un remerciement particulier à ma nièce Gadielle Sara, pour avoir quitté Ottawa pour venir me tenir compagnie pendant les moments mouvementés. Ses gestes ont été d'un immense réconfort et une source de motivation inconditionnelle, me redonnant l'énergie nécessaire pour poursuivre mes travaux de recherche.

Caractérisation et modélisation hygrothermique de la structure de murs de bâtiment en bois/argile renforcée par des fibres végétales

Aguérata KABORÉ

RÉSUMÉ

Face aux défis de la gestion de la consommation énergétique dans les bâtiments et aux enjeux environnementaux, la réintégration des matériaux géosourcés dans la construction se révèle être une piste prometteuse pour une construction durable et écologique. Le torchis, un matériau traditionnel composé de terre argileuse et de fibres végétales, se distingue par sa faible empreinte carbone et ses matières premières abondantes, bien que son utilisation soit limitée à cause du manque de références scientifiques. L'objectif de cette thèse est de réaliser une caractérisation globale de torchis formulé avec 3 % et 6 % de fibres de blé, et par la suite de réaliser une simulation numérique des systèmes de murs en torchis et sur des coupes transversales bois/torchis/bois.

Le projet de doctorat se divise en trois objectifs spécifiques. Le premier objectif spécifique s'intéresse à la caractérisation des argiles, des fibres de blé et à la formulation des échantillons en torchis en cherchant le rapport eau/argile et le rapport eau/fibre. Le second objectif spécifique vise à déterminer les propriétés hygrothermiques, mécaniques, la porosité et la microstructure des matériaux en torchis et en argile obtenus dans l'objectif spécifique 1. Quant au troisième objectif, il vise à évaluer le comportement hygrothermique de systèmes de murs en torchis et en bois/torchis (matériaux obtenus dans l'objectif 1) par des simulations numériques avec des données climatiques variables. Pour finir, une étude exploratoire a été réalisée sur la résistance au feu des échantillons en torchis ainsi que sur les propriétés thermiques des échantillons en torchis stabilisés avec 2 %, 4 % et 6 % de ciment.

Les études menées pour répondre aux différents objectifs spécifiques ont montré une amélioration significative des performances thermiques des échantillons en torchis fabriqués traditionnellement, avec une conductivité thermique réduite allant de 0,55 à 0,2 W/(m·K) et une capacité thermique spécifique variant de 830 J/(kg·K) à 1600 J/(kg·K). Ces résultats soulignent le potentiel du torchis comme matériau de remplissage dans les structures modernes à ossature de bois, offrant ainsi une double régulation thermique grâce à la combinaison du bois et de l'argile renforcée de fibres. La valeur tampon d'humidité (MBV) des échantillons d'argile, avec ou sans renforcement de fibres, est supérieure à 2 g/(m²·%RH), ce qui les place dans la classe d'excellence selon les exigences de NORDBTest. Les porosités ouvertes des échantillons variaient de 20 % à 45 %, avec des capacités spécifiques d'humidité allant de 0,014 kg/kg à 0,031 kg/kg. Les propriétés mécaniques du torchis évaluées ont montré une augmentation significative de la résistance à la compression des échantillons d'argile rouge, passant de 1,8 MPa à 4,57 MPa, et celle des échantillons d'argile beige, passant de 1,65 MPa à 4,61 MPa après 28 jours. La résistance à la flexion a également augmenté avec l'âge pour les échantillons renforcés de 3 % et 6 % de fibres, augmentant la ductilité des échantillons en torchis. Les essais préliminaires de la résistance au feu ont révélé que les échantillons de torchis

VIII

renforcés de fibres restent intacts lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées, bien que des fissures superficielles puissent apparaître, tandis que les échantillons sans fibres se brisent. La température du côté non exposé au feu reste inchangée, démontrant ainsi une bonne résistance thermique.

Ces résultats confirment ceux obtenus par la simulation hygrothermique des systèmes de murs en torchis avec des données climatiques variables. Les résultats de la simulation ont révélé une stabilité de la température intérieure des murs en torchis, renforçant l'idée que le torchis peut contribuer à une construction durable et résiliente. Afin de favoriser l'utilisation du torchis dans les zones climatiques froides et humides, l'utilisation de membranes pare-air/pare-vapeur 3M™ 3015 ou une membrane pare-pluie est nécessaire pour éviter le développement de risques de moisissure.

Les résultats de cette étude fournissent des bases de données solides pour des recherches futures visant à optimiser les formulations traditionnelles du torchis et à développer des solutions innovantes pour intégrer ces matériaux dans la construction moderne. Le développement de systèmes d'enveloppe de bâtiment avec des propriétés hygrothermiques améliorées se poursuit, et le torchis, avec ses avantages environnementaux et ses performances hygrothermiques, pourrait jouer un rôle clé dans la transition vers des pratiques de construction durables. Les résultats de la simulation hygrothermique indiquent que le torchis, en tant que matériau de remplissage de la structure du bâtiment à ossature de bois, est un excellent régulateur de la température et de l'humidité intérieure, rendant ce matériau adapté pour des applications spécifiques dans des environnements variés.

Mots-clés : Matériaux géosourcés, torchis, bois/argile, transfert de chaleur et de masse, simulation numérique, performance hygrothermique

Characterization and hygrothermal modelling of the building walls structure in wood/clay reinforced with plant fibres

Aguérata KABORÉ

ABSTRACT

Faced with the challenges of managing energy consumption in buildings and environmental issues, the reintegration of geosourced materials in construction proves to be a promising approach for sustainable and ecological construction. Cob, a traditional material composed of clay soil and plant fibres, stands out for its low carbon footprint and abundance of earthen materials, although its use is limited due to the lack of scientific references. The objective of this thesis is to provide a comprehensive characterization of cob formulated with 3% and 6% wheat fibres, followed by a numerical simulation of cob wall systems and cross-sectional wood/cob/wood cuts.

The doctoral project is divided into three specific objectives. The first specific objective focuses on the characterization of clays, wheat fibres, and the formulation of cob samples by examining the water/clay ratio and the water/fibre ratio. The second specific objective aims to determine the hygrothermal and mechanical properties, porosity, and microstructure of cob and clay materials obtained in specific objective 1. As for the third objective, it aims to evaluate the hygrothermal behaviour of cob and wood/cob wall systems (materials obtained in objective 1) through numerical simulations with varying climatic data. Finally, an exploratory study was conducted on the fire resistance of cob samples and the thermal properties of cob samples stabilized with 2%, 4%, and 6% cement.

The studies conducted to meet the various specific objectives have shown a significant improvement in the thermal performance of traditionally manufactured cob samples, with a reduced thermal conductivity ranging from 0.55 to 0.2 W/(m·K) and a specific thermal capacity ranging from 830 J/(kg·K) to 1600 J/(kg·K). These results highlight the potential of cob as a filling material in modern wood-frame structures, providing dual thermal regulation through the combination of wood and clay reinforced with fibres. The moisture buffer value (MBV) of clay samples, with or without fibre reinforcement, exceeds 2 g/(m²·%RH), placing them in the excellence class according to NORDTTest requirements. The open porosities of the samples ranged from 20% to 45%, with specific moisture capacities ranging from 0.014 kg/kg to 0.031 kg/kg. The mechanical properties of cob evaluated showed a significant increase in the compressive strength of red clay samples, from 1.8 MPa to 4.57 MPa, and that of beige clay samples, from 1.65 MPa to 4.61 MPa after 28 days. Flexural strength also increased with age for samples reinforced with 3% and 6% fibres, enhancing the ductility of cob samples. Preliminary fire resistance tests revealed that fibre-reinforced cob samples remain intact when exposed to high temperatures, although superficial cracks may appear, while fibreless samples break. The temperature on the unexposed side remains unchanged, demonstrating good thermal resistance.

These results confirm those obtained from the hygrothermal simulation of cob wall systems with varying climatic data. The simulation results revealed stable interior temperatures in cob walls, reinforcing the idea that cob can contribute to sustainable and resilient construction. To promote the use of cob in cold and humid climate zones, the use of 3M™ 3015 air/vapor barrier membranes or rain barrier membranes is necessary to prevent the development of mold risks. The results of this study provide a solid foundation for future research aiming to optimize traditional cob formulations and develop innovative solutions to integrate these materials into modern construction. The development of building envelope systems with improved hygrothermal properties continues, and cob, with its environmental benefits and hygrothermal performance, could play a key role in transitioning to sustainable construction practices. The hygrothermal simulation results indicate that cob, as a filling material in wood-frame building structures, is an excellent regulator of interior temperature and humidity, making it suitable for specific applications in diverse environments.

Keywords: Geosourced materials, cob, wood/clay, heat and mass transfer, numerical simulation, hygrothermal performance

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
0.1 Contextualisation du sujet de thèse.....	1
0.2 Objectif général du projet	4
0.3 Objectifs spécifiques.....	5
0.4 Problématique et originalité du projet.....	5
0.4.1 Problématique: Constuction en écomatériaux: bois/argile - bois/torchis ...	5
0.4.2 Contributions originales.....	6
0.4.3 Contributions partenariales	8
0.4.4 Limites	8
0.5 Organisation de la thèse de doctorat	9
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	13
1.1 Pourquoi construire en bois/argile ou en écomatériau.....	13
1.1.1 Enjeux climatiques, économiques, écologiques et de développement durable.....	14
1.1.2 Enjeux de température et d'humidité internes	15
1.1.3 Existence, durabilité et réglementations	18
1.1.4 Émission de GES et d'énergie grise.....	24
1.1.5 Energies intrinsèques des matériaux en terre.....	25
1.2 Formulation et avantage d'utilisation du torchis dans la construction	26
1.3 Propriétés thermiques et hydriques favorisant l'utilisation du bois /argile et en argile renforcée avec des fibres.....	30
1.3.1 Matériau à base d'argile et argile renforcée de fibres.....	30
1.3.2 Phénomène thermique.....	32
1.3.3 Phénomène hydrique.....	33
1.3.4 Phénomène thermique et hydrique du bois.....	34
1.4 Raison relative au déficit de logement.....	35
1.5 Résumé de la revue de la littérature	37
CHAPITRE 2 MATÉRIELS ET MÉTHODES	39
2.1 Matériels	40
2.1.1 Types d'argile et de ciment.....	40
2.2 Méthodes.....	41
2.2.1 Densité sèche et limite d'Atterberg.....	41
2.2.1.1 Densité sèche des argiles en poudre.....	41
2.2.1.2 Limite d'Atterberg	42
2.2.2 Compositions minéralogiques, chimiques et analyse thermogravimétrique.....	45
2.2.3 Fibres végétales.....	46
2.2.4 Formulation des échantillons	48
2.2.5 Détermination des propriétés hygrothermiques	50

2.2.5.1	Propriétés thermiques.....	53
2.2.5.2	Détermination de la porosité.....	56
2.2.5.3	Propriétés hydriques.....	57
2.2.6	Détermination du risque de moisissure : risque de dommage	58
2.2.7	Microstructure de surface	59
2.2.8	Détermination des propriétés mécaniques	59
2.2.8.1	Essai en compression.....	60
2.2.8.2	Essai en flexion.....	61
2.2.9	Mesure de l'évolution de la température dans un mini-mur.....	62
2.2.10	Simulation numérique.....	63
2.2.10.1	Bilan énergétique et massique	65
2.2.10.2	Modélisation des transferts de chaleur et d'humidité selon chaque logiciel	66
2.2.10.3	Conditions aux limites et données climatiques.....	68
2.2.11	Calcul de l'écart-type.....	71
2.3	Planification des tâches.....	71
CHAPITRE 3	IMPROVED INSULATION WITH FIBRES IN HEAVY COB FOR BUILDING WALLS	73
3.1	Avant-propos.....	73
3.2	Résumé.....	73
3.3	Abstract.....	74
3.4	Introduction.....	75
3.5	Materials and methods	79
3.5.1	Materials	79
3.5.2	Methods.....	80
3.5.2.1	Atterberg limits	80
3.5.2.2	Samples production: water-to-clay and water-to-fibre ratios	80
3.5.2.3	Thermal conductivity from steady thermal transmission.....	85
3.5.2.4	Thermal conductivity and effusivity from a modified transient plane source instrument.....	85
3.5.2.5	Statistical test	86
3.6	Results and discussion	86
3.6.1	Atterberg boundary: liquidity and plasticity limits of clay	86
3.6.2	Thermal properties of clay fibres and earthen samples	87
3.6.2.1	Thermal conductivity and specific heat	87
3.6.2.2	Thermal effusivity and diffusivity averages of clay fibres and earthen materials	91
3.7	Conclusion	95
3.8	Funding	96
3.9	Acknowledgments.....	96
CHAPITRE 4	NATURAL THERMAL AND HYGROTHERMAL REGULATION WITH HEAVY COB FOR LOW CARBON CONSTRUCTION	99
4.1	Avant-propos.....	99

4.2	Résumé.....	99
4.3	Abstract.....	100
4.4	Introduction.....	101
4.5	Materials and methods	105
4.5.1	Materials	105
4.5.2	Methods.....	107
4.5.2.1	Fibre and clay characterization	107
4.5.2.2	Density and open porosity measurements.....	108
4.5.2.3	Thermal properties	109
4.5.2.4	Water absorption test	110
4.5.2.5	Water vapor permeability and resistance factor.....	110
4.5.2.6	Moisture buffer value.....	112
4.5.2.7	Sorption, desorption isotherm curves and specific moisture capacity	112
4.5.2.8	Statistical test	114
4.5.2.9	Indoor temperature and humidity in cob on a wall element	114
4.6	Results and discussions.....	116
4.6.1	Water absorption and desorption of fibres.....	116
4.6.2	True density and open porosity measurements.....	117
4.6.3	Influence of relative humidity on thermal properties	119
4.6.4	Hydric properties of samples	124
4.6.4.1	Water absorption.....	124
4.6.4.2	Water vapor permeability and resistance factor.....	125
4.6.4.3	Moisture buffer value.....	127
4.6.4.4	Sorption/desorption isotherms	129
4.6.5	Cob and interactions with humidity	134
4.6.6	Outside and inside temperatures in cob wall: experimental result	135
4.7	Conclusion	137
4.8	Acknowledgments.....	139
CHAPITRE 5	THE IMPACT OF VEGETABLE FIBRES ON THE SHRINKAGE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COB MATERIALS	141
5.1	Avant-propos.....	141
5.2	Résumé.....	141
5.3	Abstract.....	142
5.4	Introduction.....	143
5.5	Materials and methods	148
5.5.1	Clay and fibres properties	148
5.5.2	Mineralogical composition	149
5.5.3	Thermogravimetric Analysis (TGA/DTG)	149
5.5.4	Production of Test Samples	149
5.5.5	Volume shrinkage measurements	151
5.5.6	Mechanical Measurements.....	151
5.6	Results.....	152
5.6.1	Physical, Mineralogical, and Chemical Characterization	152

5.6.2	Thermal Thermogravimetric (TGA) and Differential Thermogravimetric Analysis (DTG).....	154
5.6.3	Shrinkage Rates of Samples.....	157
5.6.4	Mechanical Properties.....	158
	5.6.4.1 Compressive Strength	158
	5.6.4.2 Flexural Strength.....	159
5.6.5	The Use of the Studied Cob in Construction	161
5.7	Conclusion	163
5.8	Funding	164
5.9	Acknowledgments.....	165
CHAPITRE 6	NUMERICAL ANALYSIS OF HEAVY COB WALLS' HYGROTHERMAL BEHAVIOR	167
6.1	Avant-propos.....	167
6.2	Résumé.....	167
6.3	Abstract.....	168
6.4	Introduction.....	169
6.5	Materials and methods	176
	6.5.1 Research methodology.....	176
	6.5.2 Wall systems for simulation.....	177
6.6	Mathematical models.....	180
	6.6.1 Energy and mass balance for WUFI Pro and COMSOL Multiphysics simulation.....	180
	6.6.2 Boundary conditions	184
	6.6.3 Simulation assumptions	185
	6.6.4 Climate data	187
6.7	Results.....	188
	6.7.1 Evaluation of temperature and humidity of the wall Type I to Type III	189
	6.7.2 Evaluation of humidity of the wall Type IV to Type IX	194
	6.7.3 Interior heat and humidity flow	195
6.8	Discussion.....	200
	6.8.1 Thermal performance of the walls	200
	6.8.2 Evaluation of mold growth in the walls	203
6.9	Conclusion	209
6.10	Acknowledgments.....	211
CHAPITRE 7	AUTRES RÉSULTATS SUR LA CARACTÉRISATION.....	213
7.1	Autres résultats sur la caractérisation sur le torchis non stabilisés	213
	7.1.1 Composition minéralogique et chimique	213
	7.1.2 Microstructure des échantillons	215
	7.1.3 Analyses thermiques	216
	7.1.4 Résistance mécanique: contraintes/deformations	218
	7.1.4.1 Résistance en compression	218
	7.1.4.2 Résistance en flexion	220

7.2	Risque de dommage à une exposition de 100 %HR.....	222
7.3	Résultats préliminaires sur la résistance feu	223
7.4	Caractérisation des échantillons en torchis stabilisés	225
7.4.1	Conductivité thermique et Capacité thermique spécifique des échantillons stabilisés.....	225
7.4.2	Effusivité et Diffusivité thermique des échantillons stabilisés	228
7.4.3	Propriétés mécaniques des échantillons stabilisés	231
7.4.4	Porosité ouverte des échantillons stabilisés	233
7.5	Conclusion partielle	235
CONCLUSION		237
RECOMMANDATIONS		243
ANNEXE I	AUTRES DONNÉES SUR LA CARACTÉRISATION DES ARGILES ET DES FIBRES.....	245
ANNEXE II	CHOIX DE RAPPORT EAU/ARGILE ET MÉTHODE DE SÉCHAGE	247
ANNEXE III	ÉCHÉANCIER DÉTAILLÉ.....	253
ANNEXE IV	ARTICLES ET AFFICHES RÉALISÉS DURANT LA THÈSE DE DOCTORAT.....	255
APPENDICE A	CHAPITRE 3 - ARTICLE 1 - TEST EQUIPMENT IMAGES AND STATISTICAL ANALYSIS RESULTS	259
APPENDICE B	CHAPITRE 4 - ARTICLE 2 - RESULTS OF THE STATISTICAL ANALYSIS RESULTS	263
APPENDICE C	CHAPITRE 5 - ARTICLE 3 - IMAGES BEFORE AND AFTER THE MECHANICAL RESISTANCE TESTS AND STATISTICAL ANALYSIS RESULTS	267
APPENDICE D	CHAPITRE 6 - ARTICLE 4 - EVALUATION OF THE CLIMATE DATA FROM THE STUDIED CITIES	271
APPENDICE E	CHAPITRE 7 - RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE	281
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		283

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Énergie grise de quelques matériaux de construction25
Tableau 1.2	Énergie intrinsèque de quelques matériaux de mur en maçonnerie.....26
Tableau 1.3	Quelques propriétés thermiques et hydriques des briques de terre et de terre renforcée avec des fibres végétales.....31
Tableau 1.4	Performances d’inertie thermique de différentes enveloppes de 20 cm d’épaisseur33
Tableau 1.5	Valeurs de résistance à la diffusion de vapeur d’eau des certains matériaux.....34
Tableau 2.1	Nombre d’échantillons non stabilisés pour chaque type d’essai50
Tableau 2.2	Paramètres climatiques utilisés pour les deux logiciels69
Tableau 2.3	Villes à l’étude70
Tableau 2.4	Activités de recherche.....72
Tableau 3.1	Summary of test results.....87
Tableau 3.2	Density, thermal conductivity, and average specific heat of the samples conditioned at 50%RH and 23 °C88
Tableau 3.3	Thermal effusivity and diffusivity averages of clay fibres and clay samples conditioned at 50%RH and 23 °C92
Tableau 4.1	Boundary conditions for experimental measurements on the wall element.....115
Tableau 4.2	Water content absorbed for a 48-hour exposure at 50%RH and 75%RH.....121
Tableau 4.3	Average value of water vapor permeability and water vapor resistance.....126
Tableau 4.4	Calculated hydric properties and experimental for MBV_{exp}131
Tableau 5.1	Mix proportions (grams).....150
Tableau 5.2	Sample production steps150

XVIII

Tableau 5.3	Mineralogical characteristics of red and beige clay: XRD analysis	153
Tableau 5.4	Chemical characteristics of the red and beige clays: XRF analysis.....	154
Tableau 6.1	Wall systems configuration, a) single-layer walls, b, c, d and e) multi-layer walls	178
Tableau 6.2	Wall systems configuration, a) single-layer walls, b, c, d and e) Multi-layer walls (suite).....	179
Tableau 6.3	Hygrothermal properties of wall materials	180
Tableau 6.4	Thermal resistance (R) and thermal transmittance (U) value for each wall	180
Tableau 6.5	Thermal resistance (R) and thermal transmittance (U) value for each wall with 3M™ 3015 air/vapor barrier.....	180
Tableau 6.6	GAB coefficients for the COMSOL 6.1 simulation	183
Tableau 6.7	Summary of the hourly meteorological data.....	189
Tableau 6.8	Summarizes the hygrothermal conditions for 3 years of all simulated walls with various climate data (++++Very high risk, +++ high risk, ++ low risk, + very low risk, ✓ no risk)	208
Tableau 6.9	Summarizes the hygrothermal conditions for 3 years for walls with air/vapour barriers simulated with severe climate data.....	209
Tableau 7.1	Compositions minéralogiques échantillons (% en poids).....	214
Tableau 7.2	Compositions chimiques des échantillons (% en poids).....	214
Tableau 7.3	Porosité des échantillons stabilisés et séchés à 28 jours	234
Tableau A II-1	Choix de technique de séchage des échantillons	249
Tableau A II-1	Choix de technique de séchage des échantillons (suite)	250
Tableau AA-1	Difference in thermal conductivity (λ) between the two methods: t-TEST- approved	259
Tableau AA-2	Improving thermal properties by adding fibres: ANOVA - approved.....	259
Tableau AA-3	Effect of fibres load (%) on thermal conductivity: ANOVA- approved.....	260

Tableau AA-4	Effect of fibres load (%) on thermal conductivity (λ) for red clay: t-TEST - approved	260
Tableau AA-5	Effect of fibres load (%) on thermal conductivity (λ) for beige clay: t-TEST - approved	260
Tableau AA-6	Effect of fibres load (%) on thermal diffusivity (D) and effusivity (E) ANOVA- approved.....	260
Tableau AA-7	Difference between the two clays for thermal inertia. t-TEST: (thermal effusivity (E)) - approved.....	261
Tableau AA-8	Difference between the two clays for thermal inertia. t-TEST: (thermal Diffusivity (D)) - approved	261
Tableau AA-9	Improving thermal inertia by adding fibres: ANOVA - approved	261
Tableau AB-1	Effect of relative humidity on thermal capacity (C_p) of red clay samples and no influence of beige clay sample: ANOVA - Non-significant difference observed.....	264
Tableau AB-2	Resistance factor (μ) depend on the nature of the clays: t-TEST– Significant difference observed	264
Tableau AB-3	Vapor permeability (δ) depend on the nature of the clays: t-TEST – Significant difference observed	265
Tableau AB-4	No influence of fibre addition on water vapour resistance factor (μ) ANOVA. - Non-significant difference observed	265
Tableau AB-5	Comparison of MBV_{exp} for MBV_{theor} : ANOVA Significant difference observed.....	265
Tableau AC-1	Influence fibres on compressive strength: ANOVA – Significant difference observed.....	269
Tableau AC-2	Effect of time on mechanical properties: t-TEST- Significant difference observed.....	269
Tableau AC-3	Influence fibres on flexural strength: ANOVA A- Significant difference observed.....	269
Tableau AC-4	Influence fibres on flexural strength: ANOVA B- Non-significant difference observed.....	269
Tableau AE-1	Comparaison des valeurs de la résistance en compression des échantillons avec 6 % de fibres stabilisés et non stabilisés Vs	

	échantillons sans fibres stabilisés et non stabilisés : ANOVA_test - Différence significative observée.	281
Tableau AE-2	Comparaison des valeurs de la résistance en compression des échantillons avec 6 % de fibres stabilisés Vs échantillons 6 % non stabilisés : ANOVA_test - Différence significative observée	281
Tableau AE-3	Comparaison entre les valeurs de la résistance en flexion des échantillons avec 0 % de fibres stabilisés : argile rouge : ANOVA_test - Différence significative non observée	282
Tableau AE-4	Comparaison entre les valeurs de la résistance en flexion des échantillons avec 0 % de fibres stabilisés : argile beige : ANOVA_test - Différence significative non observée	282

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Matériau, (a,b) en ciment, (c) barre d'armature en béton pour la construction6
Figure 1.1	Variation de la température intérieure et zone de confort de trois bâtiments en Afrique du Sud.....16
Figure 1.2	Étude comparative de la température : a) murs en argile avec fibres et en argile pure dans le sud du Maroc et b) murs en brique de terre crue et en terre cuite dans le sud-est du Maroc en fonction de la température extérieure17
Figure 1.3	Type de construction en bois/torchis : à Pullay au Chili dans un pays sismique (a), au Portugal (b)18
Figure 1.4	Habitats collectifs (a, b) et individuels (c), Mauricio Sanchez et Dario Angulo, Ricola Herb Center en Suisse (d), Salvatierra en Bretagne (e) et maison privée en Inde (f).19
Figure 1.5	Cathédrale de Koudougou, mur en terre et parement en pierre latéritique, au Burkina Faso (a), bâtiment en pisé à Winchester Hampshire Amesbury en 1919 et Berkshire en 2003 (b, c et d).20
Figure 1.6	Campus 2iE : logements des étudiants (a), bureau de professeurs, des ateliers et bâtiments en construction (b, c, d, e et f)21
Figure 1.7	Usine à Saint Siméon de Bressieux dans l'Îrèse23
Figure 1.8	Pertes de chaleur des murs conventionnels et en torchis (a) et Performance thermique des bâtiments isolés : différentes zones climatiques (b)27
Figure 1.9	Construction en torchis: Granja Aventura en Espagne (a), Safranbolu en Turquie (b), Diamantina en Brésil (c) et Strasbourg en France (d)29
Figure 1.10	METI School à Rudrapur construite en torchis : fixation de la structure (a), bâtiment en entier (b et c), étage aéré en bambou (d)29
Figure 1.11	Croissance de la population urbaine dans certaines régions de 1950-2020 et projection 2020-2050.....36

Figure 2.1	Diagramme de la méthodologie globale permettant à répondre aux objectifs de la thèse.....	39
Figure 2.2	Matières premières : (a) argile rouge, (b) argile beige et (c) ciment GU.....	41
Figure 2.3	Échantillons d'argile (a), Prototype de la méthode du pycnomètre (b), échantillons dans les tubes à essai (c) et l'élimination des bulles d'air (d).....	42
Figure 2.4	Préparation des échantillons pour l'essai des limites d'Atterberg, (a, d) pesé des argiles, (b, e) mélange d'argile-eau et (c, f) conditionnement du mélange	43
Figure 2.5	Coupelle de Casagrande (a), mise en place de l'échantillon dans la coupelle (b), traçage de la rainure (c) et fermeture de rainures (d).....	44
Figure 2.6	Étapes pour la détermination de la limite de liquidité, (a) rouleaux cylindriques, (b) échantillons pour limite de liquidité et plasticité, (c) pesée et (d) séchage.	44
Figure 2.7	Étapes de préparation des échantillons d'essai, (a) Broyeur Krups, (b) tamis de 300 µm et (c) échantillons d'essai	45
Figure 2.8	Étapes pour la détermination des éléments chimiques et la microstructure par le MEB, (a) couverture d'or sur les échantillons,.....	46
Figure 2.9	Étapes pour l'essai d'absorption d'eau à température de 23 °C, 40 °C et 50 °C	47
Figure 2.10	Quelques échantillons pour les essais, (a, b) essais propriétés hygrothermiques, (c, d) propriétés mécaniques et (e) résistance au feu	50
Figure 2.11	Propriétés thermiques à déterminer suivant les conditions du laboratoire au SEREX.....	51
Figure 2.12	Propriétés thermiques et porosité à déterminer suivant les conditions du laboratoire à l'Éts.....	52
Figure 2.13	Propriétés hydriques à déterminer au SEREX	53
Figure 2.14	Appareil TPS 3500 et échantillons d'essai au SEREX.....	54
Figure 2.15	Protocole de mise en œuvre pour la mesure des propriétés thermiques	55
Figure 2.16	Protocole pour la mesure de la porosité ouverte.....	57

Figure 2.17	Test de risque de moisissure	58
Figure 2.18	Analyse de la microstructure des échantillons, (a) microscope à balayage laser Olympus LEXT OLS4100-3D et (b) échantillons de test	59
Figure 2.19	Essai en compression, (a) échantillons avant la pose du soufre, (c) appareil pour la pose de soufre, (d) Procédure d'aplanissement des surfaces et (e) appareil d'essai en compression.....	61
Figure 2.20	Essai en flexion, (a) échantillons, (d) Procédure pour la pose des échantillons (e) appareil d'essai en flexion.....	62
Figure 2.21	Mesure de la température et de l'humidité d'un mur en torchis de 3 % de fibre	63
Figure 2.22	Phénomènes thermique et hydrique agissant sur une tranche infinitésimale d'une enveloppe	64
Figure 2.23	Représentation du couplage de transfert de chaleur et de masse.	65
Figure 2.24	Échange entre les surfaces extérieure et intérieure d'un mur	69
Figure 2.25	Présentation des villes étudiées sur la carte	70
Figure 2.26	Méthodologie pour la simulation numérique utilisant les données externes	71
Figure 3.1	Photographic images of a) the red clay, b) the beige clay, c) the dry fibres, and d) the wet fibres.....	80
Figure 3.2	Experiments to select the water/clay ratio	81
Figure 3.3	Step to select the fibres humidification mode with water/clay to 25%.....	83
Figure 3.4	Steps in the production of samples	84
Figure 3.5	Influence of fibre content on thermal conductivity: Modified transient planar source method	90
Figure 3.6	Influence of fibre content on the specific heat of samples: Modified transient planar source method	91
Figure 3.7	Influence of fibre content on thermal diffusivity of samples: Modified transient planar source method	93

Figure 3.8	Influence of fibre content on thermal effusivity of samples: Modified transient planar source method	93
Figure 4.1	Sample preparation protocol of earth and cob blocks developed	106
Figure 4.2	Open porosity measurement	109
Figure 4.3	Water vapor permeability measurement principle: a) dry cup and b) wet cup.....	111
Figure 4.4	Evolution of water absorption rate of wheat fibres as a function of immersion time and temperature	117
Figure 4.5	True and apparent density of the (a) red and (b) beige clay samples	118
Figure 4.6	Open porosity variation versus bulk density.....	119
Figure 4.7	Variation of thermal conductivity and specific heat with water content of (a, c) red clay samples and (b, d) beige clay samples	122
Figure 4.8	Variation of diffusivity and thermal effusivity with water content of (a, c) red clay samples and (b, d) beige clay samples (b, d).....	123
Figure 4.9	Water and moisture absorption at a temperature of 23 °C, (a) exposure to water for 24 hours and (b) exposure to 75% RH for 48 hours.....	125
Figure 4.10	Average values of water vapor permeability and water vapor resistance of (a and c) red and (b and d) beige clay samples.....	127
Figure 4.11	MBV moisture buffer value of cob and clay materials.....	128
Figure 4.12	Sorption/desorption curves for (a, c, and e) red and (b, d and f) beige clay samples	130
Figure 4.13	Evolution of hydric properties with an increase in relative humidity: a) specific moisture capacity, b) moisture buffer value, c) moisture diffusivity, and d) moisture effusivity	133
Figure 4.14	Variation of the water content at equilibrium with increasing or decreasing relative humidity	134
Figure 4.15	Evolution of cob wall temperatures: a) dry season and b) cool season for City of Djibouti and c) dry season and d) cool season for City of Johannesburg.....	137

Figure 5.1	Photographic images of (a) the compressive strength samples before surface smoothing, (b, c) the samples ready for testing, and (d) the flexural strength samples	151
Figure 5.2	X-ray spectra of the raw clays	153
Figure 5.3	TGA curves: (a) fibre sample alone and (b) red and beige clay samples without and with fibres	155
Figure 5.4	TGA/DTG curves: (a) red clay, (b) beige clay, and (c) wheat fibres	156
Figure 5.5	Shrinkage rates versus drying time	157
Figure 5.6	Compressive strengths as a function of drying days: (a) red clay samples and (b) beige clay samples	159
Figure 5.7	Flexural strengths as a function of the fibre content: (a) red clay samples and (b) beige clay samples	161
Figure 6.1	Interaction between the external and internal environment and a hygroscopic wall, a) heat and moisture storage in the wall, b) heat or moisture exchange between external and internal surfaces	181
Figure 6.2	Adsorption isotherms for clay and cob materials	184
Figure 6.3	Influence of driving rain on the daily interior surface temperature of uncoated clay and cob walls for the eight cities studied	191
Figure 6.4	Influence of driving rain on the humidity at 12.5 cm of uncoated clay and cob walls for the eight cities studied	193
Figure 6.5	Evolution of humidity through the walls: a to c) Montreal and d to f) Rennes cities	194
Figure 6.6	Average humidity over two months (February, March) through walls, for the eight cities studied	195
Figure 6.7	Heat flow profile of the interior wall surfaces for the eight cities studied	197
Figure 6.8	Seasonal average heat flow of the interior wall surfaces for the eight cities studied	197
Figure 6.9	Moisture flow profile of the interior wall surfaces for the eight cities studied	199

Figure 6.10	Seasonal average moisture flow of the interior wall surfaces for the eight cities studied.....	199
Figure 6.11	Daily interior wall surface temperature and cold period	202
Figure 6.12	Daily interior wall surface temperature and hot period	202
Figure 6.13	Walls isopleth, exterior, middle and interior sides of cob simulated with Montreal climate data	205
Figure 6.14	Walls isopleth, exterior, middle, and interior sides of cob simulated with Abidjan climate data	206
Figure 6.15	Isopleth for the Type X to XII walls with air/vapour barrier on the cob: a, b, c) Montreal and d, e, f) Abidjan	207
Figure 7.1	Microstructure de surfaces des échantillons d'argile rouge : (a) échantillon sans fibre, (b) échantillon avec 3 % de fibres, (c) et (d) échantillon avec 6 % de fibres	215
Figure 7.2	Microstructure de surfaces des échantillons d'argile beige : (a) échantillon sans fibre, (b) échantillon avec 3 % de fibres, (c) et (d) échantillon avec 6 % de fibres	216
Figure 7.3	Microstructure des sections transversales d'échantillons renforcés de fibres : a) échantillon d'argile rouge et b) échantillon d'argile beige	216
Figure 7.4	Courbes TGA-DTG de l'échantillon d'argile (a) et (b) avec 3 % de fibres, (c) et (d) avec 6 % de fibres	218
Figure 7.5	Échantillons d'argile rouge et beige sans fibre (a et d), avec 3 % (b et e) et 6 % (c et f) de fibres après les essais en compression	219
Figure 7.6	Évolution de la force de charge en fonction du temps des échantillons d'argile rouge (a) et beige (b)	219
Figure 7.7	Rupture brusque des échantillons d'argile rouge et beige sans fibre (a et d), déformation plastique pour ceux avec 3 % de fibre (b et e), et 6 % de fibre (c et f)	221
Figure 7.8	Courbes charge-déformation des échantillons d'argile rouge (a) et beige (b) : sans fibre (déformation fragile), avec 3 % et 6 % de fibres : comportement élastique (déformation fragile) dans la partie 1, comportement plastique dans la partie 2 (déformation semi-ductile).....	221
Figure 7.9	Échantillons avant et après exposition à 100 % HR	223

Figure 7.10	Surface extérieure et au cœur de l'échantillon après exposition de 2 mois 15 jours à 100 % HR	223
Figure 7.11	a) Appareil calorimètre à cône, images des échantillons après exposition à une température de 750 °C : b et e) sans fibres, c et f) côté exposé au feu, échantillons avec 6 % de fibres et d et h) côté non exposé au feu	224
Figure 7.12	Masse volumique en fonction de la teneur en ciment.....	225
Figure 7.13	Évolutions de la conductivité thermique en fonction de la teneur en ciment : (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres	227
Figure 7.14	Capacité thermique spécifique en fonction de la teneur en ciment: (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres	228
Figure 7.15	Effusivité thermique en fonction de la teneur en ciment : (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres.....	230
Figure 7.16	Diffusivité thermique en fonction de la teneur en ciment : (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres.....	231
Figure 7.17	Résistance en compression en fonction de la teneur en ciment	232
Figure 7.18	Résistances en flexion en fonction de la teneur en ciment	233
Figure A I-1	Image obtenue par microscope électronique à balayage (MEB), a) argile rouge, b) argile beige, and c) fibres	245
Figure A II-1	Quelques images des échantillons séchés à l'air libre dans le laboratoire	248
Figure A II-2	Évolution de la masse volumique de quelques échantillons en fonction du temps de séchage	251
Figure A III-1	Les étapes du programme de la thèse	253
Figure AA-1	Photographic image of a) TPS 3500 apparatus, b) the sample holder of the TPS 3500 apparatus, c) Trident apparatus and d) Trident sensor	259
Figure AB-1	Measurement of Sorption, desorption isotherm curves, and specific moisture capacity (ξ): Principle of the Dynamic Vapor System (DV2, SMS, UK)	263

Figure AB-2	Measurement of indoor temperature and humidity in cob on a wall element: Principle for the evaluation of the hygrothermal performance of cob wall	265
Figure AB-3	Drying kinetics of wheat fibres as a function of time (water desorption of samples)	265
Figure AC-1	Condition of the samples after and before compression testing	267
Figure AC-2	Condition of the samples after and before flexural testing	268
Figure AD -1	Djibouti climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure	271
Figure AD-2	Johannesburg climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure	272
Figure AD-3	Cairo climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure	273
Figure AD-4	Abidjan climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure	274
Figure AD-5	Montreal climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure	275
Figure AD-6	Paris climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure	276
Figure AD-7	Rennes climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure	277

Figure AD-8	Reno climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure278
Figure AD-9	Position des moniteurs à récupération de données et variation de l'humidité dans les murs pour chaque position (ville d'Abidjan).....279
Figure AD-10	Position des moniteurs à récupération de données et variation de l'humidité dans les murs pour chaque position (ville de Montréal)280

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Certaines notations ne figurent pas dans la liste ci-dessous du fait qu'elles sont définies directement dans le texte. Les abréviations, sigles et acronymes les plus utilisés sont définis.

AB	Argile Beige
ANOVA	Analysis of Variance
AR	Argile Rouge
ASHRAE	American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Material
BTC	Bloc de Terre Comprimée
CAD	Canadian Dollar
CAN/BNQ	Canadian Standards Association/Bureau de Normalisation du Québec
CO ₂	Gaz carbonique
DRX	Diffraction de rayon X
DTG	Analyse Thermogravimétrique différentielle
E/A	Rapport eau/argile
F/A	Rapport fibre/argile
GES	Émission des Gaz à Effet de Serre
IRDA	Institut de Recherche et de développement en Agroenvironnement
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
NF ISO	Norme Française élaborée par Organisation Internationale de Normalisation
SEREX	Service de Recherche et d'expertise en Transformation des produits forestiers
TGA	Thermogravimetric analysis (Analyses thermogravimétriques)
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture

XXXII

USD United States Dollar

W/F Rapport eau/fibre

WUFI Wärme Und Feuchte Instationär (Transitoires de Chaleur et d'Humidité)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A, S	Surface (m^2)
a_{mat}	Coefficients d'absorption d'eau du matériau (%)
b_m	Effusivité de l'humidité ($kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s^{1/2})$)
C_p	Capacité thermique spécifique ($J/(kg \cdot K)$)
C_{mat}	Capacité thermique du matériau ($J/(m^3 \cdot K)$)
C_{pl}	Chaleur spécifique de l'eau liquide ($J/(kg \cdot K)$)
$dp_{1\%}$	Profondeur d'infiltration équivalente de l'humidité (cm)
D	Diffusivité thermique (m^2/s)
D_φ	Coefficient de diffusion hydrique ($kg/(m^2 \cdot s)$)
D_v^{HR}	Coefficients de diffusion de la vapeur d'eau ($kg/(m^2 \cdot s)$)
D_l^{HR}	Coefficients de migration de l'eau liquide ($kg/(m^2 \cdot s)$)
D_v^T	Coefficients de thermo-diffusion de la vapeur ($kg/(m^2 \cdot s \cdot K)$)
D_W	Diffusivité de l'humidité (m^2/s)
F_{cm}	Résistance à la compression (MPa)
F_{cf}	Résistance à la flexion (MPa)
F_{max}	Charge maximale à la rupture (kN)
E	Effusivité thermique ($J/(m^2 \cdot K \cdot s^{1/2})$)
E_s	Éclairement solaire (W/m^2)
G	Transmission de la vapeur d'eau ($kg/(m^2 \cdot s)$)
m, M	Masse (kg)
$m_{réelle}$	Masse de la matière solide (kg)

XXXIV

m_{totale}	Masse de la matière solide + pores (kg)
MBV	Valeur tampon d'humidité ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$)
MBV_{exp}	Valeur tampon théorique expérimentale ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$)
MBV_{theo}	Valeur tampon théorique ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$)
V	Volume (m^3)
V_0	Volume à l'état humide (m^3)
V_f	Volume en fonction du temps de séchage (m^3)
$V_{\text{réel}}$	Volume de la matière solide (m^3)
V_{huile}	Volume de l'huile absorbée (m^3)
V_{pores}	Volume des pores (m^3)
$P_{\text{sat}}, P_{\text{vs}}$	Pression de vapeur saturante (Pa)
P_a	Pression atmosphérique (Pa)
IP	Indice de plasticité (%)
R_v	Retrait volumique (%)
H	Enthalpie Totale (J/m^3)
HR	Humidité Relative (%)
L_v	Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg)
T	Température ($^{\circ}\text{C}$ ou K)
t, t_p	Temps (s ou en h)
w	Teneur en eau (%)
w_m	Teneur en eau massique base sèche ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{mat},s}$)
W_L	Limite de liquidité (%)
W_p	Limite de plasticité (%)

∇T	gradient de la température (°C)
∇HR	gradient d'humidité (%)
Δt	Variation du temps (s)
Δm	Variation de la masse (kg)

Lettres grecques

λ	Conductivité thermique (W/(m .K))
φ_T	Densité surfacique de flux thermique (W/m ²)
σ	Constante de Stephan Boltzman (W/(m ² .K ⁴))
δ	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (kg/(s·m·Pa))
δ_a	Perméabilité à la vapeur d'eau (2.10 ⁻¹⁰ kg/(m ² .s .Pa))
φ_M	Densité surfacique de flux massique (kg/(m ² .s))
ρ	Masse volumique (kg/m ³)
ρ_s, ρ_o	Masse volumique du matériau solide (kg/m ³)
ρ_{sec}	Masse volumique du matériau à l'état sec (kg/m ³)
ξ	Capacité hydrique spécifique (kg/kg)
μ	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (-)
ε	Émissivité du matériau (-)
η	Porosité (%)

UNITÉS

Masse

%wt	Pourcentage massique
kgCO ₂	Kilogramme d'équivalent dioxyde de carbone

Énergie et puissance

MJ Mégajoule

kWh Kilowattheure

W Watt

Son

dB Décibel

INTRODUCTION

0.1 Contextualisation du sujet de thèse

Dans le cadre du développement durable, la réduction des impacts environnementaux est devenue une priorité pour de nombreux secteurs, notamment ceux des transports, de l'industrie et du bâtiment. Pour le secteur de la construction, la consommation énergétique mondiale est estimée à plus de 40 %, avec des émissions totales de CO₂ de 28 % (Atmaca & Atmaca, 2022; González-Torres, Pérez-Lombard, Coronel, Maestre, & Yan, 2022). En Amérique du Nord, le secteur du bâtiment contribue à plus de 31 % de la consommation énergétique, avec 35 % des émissions totales de CO₂ à l'échelle continentale (Commission de Coopération Environnementale, 2013). En Afrique, 80 % de la consommation d'énergie est attribuée au secteur des bâtiments, dont plus de 67 % sont attribués à l'alimentation électrique, et 13 % à la climatisation (François, Radanne, & Diaz, 2012; Santamouris, 2016), avec un déficit de logement d'environ 51 millions d'unités (E.-h. M. Bah, I. Faye, & Z. F. Geh, 2018b). De ce fait, le secteur du bâtiment se positionne parmi les secteurs les plus gourmands en termes de consommation énergétique. En effet, ce secteur présente de lourds impacts environnementaux dus à l'utilisation des matériaux tels que l'acier, le béton ou la combinaison des deux (béton armé), et produit environ 40 % des déchets (Environment and International Energy Agency, 2017). Ainsi, le béton est utilisé presque partout dans le monde, souvent au détriment de matériaux locaux tels que la terre comprimée, le torchis, le pisé, la bauge, le bois et la pierre. Les normes et prescriptions de la construction sont principalement basées sur les performances et les propriétés mécaniques du béton. Cependant, l'utilisation importante de ce matériau entraîne une forte demande en ciment, qui est le constituant essentiel du béton, dont la production est responsable de 5 à 10 % des émissions globales de CO₂, représentant 74 % à 81 % des émissions de CO₂ (Kouka Amed Jérémy Ouedraogo, 2019).

Du point de vue énergétique, la consommation globale d'un bâtiment doit être minimisée autant que possible, en utilisant des matériaux thermiquement efficaces pour sa conception (Labat, Magniont, Oudhof, & Aubert, 2016). Ainsi, une faible empreinte environnementale est très importante pour contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Hakkoum,

Kriker, & Mekhermeche, 2017; Labat et al., 2016). Les écomatériaux comme les briques de terre crue, la bauge, le pisé, le torchis, le bois, la terre et la pierre, déjà utilisés dans la construction, suscitent un regain d'intérêt pour des constructions respectueuses de l'environnement et surtout pour une construction bioclimatique, à faible empreinte carbone ou à carbone neutre. Les murs conçus avec ces matériaux respirent et répondent aux enjeux économiques et écologiques. Cependant, au fil des années, les écomatériaux à faible carbone et à carbone neutre utilisés dans la construction depuis des décennies sont remplacés par des blocs de ciment à haute conductivité thermique et à faible inertie thermique. Le ciment, les blocs de béton et les barres d'armature sont les principaux consommateurs d'énergie et émetteurs de CO₂ (Taffese & Abegaz, 2019). L'impact de ces matériaux sur le changement climatique est l'un des enjeux majeurs pour le secteur de la construction. Ils sont à l'origine de plus de 50 % des émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie d'un bâtiment (Taffese & Abegaz, 2019).

Avec la prise de conscience de l'épuisement des ressources énergétiques, des enjeux liés à l'environnement durable et du changement climatique, les techniques de construction de bâtiments en argile, en argile renforcée de fibres végétales, telles que les constructions en bois/torchis, font actuellement l'objet de réflexions pour une construction durable. De ce fait, orienter le secteur du bâtiment vers l'utilisation des matériaux composites en terre argileuse avec une structure en ossature de bois, constitue un enjeu majeur dans la perspective globale du développement durable (Umurigirwa, 2014). Ce type de construction augmente la durée de vie du bâtiment en offrant une bonne résilience sismique à sa structure (Tomovska & Radivojević, 2017). Toutefois, de nombreuses méthodes de construction avec des matériaux écologiques et durables se sont développées au cours des dernières années. Parmi ces méthodes, la construction en terre est devenue la plus abordée dans le cadre du développement durable. Ainsi, les études sur l'utilisation de ces matériaux composites sont devenues de plus en plus pertinentes, car ils sont fabriqués avec des matières premières renouvelables et presque neutres en carbone. Cependant, les phénomènes qui influencent le bon fonctionnement des murs conçus avec ces matériaux composites incluent le transfert de chaleur et d'humidité. Les propriétés hygrothermiques de ceux-ci ne sont pas connues avec précision (Toure et al., 2019),

il est donc difficile de prédire le comportement hygrothermique et la résistance au feu des bâtiments construits avec ces matériaux.

En plus de ce défi, la plupart des réglementations en matière de construction dans les pays moins développés socio-économiquement sont restrictives et ont tendance à entraver le développement des écomatériaux. Ces réglementations constituent donc des obstacles à l'amélioration des méthodes de construction et à l'innovation en matière d'écomatériaux de construction alternative à faible coût. Pour remédier à cette situation, il est nécessaire de mettre en place des instructions, des techniques ou des codes de construction basés sur les performances hygrothermiques, mécaniques et la résistance au feu, afin d'encourager les architectes et les parties prenantes à promouvoir l'utilisation de ces écomatériaux.

Dans ce projet, le type de construction ciblé est la construction en bois/torchis. Le torchis est un mélange d'argile, d'eau et de fibres végétales. Il est non porteur et sert de remplissage pour l'ossature de bois utilisée comme structure du bâtiment. Peu d'études existent sur le comportement hygrothermique du torchis, qui est directement lié aux besoins de chauffage et de climatisation. De même, il existe peu d'études sur son comportement mécanique, et encore moins sur sa résistance au feu. Par conséquent, l'étude du comportement hygrothermique et mécanique de l'enveloppe du bâtiment est une étape clé pour évaluer l'impact d'un matériau sur la consommation énergétique. De plus, connaître son comportement face au feu permet de prévenir les problèmes d'incendie.

Ce projet de thèse de doctorat se penche donc sur cette problématique afin de mieux comprendre les phénomènes associés aux transferts hygrothermiques à travers les murs en bois/torchis. Pour identifier les phénomènes hygrothermiques mis en jeu durant le cycle de vie d'un mur de bâtiment, il est nécessaire de disposer d'une base de données complète relative aux propriétés intrinsèques de ces matériaux. Cela permettra de comprendre comment les enveloppes réagissent aux variations de température et d'humidité relative. Ainsi, pour développer les enveloppes du bâtiment, il est également nécessaire de disposer d'un outil numérique pour prédire leur comportement hygrothermique. C'est dans cette optique que ce projet de thèse est mis en œuvre.

0.2 Objectif général du projet

L'objectif général du projet est d'étudier un concept de construction en ossature légère de bois, avec du torchis comme remplissage mural, destiné à la construction en Afrique. Cette thèse mesure les propriétés hygrothermiques en vue de faire la modélisation de l'enveloppe du bâtiment. Ce projet se structure en trois axes principaux.

- L'**axe 1** vise à étudier la capacité d'absorption du produit de traitement du bois, l'octaborate disodique tétrahydraté (ODT), par l'argile utilisée dans la construction en terre. L'étudiante de maîtrise, Meriem Aouiti, a travaillé sur l'axe 1 sous la direction de la Professeure Claudiane Ouellet-Plamondon (Aouinti, 2023).
- L'**axe 2** vise à formuler des échantillons en argile renforcée de fibres de blé, aussi appelés torchis, et à déterminer le rapport eau/argile donnant une consistance suffisante pour une utilisation sur les sites de construction. Ensuite, il s'agit de mesurer les propriétés hygrothermiques et mécaniques des échantillons formulés. Par la suite, des simulations numériques sur des enveloppes de différentes configurations ont été réalisées avec les données climatiques des villes de Djibouti, Johannesburg, Le Caire, Abidjan, Montréal, Paris, Rennes et Reno. Cette thèse se concentre sur l'axe 2.
- L'**axe 3** vise à caractériser le matériau en torchis pour déterminer sa capacité à résister au feu. Les échantillons en torchis caractérisés dans cet axe, sont formulés en utilisant la même technique que celle retenue dans l'axe 2. L'axe 3 est réalisé à l'Université York par une étudiante en maîtrise sous la direction du Professeur John Adam Gales. La fabrication des échantillons pour les essais de résistance au feu est réalisée à l'École de technologie supérieure et fait partie de l'axe 2, et des essais préliminaires ont eu lieu au SEREX.

La présente thèse s'inscrit dans la totalité de l'axe 2 du projet. Son **objectif principal** est de caractériser les matériaux en torchis formulés et d'évaluer la performance hygrothermique de différentes configurations de systèmes d'enveloppe par simulation numérique.

0.3 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont présentés de la façon suivante :

Objectif spécifique 1 : Formuler deux matériaux pour la technologie de construction en bois/argile renforcée de fibres végétales. Cet objectif spécifique se concentre sur la caractérisation des argiles, des fibres de blé et sur la formulation des échantillons en torchis en cherchant les rapports eau/argile et eau/fibre optimaux.

Objectif spécifique 2 : Caractériser les matériaux en torchis obtenus dans l'objectif 1. Il vise à déterminer les propriétés hygrothermiques, mécaniques, la porosité et la microstructure des matériaux en torchis et en argile obtenus dans l'objectif spécifique 1.

Objectif spécifique 3 : Étudier le comportement hygrothermique de systèmes de murs en torchis et en bois/torchis (matériaux obtenus dans l'objectif 1) par des simulations numériques face à différentes variations climatiques. Il vise à réaliser des simulations hygrothermiques des murs en torchis de 25 cm, dont 20 cm pour le matériau en torchis (mur multicouche) et 25 cm pour les murs monocouches, afin d'évaluer leur performance hygrothermique dans différentes zones climatiques.

0.4 Problématique, originalité et limites du projet

0.4.1 Problématique : Construction en écomatériaux : bois/argile - bois/torchis

Le manque de valeurs de référence précises des propriétés hygrothermiques et mécaniques de certains écomatériaux composites à faible empreinte carbone ou à carbone neutre empêche l'analyse globale des structures de bâtiment conçues avec ces derniers. En effet, ces matériaux ont un grand potentiel d'applications, notamment dans les régions où les besoins en logements sont alarmants, comme en Afrique rurale. De plus, la réduction des impacts environnementaux, devenue une priorité pour le secteur du bâtiment, fait que l'utilisation de ces matériaux fait partie de la solution pour contribuer à la lutte contre les enjeux environnementaux. La Figure 0.1 présente quelques matériaux dont la production et l'utilisation dans le secteur du bâtiment génèrent énormément d'émissions de gaz à effet de serre.

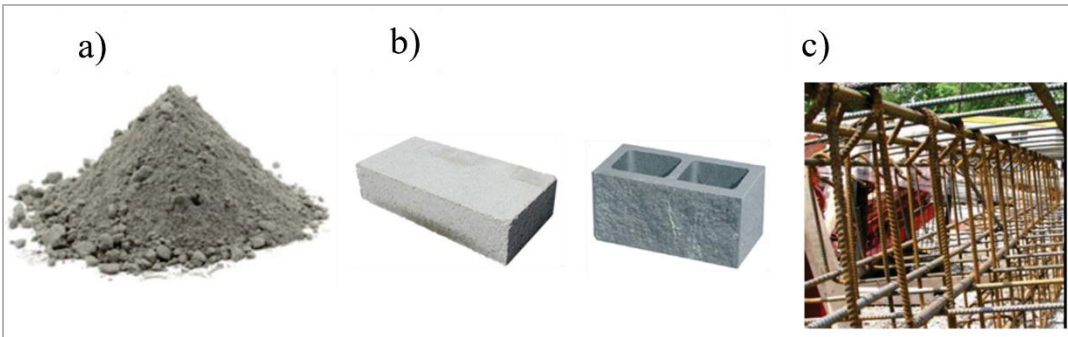


Figure 0.1 Matériau conventionnel (a, b) en ciment, (c) barre d'armature en béton pour la construction

Il convient de noter que les matériaux composites tels que la bauge, la terre-paille, le pisé, l'adobe, les briques de terre comprimée, le torchis et d'autres matériaux composites à faible empreinte carbone occupent une place importante dans le domaine de la construction. Cependant, il n'en demeure pas moins que leurs propriétés, encore peu connues, ne permettent pas de dimensionner à bon escient un habitat en termes de performance hygrothermique. En particulier pour le torchis, les études existantes se limitent à des bâtiments déjà construits. Par conséquent, l'utilisation de tels matériaux est freinée par le manque et la non-disponibilité de bases de données relatives à leurs propriétés intrinsèques et par la méconnaissance de leur comportement hygrothermique dans les revues scientifiques. En effet, la construction en bois/torchis a le potentiel de contribuer à la réduction des émissions de CO₂ et pourrait jouer un rôle capital dans la réduction de la pénurie de logements en Afrique tout en permettant de promouvoir la vente du bois québécois et canadien pour une construction de bâtiments écologiques et durables. Les bâtiments en bois/torchis sont durables et efficaces sur le plan énergétique, avec une faible empreinte carbone (Saba, Ahmad, Majid, & Yahaya, 2018). Étant un matériau composite poreux, il est important de chercher à comprendre son comportement hygrothermique pour la gestion de l'accumulation d'humidité et sa capacité à réguler la chaleur, afin d'optimiser son utilisation dans les structures à ossature de bois, que ce soit dans des pays chauds ou froids.

0.4.2 Contributions originales

La problématique centrale de cette thèse de doctorat réside dans l'absence de données concernant les matériaux en torchis pour leur application dans la construction moderne. Les

données disponibles proviennent des rapports techniques, des livres et des sites internet, sont principalement basées sur des études réalisées sur des bâtiments en torchis déjà construits, plutôt que sur de nouvelles constructions. De plus, la fabrication des échantillons d'essai pour les études sur le torchis est très différente de celle réalisée sur les sites de construction. Cette divergence entre les méthodes de fabrication du torchis et les données associées rend leur utilisation moins crédible pour une étude de performances hygrothermiques. De ce fait, il est important d'obtenir des données issues des échantillons fabriqués de manière traditionnelle, en tenant compte de la possibilité de reproduction sur les sites de construction, révisées par les pairs et publiées dans des revues scientifiques. Les données scientifiques obtenues par la méthode de fabrication traditionnelle du torchis, plus facile à utiliser sur les sites de construction, sont essentielles pour établir des dosages précis et fiables des fibres et de la terre argileuse. Utiliser des méthodes validées scientifiquement et publiées dans des revues scientifiques où la reproductibilité est une exigence fondamentale permet de reproduire les résultats de manière cohérente dans différents contextes et par les parties prenantes. De plus, les méthodes de dosage de la terre argileuse, des fibres et de l'eau en fonction de la quantité du mélange, basées sur des données scientifiques, sont nécessaires pour se conformer aux réglementations en vigueur dans le secteur de la construction, assurant ainsi que les matériaux utilisés sont sûrs et efficaces. En somme, les données scientifiques validées et publiées dans des revues scientifiques jouent un rôle crucial dans l'établissement de méthodes de dosage rigoureuses et fiables, essentielles pour la fabrication traditionnelle du torchis sur les sites de construction.

En tant que contribution, ce projet s'inscrit dans la dynamique du développement durable et comporte un double avantage. D'une part, il contribue à générer des données fiables pouvant aider à réduire la demande de logements en Afrique par la construction de logements écologiques, ce qui conduira à une meilleure acceptabilité des structures en bois/argile. D'autre part, la construction en terre renforcée de fibres végétales bon marché facilitera l'accès aux logements pour la population en permettant la réalisation de bâtiments spécifiques. La méthode de fabrication des échantillons d'essai, facile à réaliser sur les sites de construction et dans d'autres laboratoires, permettra aux données produites dans ce document de contribuer au

développement d'autres matériaux, en plus du torchis, avec des fibres végétales, par d'autres chercheurs.

Pour évaluer l'utilisation du matériau en torchis sur d'autres continents, des modélisations de murs ont également été réalisées avec des données climatiques de villes d'Amérique du Nord (Montréal et Reno) et d'Europe (Paris et Rennes). L'objectif est de vérifier si le torchis peut être un matériau de remplissage fiable pour les constructions résidentielles en ossature de bois dans ces régions.

0.4.3 Contributions partenariales

Le projet étant établi pour une réalisation en Afrique, la construction en bois/torchis permettra non seulement d'ouvrir une nouvelle avenue pour le marché du bois québécois et canadien vers l'Afrique, tout en créant des emplois locaux pour les parties prenantes. C'est une nouvelle ligne commerciale qui offre d'importantes opportunités et un grand potentiel pour le secteur de la construction en Afrique, en raison du manque significatif de logements. Le bois, la terre argileuse et les fibres végétales, étant des matériaux neutres en carbone et abondants, cette méthode de construction contribuerait aux efforts de réduction des gaz polluants liés à la construction, au chauffage et à la climatisation. L'étude initiera la mise en place de concepts de construction durable et écologique, ainsi que des méthodes de conception de l'enveloppe du bâtiment adaptées spécifiquement en Afrique, et/ou potentiellement au Québec et dans d'autres pays. De plus, le projet contribuera éventuellement à des applications sur le terrain, ainsi qu'à la conception architecturale et structurelle en tenant compte de l'environnement de chaque ville. À long terme, ce projet et d'autres projets liés auront des retombées environnementales, sociales et économiques en améliorant le bien-être et la qualité de vie de la population, tout en offrant de nombreuses opportunités d'emploi et de formation.

0.4.4 Limites

Cette thèse de doctorat se concentre sur la caractérisation complète de deux types de torchis, formulés avec un seul type de fibre (fibres de blé) et utilisant deux types d'argile : l'argile

rouge et l'argile beige. Elle inclut également des simulations numériques pour différentes configurations de systèmes de murs et une étude préliminaire de la résistance au feu de ces torchis.

En raison des contraintes imposées par la période de COVID-19, les deux types d'argile utilisée pour cette étude ont été obtenus auprès de la société SIAL à Laval, car il n'a pas été possible d'importer de la terre africaine à Montréal pour la fabrication des échantillons de torchis.

Concernant l'évaluation de la performance hygrothermique des murs en torchis, cette thèse se limite à des simulations hygrothermiques de différentes configurations de murs en argile et en torchis pour les villes de Djibouti, Johannesburg, Le Caire, Abidjan (Afrique), Montréal (Amérique du Nord), Paris et Rennes (France), ainsi que Reno (États-Unis). Une validation des résultats de la simulation WUFI Pro 6.7 et COMSOL 6.1, n'a pas été réalisée avec les données de mesures sur des murs en torchis. Des mesures de courte durée (7 jours) ont été effectuées sur un demi-mur en laboratoire au SEREX, uniquement pour les climats de Djibouti et Johannesburg. Ces données étaient insuffisantes pour la validation des résultats de la simulation. Toutefois, plusieurs auteurs utilisent le logiciel WUFI Pro 6.7 pour l'évaluation de la performance hygrothermique des matériaux de construction.

0.5 Organisation de la thèse de doctorat

La présente thèse se divise en 7 chapitres.

Le CHAPITRE 1 présente une revue de la littérature sur le matériau en argile et en torchis, la technique de fabrication, son utilisation avec l'ossature en bois, sa contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'une brève description des logements en Afrique.

Le CHAPITRE 2 présente les différentes méthodes de caractérisation expérimentale des matières premières et les formulations des échantillons pour les mesures des propriétés hygrothermiques et mécaniques. Ces investigations mettent en évidence les détails sur les méthodes de formulation des échantillons, le comportement des fibres utilisées dans les mélanges face à l'eau, leur capacité à la restituer et les différentes méthodes utilisées pour la

caractérisation des échantillons formulés. La caractérisation expérimentale se concentre sur les propriétés thermiques et hydriques des échantillons, ainsi que sur les propriétés mécaniques, notamment la résistance en compression et en flexion. Les résultats obtenus ont été utilisés pour alimenter le modèle numérique afin de prédire le comportement hygrothermique des enveloppes sous diverses sollicitations climatiques. Un modèle de simulation numérique basé sur les transferts de chaleur et de masse a été utilisé. La simulation a été réalisée sur des configurations de murs en argile et en torchis monocouche et multicouche avec les logiciels WUFI Pro 6.7 et COMSOL Multiphysics 6.1.

Le CHAPITRE 3 expose les résultats sur la technique de fabrication des échantillons en argile et en torchis avec 3 % et 6 % de fibres, ainsi que leurs propriétés thermiques. Ces propriétés thermiques ont été intégrées au modèle numérique et sont présentées sous forme d'article publié dans le journal *Industrial Crops & Products*.

Le CHAPITRE 4 porte sur les résultats des propriétés hydriques et l'influence de l'humidité sur les propriétés thermiques des échantillons en torchis et en argile. La porosité ouverte de ces échantillons et les performances thermiques d'un mur en torchis contenant 3 % de fibres ont été évaluées. Ces résultats sont également présentés sous forme d'article publié dans le journal *Construction and Building Materials*.

Le CHAPITRE 5 présente les résultats sur l'influence des fibres sur les propriétés mécaniques des matériaux en torchis. L'effet du temps sur les propriétés mécaniques a été évalué après 28 jours et 120 jours de séchage. Le retrait volumique a été mesuré pour une durée de 7 jours de séchage. Une analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) a également été réalisée pour évaluer leur stabilité thermique des échantillons et leur comportement sous l'effet de la chaleur. Ce chapitre est inclus dans la thèse sous forme d'article publié dans le journal *Materials*.

Le CHAPITRE 6 expose les résultats obtenus par simulation numérique des configurations de systèmes de murs en argile et en torchis soumis à différentes zones climatiques. Les résultats sont présentés sous forme d'article soumis après révision dans le journal *Energy and buildings*.

Le CHAPITRE 7 présente les résultats restants de la caractérisation des échantillons en torchis, en argile et en torchis stabilisés. Dans ce chapitre, les résultats des tests exploratoires sur la résistance au feu des échantillons en torchis non stabilisés sont présentés.

Enfin, une CONCLUSION dresse le bilan des résultats obtenus pour répondre à l'objectif principal et aux objectifs spécifiques, suivie des RECOMMANDATIONS et des ANNEXES où sont présentées les listes des articles de revues, de conférences et des affiches qui ont permis de vulgariser les travaux de recherche au cours des quatre années de la thèse de doctorat.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Pour une meilleure compréhension du sujet de recherche, le chapitre 1 présente une revue des travaux menés sur la construction en bois/argile, en argile et en bois/torchis, ainsi que quelques données sur les besoins en logement en Afrique. La construction en terre peut être une solution intéressante pour contribuer à relever les défis de l'économie circulaire, améliorer le confort thermique dans les climats chauds et froids, et à combler le déficit de logements. L'économie circulaire peut être définie comme un modèle économique qui encourage l'échange et la production pour maximiser l'utilisation des ressources et minimiser l'impact environnemental des produits (Gallaud & Laperche, 2016). Les matériaux en terre nécessitent peu d'énergie pour être transformés, et sont réutilisables en fin de vie, ce qui en fait des matériaux avantageux pour une construction durable et écologique.

1.1 Pourquoi construire en bois/argile ou en écomatériau

Dans la quête de la modernité, les bâtiments africains se sont malheureusement éloignés de leurs traditions bioclimatiques existantes, un ensemble de savoir-faire qui avait permis aux habitants d'avoir des habitations adaptées pour affronter les climats extrêmes. De nos jours, de nombreuses constructions sont inadaptées aux climats chauds, thermiquement inconfortables et énergivores. L'ampleur de la crise climatique et des besoins en logements nécessite des changements radicaux concernant la manière dont les bâtiments sont construits pour qu'ils soient écologiques, durables et accessibles à tous. Ainsi, les chercheurs, architectes, entrepreneurs, ingénieurs et divers organismes internationaux se consacrent passionnément à la construction bioclimatique, explorant l'utilisation de matériaux innovants à base de terre. Plusieurs études ont montré que les écomatériaux régulent la chaleur et l'humidité, tandis que les blocs de ciment et les tôles métalliques, largement utilisés pour la conception des murs et les toitures des constructions urbaines, favorisent le transfert de chaleur. Ces matériaux, en plus de favoriser le transfert de chaleur, ne sont pas favorables aux enjeux climatiques, écologiques et de développement durable. Les matériaux à base de terre argileuse, en plus

d'être régulateurs de chaleur et d'humidité, permettent de lutter contre les enjeux climatiques par la réduction des émissions de GES liées au secteur de la construction, ainsi que les enjeux écologiques et du développement durable. De plus, la construction en terre, renforcée par des fibres végétales, permet l'élimination efficace des déchets agricoles dans les champs et la réduction de l'exploitation des ressources fossiles non renouvelables. Les matériaux fabriqués avec des fibres végétales sont des matériaux composites à empreinte carbone neutre, biodégradables et capables de stocker le carbone. Leur utilisation dans la construction de bâtiments spécifiques favorise à la fois l'élimination efficace des fibres végétales et la réduction de l'utilisation des matériaux cimentaires.

1.1.1 Enjeux climatiques, économiques, écologiques et de développement durable

Le contexte relatif aux questions sur la construction en bois/argile et la conception de systèmes constructifs à faible consommation d'énergie impose la mise en œuvre des parois respirantes permettant de répondre aux enjeux climatiques, économiques et écologiques. La mise en œuvre de parois en bois/argile est conforme aux objectifs en matière de développement durable et est recyclable en fin de vie (Laou, 2017b). Le bois possède une capacité thermique moyenne de 2500 J/(kg.K), qui peut varier selon le type d'essence. Les briques en argile possèdent une capacité thermique comprise entre 817 et 1030 J/(kg.K), valeurs obtenues par calorimètre et DesProTherm (Aubert, 2013; Laou, 2017b; Medjelekh, 2015b). L'association de ces deux matériaux à forte capacité de stockage de chaleur pour la conception des enveloppes du bâtiment permettrait de réduire efficacement la variation de la température intérieure au sein des bâtiments. Le processus de construction en bois/argile ou en bois/torchis est simple et surtout écologique.

Les matériaux en terre ou en torchis sont formulés et utilisés directement sur le chantier sans traitement industriel. Les murs en bois/argile sont insonorisés, résistants aux termites, exempts de produits chimiques, et l'ossature en bois offre une bonne résilience sismique à la structure du bâtiment (Meyer, 2010a; Tomovska & Radivojević, 2017). Ils sont très étanches, avec une réduction du bruit d'environ 46-51 dB pour des densités comprises entre 700 kg/m³ et 2200 kg/m³ (Teslík, Zdražilová, & Vodičková, 2014). Leur valeur tampon varie entre

2,86 g/(m²%HR) et 4,30 g/(m²%HR) (Giada, Caponetto, & Nocera, 2019). Les propriétés thermiques de la terre utilisées dans la construction incluent l'inertie thermique et la capacité à favoriser l'autorégulation de l'humidité et de la température intérieure, ce qui permet de réduire l'utilisation des systèmes de climatisation et de chauffage (Meyer, 2010a). Le gouvernement français continue, à cet effet, de promouvoir la construction en terre par la création du laboratoire CRA Terre en 1979, qui est directement associé à l'École d'architecture de Grenoble (A. Gounni & H. Louahlia, 2020). Ces constructions sont réalisées en terre battue, en brique comprimée, en pisé, ou en bauge, etc., et suscitent un regain d'intérêt en raison de leur faible impact environnemental pendant le cycle de vie du bâtiment. Le torchis reste un matériau de construction à carbone neutre, facile à formuler et à mettre en œuvre. En revanche, sa technique de formulation spécifique ainsi que l'ensemble de ses propriétés hygrothermiques n'ont pas été suffisamment étudiées.

1.1.2 Enjeux de température et d'humidité internes

En raison de la nécessité croissante de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments, des alternatives naturelles ont été adoptées par les architectes, les chercheurs et les parties prenantes dans de nombreux pays, afin d'optimiser la réduction des coûts de chauffage et de refroidissement. En ce qui concerne le choix des matériaux, plusieurs produits locaux sont disponibles pour répondre aux exigences imposées par le secteur de la construction résidentielle. Les matériaux en argile en font partie et font l'objet de plusieurs études en vue de leur réintégration dans la construction moderne. Une étude réalisée sur trois bâtiments (bois/argile, pierre/argile et béton de ciment) en Afrique du Sud dans des conditions d'une journée typique a montré que les bâtiments en bois/torchis et en pierre/argile régulaient de manière similaire la température intérieure, contrairement à celui en béton de ciment. En effet, le bâtiment construit en bois/argile avec une toiture en herbe isolante présentait une température interne variant entre 17,3 °C et 22,9 °C, celui en pierre/argile avec une toiture en gazon entre 17,6 °C et 21,9 °C, et celui en béton de ciment avec une toiture en tôle entre 15,7 °C et 27,9 °C, pour une température extérieure variant entre 15 °C et 31,7 °C (Meyer, 2010a). En 2020 et 2022, des études de simulation numérique thermique dynamique ont été réalisées à l'aide du logiciel Design Builder par Ouakarrouch et al., 2020, au sud du Maroc

(Ouakarrouch, El Azhary, Mansour, Laaroussi, & Garoum, 2020) et sur TRNSYS 16, par Ali Lamrani Alaoui, 2022 dans le sud-est du Maroc (Lamrani Alaoui et al., 2022). Ces études ont révélé que la construction en terre crue permet de réduire significativement la variation de température intérieure. Plus précisément, la construction en terre crue a démontré une réduction de plus de 6 °C pour une température maximale de 42 °C et minimale de -0,5 °C. En comparaison, la construction en terre cuite ne réduisait que de 3 °C les variations dues à la température extérieure. Les figures 1.1 et 1.2 illustrent la variation des températures intérieures de chaque bâtiment en fonction de la température extérieure pour différents pays.

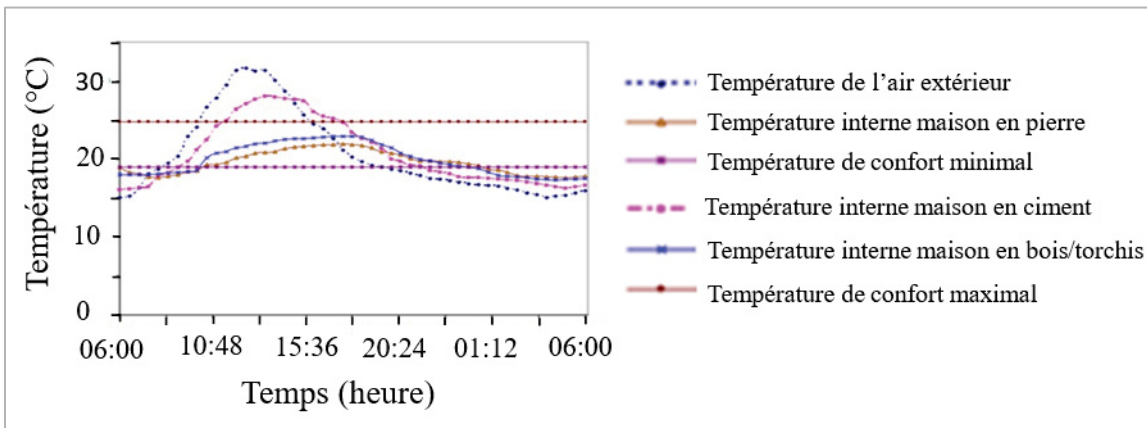


Figure 1.1 Variation de la température intérieure et zone de confort de trois bâtiments en Afrique du Sud
Tirée de Mayer (2010, p.09)

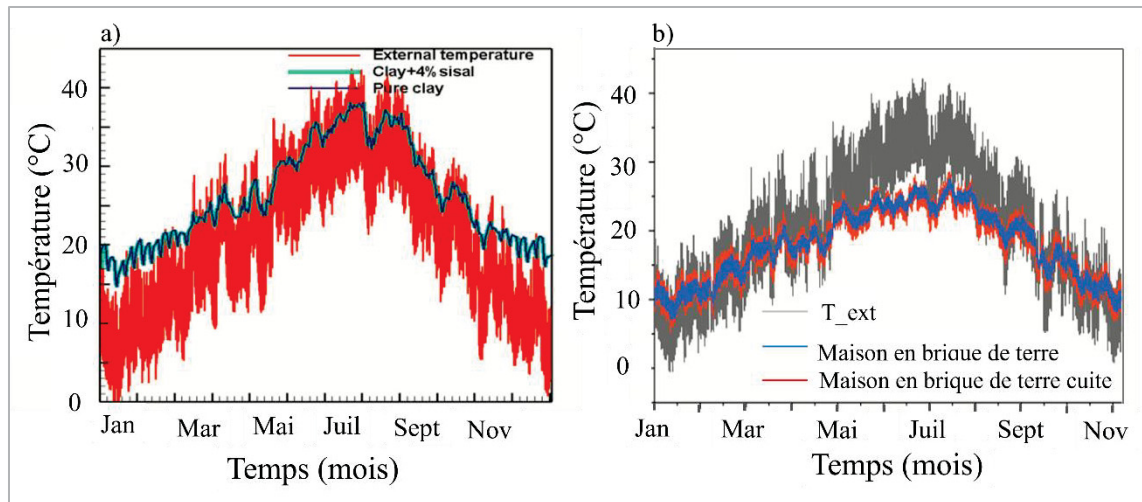


Figure 1.2 Étude comparative de la température : a) murs en argile avec fibres et en argile pure dans le sud du Maroc et b) murs en brique de terre crue et en terre cuite dans le sud-est du Maroc en fonction de la température extérieure
Tirées de Ouakarrouch et al., (2020, p. 07) et de Lamrani Alaoui et al., (2022 p.28)

En ce qui concerne les études sur la régulation thermique des murs en terre argileuse, Laou Lamyaa a présenté des résultats expérimentaux d'un mur en terre crue (Saffari et al.) et d'un mur en blocs de béton ayant la même structure, la même orientation et les mêmes conditions climatiques, mais avec des épaisseurs différentes (Laou, 2017b). Lorsque la température extérieure atteint 35 °C, la température intérieure était de 25 °C pour les murs en pisé et de 33 °C pour le mur en blocs de béton. La température du mur en blocs de béton était très proche de la température extérieure. Pour des températures extérieures de 9 °C, la température intérieure était de 19 °C pour le mur en pisé et de 17 °C pour le mur en blocs de béton, selon les données expérimentales. Par simulation numérique avec WUFI Pro 6.2 des murs de même épaisseur, Kaboré et al. (2020) ont obtenu une température interne maximale de 30 °C pour le mur en ciment, 27 °C pour le mur en terre comprimée, et de 24 °C pour le mur en béton de chanvre lorsque la température extérieure maximale était de 43 °C (A. Kabore, 2020; A. Kaboré, W. Maref, C. Ouellet-Plamondon, 2024; Kabore et al., 2021). Pour une température extérieure de 14 °C, la température intérieure pour le mur en brique de terre et en béton de chanvre était de 22 °C et de 21,25 °C pour les murs en blocs de ciment, pour une condition aux limites fixée à 24 °C pour l'environnement intérieur. En termes de résistance aux intempéries, la structure en bois des bâtiments en torchis inclut un système de diagonales,

horizontales et verticales dans les coins pour renforcer la résistance sismique (Wafer, 2010b), comme présentée sur la Figure 1.3, un projet de construction à Pullay au Chili. Ce système de diagonales permet de résister à la flexion et possède la résistance nécessaire pour supporter les forces du séisme après un tremblement de terre.

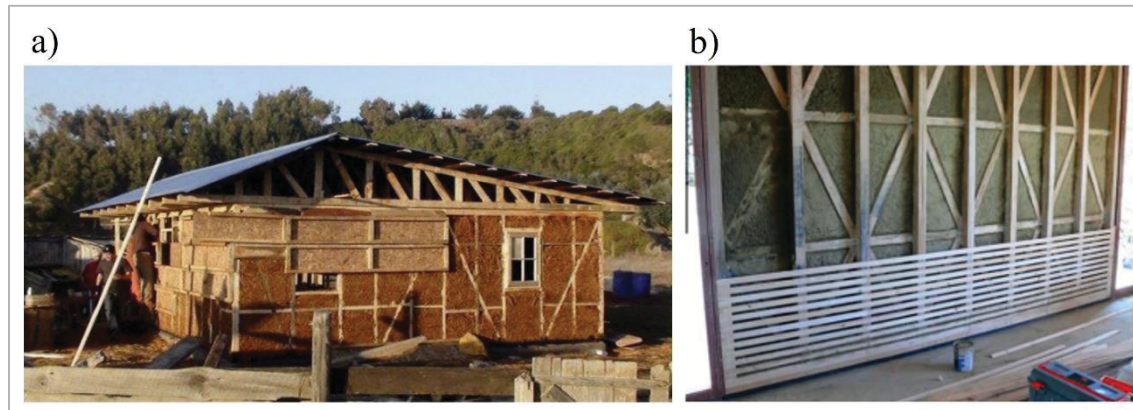


Figure 1.3 Type de construction en bois/torchis : à Pullay au Chili dans un pays sismique (a), au Portugal (b)

Tirées de Wafer (2010, p.27) et Pacheco-Torgal et al. (2012, p. 03)

Pour la gestion de l'humidité, les briques d'argile ou les briques de terre argileuse conservent leur stabilité lorsqu'elles sont placées dans une chambre humide à 95 % d'humidité relative pendant un certain temps (Wafer, 2010a). L'humidité d'équilibre des adobes se situait entre 5 % et 7 % de leur poids, avec une humidité intérieure variant entre 5 % et 10 %, quelle que soit la variation de l'humidité extérieure. Par ailleurs, une autre étude a montré qu'une maison en torchis isolée peut réduire les oscillations des températures annuelles et les charges de chauffage jusqu'à 35 % (A. Gounni & H. Louahlia, 2020).

1.1.3 Existence, durabilité et réglementations

Actuellement, près de 50 % de la population vit dans des habitats construits en terre (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). La majeure partie de ces constructions en terre se trouve dans les pays moins développés, dont l'Afrique fait partie. Cependant, plus de 500 000 logements en terre se trouvent en Allemagne, en France et au Royaume-Uni (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). Ce type de construction a considérablement augmenté aux États-Unis, au Brésil, en Australie et dans quelques pays d'Afrique, principalement en raison des programmes de construction

durable visant à réduire les émissions de GES liées aux bâtiments (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). La construction en terre joue un rôle clé dans la construction durable.

Dans l'Union européenne, le patrimoine en torchis représente au moins 200 000 bâtiments datant des 18e, 19e et 20e siècles (Hamard, Cazacliu, Razakamanantsoa, & Morel, 2016). Lorsqu'ils sont bien conçus et bien réalisés, ces bâtiments présentent un grand intérêt architectural et économique, en plus d'offrir du confort et de la durabilité (Paulus, 2015a; Wyss, 2005). Les Figures 1.4a à 1.4 b et 1.5 présentent un regroupement de quelques bâtiments construits en terre, habitats collectifs et individuels de luxe, réalisés en BTC par les architectes colombiens Mauricio Sanchez et Dario Angulo. Les Figures 1.4d à 1.4f présentent : d) le Ricola Herb Center à Laufon, Suisse, construit en 2014, avec une façade en pisé réalisée par Lehm Ton Erde GmbH, sous la direction des architectes Jacques Herzog et Pierre de Meuron ; e) Salvatierra, un bâtiment bioclimatique de 43 appartements à Beauregard, Bretagne, France, construit en 2007, avec une ossature en béton et une façade en blocs de terre comprimée par l'architecte Jean-Yves Barrier; et f) une maison privée à Bangalore, Inde, construite par l'architecte Chitra Vishwanath (Van Damme & Houben, 2018).

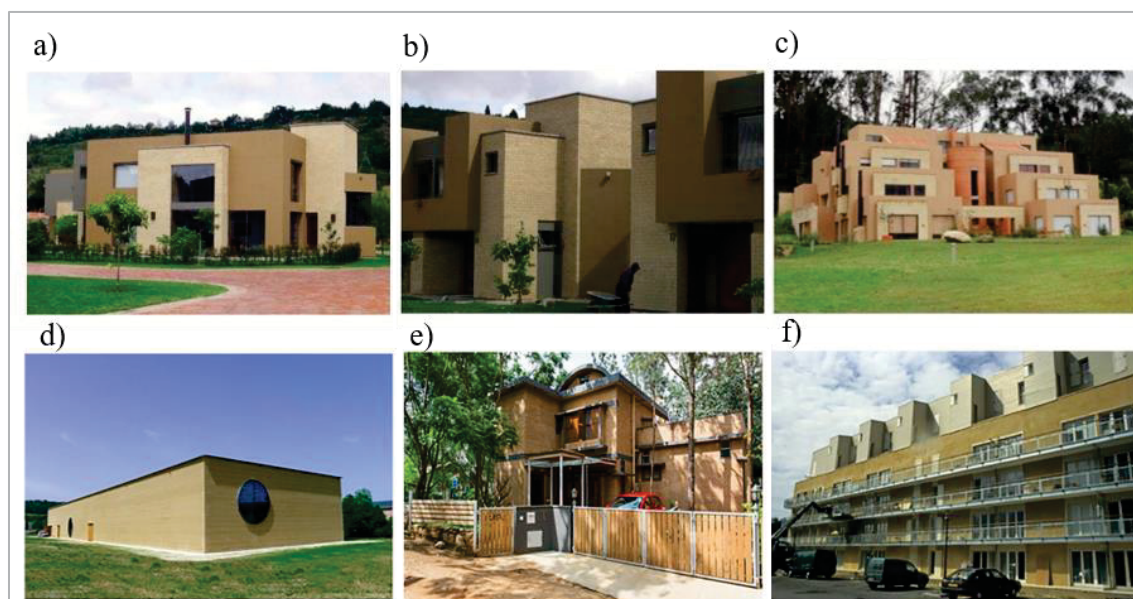


Figure 1.4 Habitats collectifs (a, b) et individuels (c), Mauricio Sanchez et Dario Angulo, Ricola Herb Center en Suisse (d), Salvatierra en Bretagne (e) et maison privée en Inde (f)

Tirées de Paulus (2015, p. 66) et de Van Damme & Houben (2018, p. 02)

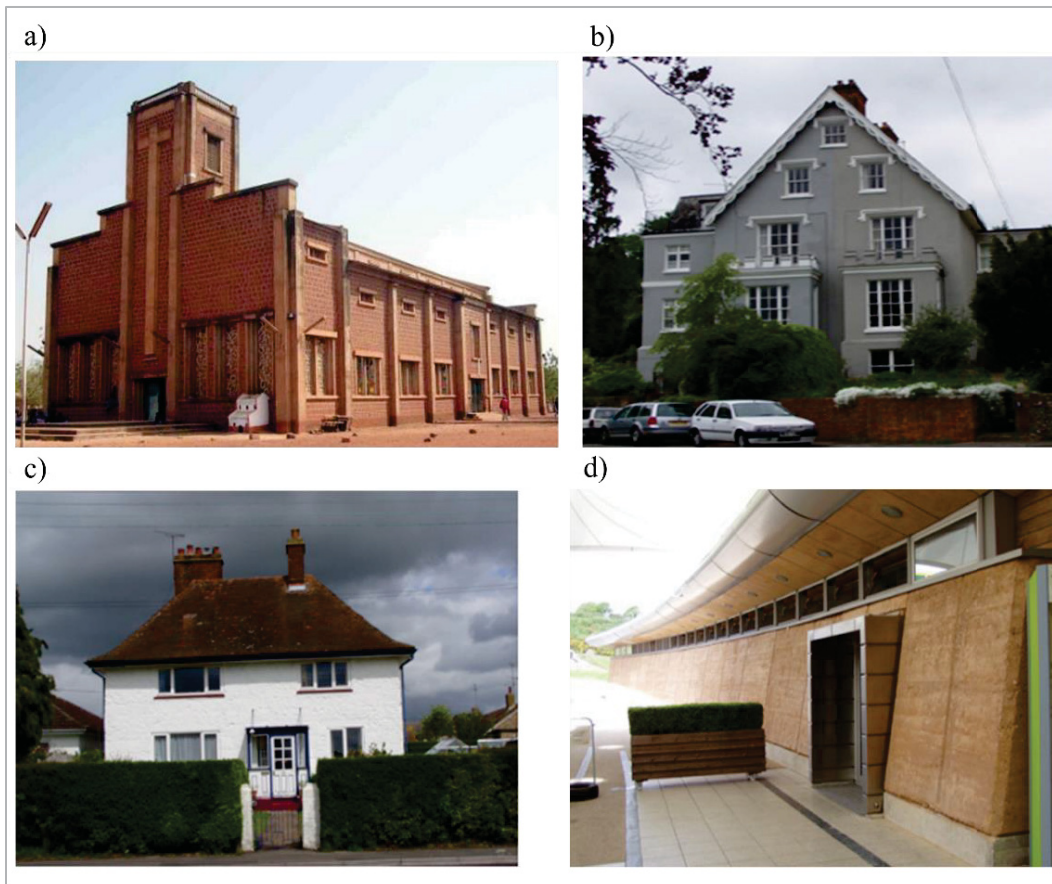


Figure 1.5 Cathédrale de Koudougou, mur en terre et parement en pierre latéritique, 1939 au Burkina Faso (a), bâtiment en pisé à Winchester Hampshire Amesbury en 1919 et Berkshire en 2003 (b, c et d)
Tirées de Wyss & coopération (2005, p.27) et Maniatidis & Walker (2003, p.74 et 77)

Le campus de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à Ouagadougou, au Burkina Faso, comporte deux nouveaux bâtiments en briques de terre comprimée (BTC) de deux niveaux (Figure 1.6). Ces bâtiments sont réalisés à l'aide de BTC à emboîtement dans le béton, et la toiture à débordement est en tôle (Paulus, 2015a). En raison de l'utilisation du béton comme structure et de la tôle comme toiture, les BTC ne peuvent pas jouer correctement leur rôle de régulateur de chaleur. En l'absence de climatisation, les logements présentent des variations de température intérieure trop élevées. Les BTC à emboîtement présentent une mauvaise isolation acoustique en raison de l'absence de joints entre les briques, et une mauvaise isolation thermique due à la présence du béton. Avec leur soubassement en béton ou en briques latéritiques taillées et leurs toitures débordantes en tôle

ondulée, les bâtiments sont encore en très bon état (Paulus, 2015a). Les logements en rez-de-chaussée sont construits selon le même concept que les autres : structure en béton, BTC emboîtées dans le béton et toiture en tôle légèrement débordante.

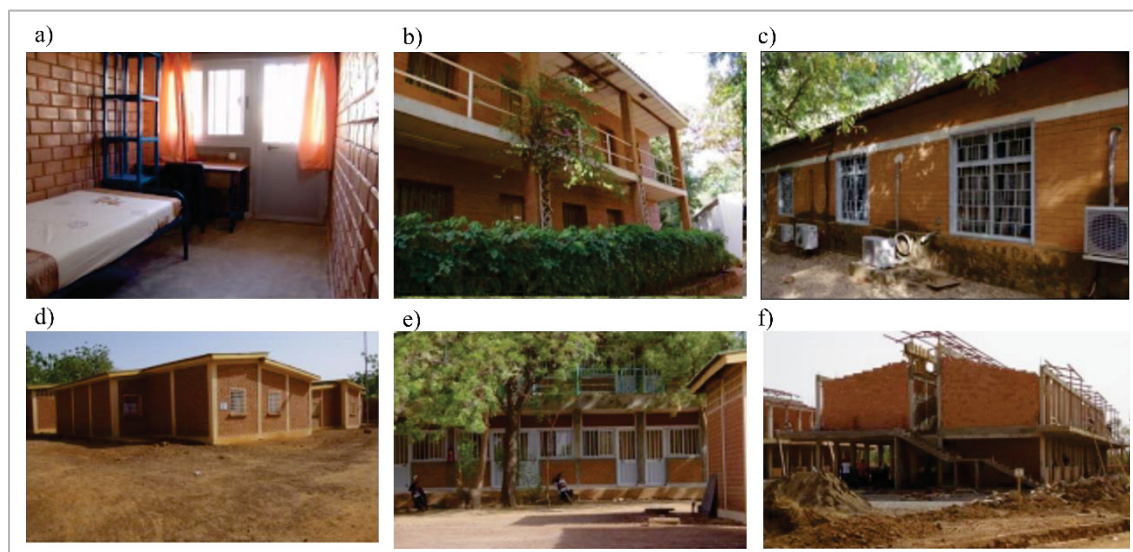


Figure 1.6 Campus 2iE : logements des étudiants (a), bureau de professeurs, des ateliers et bâtiments en construction (b, c, d, e et f)
Tirée de Paulus (2015, p.30)

À titre d'exemple de durabilité, le palais de l'émir à Katsina, situé au nord du Nigeria et construit en briques d'argile, a plus de 100 ans et est toujours doté d'une bonne isolation thermique (Muazu & Alibaba, 2017b). De plus, l'usine des Soieries Girodon dans l'Isère a été construite en pisé en 1870 (Figure 1.7) (Chabriac, 2014). En termes de réglementations, quelques pays tels que l'Allemagne, l'Australie, le Nouveau-Mexique, la Nouvelle-Zélande et le Zimbabwe sont déjà dotés de normes relatives à la construction en terre, que l'on peut citer comme suit (Maniatidis & Walker, 2003; Pacheco-Torgal & Jalali, 2012; Schroeder, 2018) :

- En 1951, le premier code de la construction en terre, suivant une réglementation allemande écrite depuis 1944, a été mis en pratique avec DIN 18951, suivi de la divulgation de plusieurs recommandations techniques connues sous le nom de "Lehmbau Regeln" pour la construction en pisé ;
- Le Nouveau-Mexique possède une réglementation d'État pour les constructions en pisé (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012) ;

- La Nouvelle-Zélande possède les réglementations juridiques les plus avancées pour la construction en terre, réparties en trois catégories :
 - NZS 4297 : conception technique et bâtiments en terre, publiée en 1998. Elle établit les critères de performance pour la résistance mécanique, le retrait, la durabilité, l'isolation thermique et la résistance au feu des murs en terre et s'applique aux constructions de bâtiments dont la hauteur est comprise entre 3,3 et 6,5 m ;
 - NZS 4298 : matériaux et fabrication pour les bâtiments en terre, publiée en 1998. Elle définit les exigences relatives aux matériaux et à la fabrication et s'applique à la construction des bâtiments ayant des hauteurs inférieures à 3,3 m ;
 - NZS 4299 : bâtiments en terre ne nécessitant pas de conception spécifique, publiée en 1998. Elle s'applique aux bâtiments de 600 m² ou 300 m² par étage.
- Un code pratique pour les structures en pisé a été adopté par le Zimbabwe. Ce code regroupe les techniques de construction concernant les matériaux, le coffrage, les fondations, et la conception de mur selon la résistance à la compression, l'absorption d'eau et les finitions (Maniatidis & Walker, 2003).

Les réglementations mentionnées ci-dessus se réfèrent principalement à la construction en pisé et en terre compressée, mais pas à la construction en torchis. Cependant, des codes et des documents techniques nationaux pour la construction en terre ont été produits en France, en Inde, en Tanzanie, au Mozambique, au Maroc, en Tunisie, au Kenya, en Côte d'Ivoire, au Mexique, au Brésil, au Pérou, en Turquie et au Costa Rica. Ces documents ne s'appliquent pas à la construction en torchis (Maniatidis & Walker, 2003). La majorité de ces documents et codes ont été retirés des références de documentation de construction selon Maniatidis & Walker (Maniatidis & Walker, 2003).



Figure 1.7 Usine à Saint Siméon de Bressieux dans l'Irèse
Tirée de Chabriac (2014, p.26)

En ce qui concerne la construction en terre au Canada, le principal défi réside dans les exigences des codes et des réglementations de construction. Ces enjeux ont été abordés dans l'article de conférence de Dick et al. (Dick & Krahn, 2015). Selon les auteurs, choisir une méthodologie de conception acceptée et développée pour un matériau non normé, ainsi que développer une méthode d'essai pour justifier l'analyse et la conception finale devient crucial et obligatoire pour obtenir l'acceptation du Centre canadien des matériaux de construction (CCMC). Cependant, il existe des constructions en terre battue stabilisée au Canada. La résidence Allen, un bâtiment construit avec des murs en terre battue stabilisée, a été achevée en 2012 (Dick & Krahn, 2015). Cette construction a été réalisée en se basant sur plusieurs normes, telles que la norme canadienne CSA A23.3 et diverses techniques provenant de la littérature (Dick & Krahn, 2015).

En plus de ce bâtiment, il y a la résidence Smyth-Allocott, également construite avec des murs en terre battue stabilisée, similaire à celle de la résidence Allen (Dick & Krahn, 2015; Gupta et al., 2021). Pour ce bâtiment, le premier étage est en terre battue stabilisée et le deuxième étage est en charpente légère. Le concept a été présenté aux services de bâtiment de la ville d'Ottawa avant la construction. Cette réalisation a été effectuée en se basant sur la norme New Zealand Engineering Design of Earth Buildings et les normes Canadiennes détaillées dans les articles (Gupta et al., 2021; Krahn & Dick, 2019). Il n'y a pas beaucoup de recherches et de publications sur la construction en terre au Canada. Certaines constructions en terre battue

existent et sont mentionnées dans les articles de revues, comme ceux de Gupta et al. (Gupta et al., 2021).

En France, l'intérêt pour la construction biosourcées et géosourcées a commencé dans les années 2000, avec un développement plus marqué autour de 2008 (Rabbat, Awad, Villot, Rollet, & Andrès, 2022; Verron-Guillemot et al., 2022). Ce mouvement a été renforcé par des initiatives visant à promouvoir des matériaux durables et à réduire l'impact environnemental lié aux matériaux de construction. Les efforts dans ce domaine se sont intensifiés avec des mesures réglementaires telles que la RE2020, qui vise à réduire l'empreinte carbone des constructions (Ministères Territoriales Écologie Logement, 2020). Ces matériaux peuvent être cités comme la terre battue, le bois, le béton de chanvre, la construction hybride terre-chanvre, etc.

1.1.4 Émission de GES et d'énergie grise

Plus l'énergie grise pour la mise en œuvre d'un matériau est élevée, plus il contribue aux émissions de CO₂ et à l'épuisement des ressources énergétiques. Par définition, l'énergie grise d'un matériau de construction représente l'énergie totale requise pour sa fabrication, de l'extraction des matières premières à son utilisation sur le chantier et à la durée de vie de ce matériau. Quelques études menées sur des bâtiments en blocs de ciment et en maçonnerie de blocs d'argile ont montré que le bâtiment construit en blocs de ciment émettait, durant sa construction, 452 kgCO_{2eq}/m² avec une énergie grise de 3198 MJ/m², tandis que le bâtiment résidentiel construit en maçonneries de blocs d'argile émettait 235 kgCO_{2eq}/m² et possédait une énergie grise de seulement 1942 MJ/m² (Saba et al., 2018). L'énergie grise des matériaux d'un mur en terre est environ 20 fois inférieure à celle d'un mur en parpaings creux et pleins (Hamard et al., 2016). Le Tableau 1.1 illustre les données d'énergie grise de quelques matériaux (Keefe, 2012; Olivier & Mesbah, 2016).

Tableau 1.1 Énergie grise de quelques matériaux de construction
Tirés de Keefe (2012) et Olivier & Mesbah (2016)

Matériau	Énergie en kWh/m ³
Aluminium	190 000
Bloc de ciment	700-2 640
Béton armé	1850
Enduit en ciment	1100
Brique de terre cuite	450 - 1 140
Panneau aggloméré	1 100
Chaux	900
Terre stabilisée	260
Terre crue	120
Enduit en argile ou en terre crue	5 - 30

1.1.5 Energies intrinsèques des matériaux en terre

L'énergie intrinsèque d'un matériau, également connue sous le nom d'énergie incorporée, correspond à l'énergie consommée pour sa production et la construction du bâtiment (Cabeza et al., 2013). Elle inclut l'énergie totale nécessaire, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'utilisation du matériau sur le chantier. Les matériaux ayant une énergie intrinsèque élevée génèrent davantage d'émissions de CO₂ que ceux ayant une faible énergie intrinsèque (Cabeza et al., 2013; Venkatarama Reddy, 2009). Pour les matériaux en terre stabilisée, l'énergie intrinsèque augmente linéairement avec la teneur en ciment (Reddy & Kumar, 2010). Par exemple, l'énergie intrinsèque totale d'un mur en terre stabilisée avec 8 % de ciment est d'environ 500 MJ/m³, ce qui représente entre 15 à 25 % de celle des murs en briques d'argile cuite. L'énergie intrinsèque des briques de terre comprimée et du pisé est respectivement de 3,94 MJ par bloc et de 596 MJ/m³, avec des émissions globales de 0,39 kg CO_{2eq} par bloc et de 47,5 kg CO_{2eq}/m³ (Fernandes, Peixoto, Mateus, & Gervásio, 2019). Le tableau 1.2 illustre quelques données sur l'énergie intrinsèque des matériaux utilisés dans un système de murs en maçonnerie.

Tableau 1.2 Énergie intrinsèque de quelques matériaux de mur en maçonnerie
Tiré de Venkatarama Reddy (2009)

Type d'éléments de bâtiments	Énergie intrinsèque en kWh/m ³
Maçonnerie en briques d'argiles cuites	556 – 945
Maçonnerie en briques de terre stabilisée	139 – 167
Maçonnerie en blocs de cendres volantes	278 – 375
Mur en pisé stabilisé	125 – 167
Mur en pisé non stabilisé	0 – 50

1.2 Formulation et avantage d'utilisation du torchis dans la construction

La construction en torchis est l'une des techniques de construction les plus anciennes, développée au Xe millénaire (Paulus, 2015a). Cette technique est mise en œuvre à l'état plastique. La terre mélangée avec les fibres végétales recouvre une structure en bois (environ 55 % de bois pour la structure) fixée entre des poteaux, appelés colombages ou ossature de bois (Borderon, Cantin, & Virgone, 2008). La structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter, tandis que la terre constitue un excellent matériau de remplissage et est facile à poser (Fontaine, Anger, Doat, Van Damme, & Houben, 2017). Les terres utilisées pour cette technique sont de préférence fines, argileuses et collantes, et contiennent peu de sable. L'argile est mélangée avec de l'eau dans des proportions variant entre 20 % et 26 % pour obtenir une consistance plastique. Les fibres ajoutées n'excèdent pas 8 % (Borderon et al., 2008; Giada et al., 2019). Ce mélange est appliqué sur la structure en bois jusqu'à la remplir complètement, puis on laisse sécher l'ensemble. Une fois sec, un enduit en argile, en chaux ou en argile-chaux, est généralement appliqué sur les surfaces extérieures et intérieures du mur.

La technique du torchis n'est pas appréciée, car elle est considérée comme un matériau sensible à l'eau et les données scientifiques sont très diversifiées. Cependant, lorsqu'elle est mise en œuvre correctement (protection contre les intempéries, les remontées capillaires, la pluie battante, les rongeurs et les termites), elle est extrêmement durable et très résistante aux séismes. Parmi ces études, une simulation réalisée en France sur des bâtiments en torchis versus des bâtiments conventionnels (construits avec des blocs de ciment), utilisant les normes

EN 12 831 et NF P52-612, a permis de déterminer les pertes de chaleur et la performance thermique des murs en torchis et conventionnels, avec et sans isolation (Figure 1.8) (Zeghari et al., 2019). De plus, les résultats de l'étude, basés sur les données climatiques de la ville de Caen en France et de Plymouth en Angleterre, ont montré que les matériaux en torchis offraient un confort thermique efficace avec peu de consommation d'énergie en chauffage (Zeghari et al., 2021).

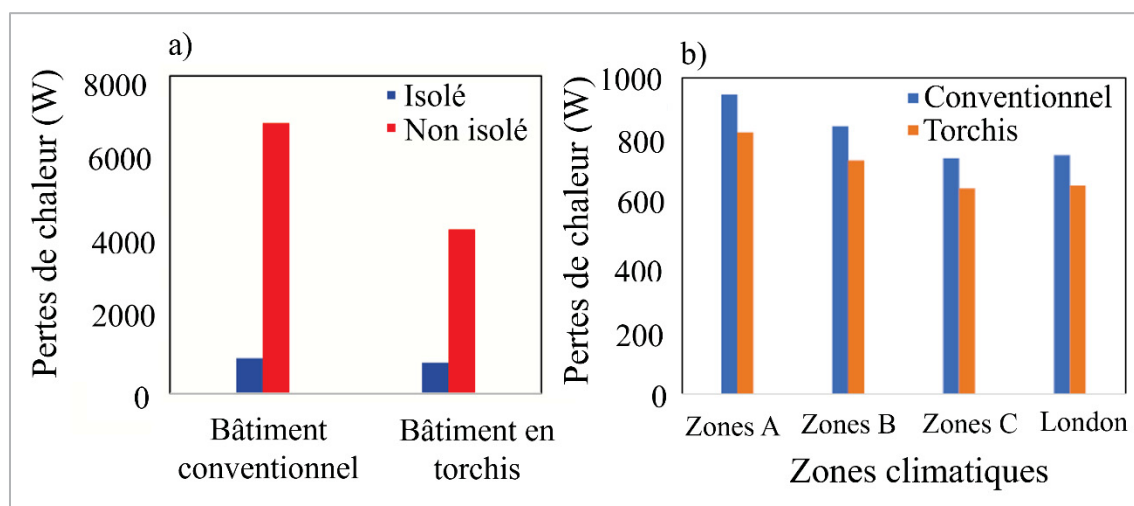


Figure 1.8 Pertes de chaleur des murs conventionnels et en torchis (a) et Performance thermique des bâtiments isolés : différentes zones climatiques (b)

Tirée de Zeghari et al. (2019, p. 07 et 08)

Ces études ont été menées sur des bâtiments situés dans trois zones climatiques différentes en France : la zone climatique A (température hivernale plus froide), B (température hivernale tempérée) et C (climat méditerranéen), ainsi qu'au Royaume-Uni, à Londres. Que les bâtiments soient isolés ou non, les pertes de chaleur des bâtiments en torchis étaient toujours inférieures à celles des bâtiments conventionnels. Les pertes de chaleur du bâtiment conventionnel non isolé étaient d'environ 7000 W, tandis que celles des bâtiments en torchis étaient d'environ 4000 W, ce qui représente une différence de 3000 W. Avec isolation, les pertes de chaleur de ces deux types de bâtiments sont réduites à moins de 1000 W. Les bâtiments en torchis perdaient moins de chaleur que les bâtiments conventionnels. Une autre étude menée par Stefania Liuzzi et al. (Liuzzi, Rubino, & Stefanizzi, 2017) sur un matériau d'argile renforcé par des déchets d'oliviers a montré que le bâtiment présentait des demandes énergétiques très faibles pour le refroidissement en été. La valeur totale moyenne de la demande d'énergie pour

le refroidissement sur six mois (d'avril à novembre) était de -116 kWh pour le salon et de -24 kWh pour les deux chambres, avec une température extérieure minimale de -5 °C et une humidité relative extérieure maximale de 90 %.

Les résultats ont montré que le torchis est un matériau qui peut être utilisé dans la construction de bâtiments écologiques et économiques presque partout dans le monde. Cependant, ce type de construction doit être réalisé avec plus de précautions. De ce fait, pour traiter le problème de la faible résistance thermique, en raison de la conductivité thermique du torchis, il est important que les murs en torchis soient plus épais pour répondre aux normes de performance thermique requises. Les principales techniques de construction et de protection des bâtiments en torchis selon Gounni & Louahlia (A. Gounni & H. Louahlia, 2020) sont les suivantes :

- (i) La fondation doit être surélevée pour protéger la structure en torchis de l'eau provenant du sol (remontées capillaires) et pour répartir la charge du bâtiment, réduisant ainsi le risque d'effondrement ;
- (ii) Le toit doit déborder suffisamment pour protéger les murs en torchis des eaux pluviales ;
- (iii) Un système de drainage efficace doit être mis en place pour prévenir les dommages causés par l'eau.

En ce qui concerne le patrimoine architectural en torchis, il y a moins d'édifices inscrits sur la liste du patrimoine mondial par rapport aux constructions en adobe et en pisé. Les Figures 1.9 et 1.10 illustrent quelques bâtiments construits en torchis.

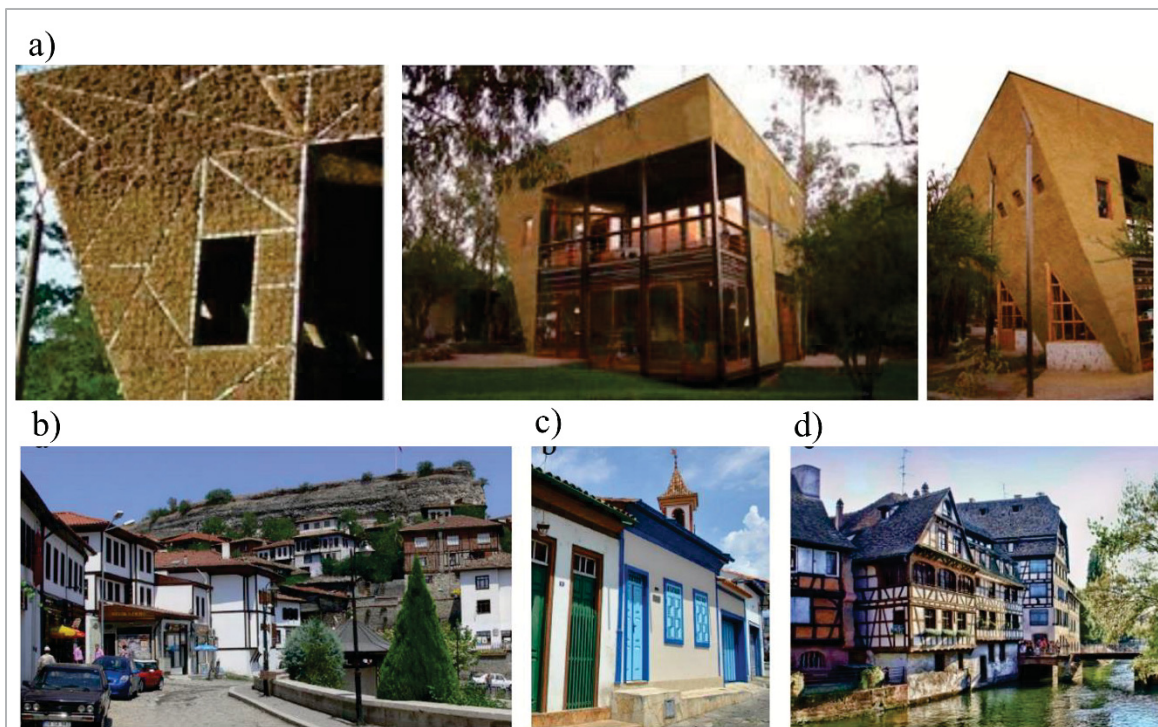


Figure 1.9 Construction en torchis : Granja Aventura en Espagne (a), Safranbolu en Turquie (b), Diamantina en Brésil (c) et Strasbourg en France (d)
Tirée de Paulus (2015, p.42 et 47)

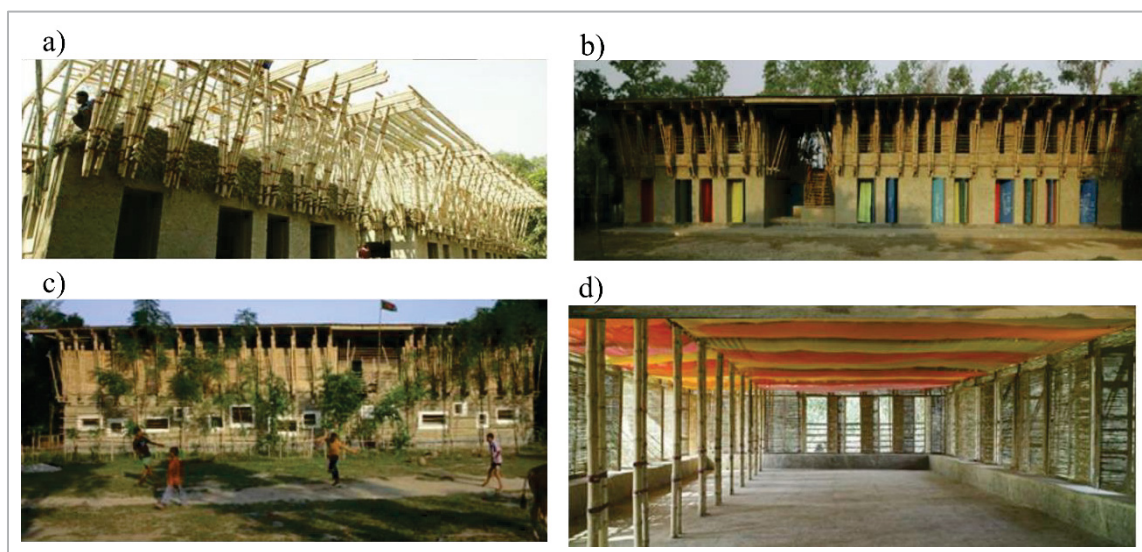


Figure 1.10 METI School à Rudrapur construite en torchis : fixation de la structure (a), bâtiment en entier (b et c), étage aéré en bambou (d)
Tirée de Paulus (2015, p.46)

1.3 Propriétés thermiques et hydriques favorisant l'utilisation du bois/argile et en argile renforcée avec des fibres

1.3.1 Matériau à base d'argile et argile renforcée de fibres

Le principal intérêt de la terre réside dans sa forte densité, associée à une capacité thermique élevée et une conductivité thermique limitée. Cette forte inertie thermique permet d'améliorer le comportement thermique des bâtiments (confort et économies d'énergie). L'argile utilisée avec le bois est un moyen de concevoir des systèmes de murs capables de conserver leur pouvoir isolant. La maçonnerie en argile a un potentiel de régulation de l'humidité intérieure bien plus élevé que les matériaux de construction conventionnels (McGregor, Heath, Shea, & Lawrence, 2014). La conception des enveloppes en bois/argile permet de maximiser la capacité tampon du bâtiment, ce qui est important en raison de son influence positive sur l'environnement intérieur, la santé, le confort (Rode & Grau, 2008) et sur la durabilité du matériau. Le comportement hygrothermique face à la variation de l'humidité relative dépend principalement de la porosité du matériau, de la teneur en minéraux d'argile et de leur affinité avec l'eau (Laou, 2017b).

L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps dans les matériaux à base d'argile non renforcée soumis à des humidités relatives croissantes est très rapide. Pour les briques de terre, Cagnon et al. (2014) ont montré qu'après seulement 3 à 4 jours d'immersion des briques dans l'eau, leurs masses se stabilisent, quelle que soit la taille de l'échantillon (Cagnon, Aubert, Coutand, & Magniont, 2014). Toutefois, la différence de nature des minéraux argileux contenus dans une terre argileuse peut ralentir ou augmenter le degré d'absorption d'humidité des matériaux formulés avec celle-ci. En effet, la vitesse de réponse du matériau en argile au changement d'humidité relative est l'une des propriétés les plus intéressantes de la terre pour réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments (Laou, 2017b). L'argile mélangée avec des fibres végétales devient plus hygroscopique en raison de la porosité des fibres. Selon la littérature, plus le taux de fibres ajoutées au mélange d'argile est élevé, quelle que soit la méthode de fabrication du matériau, plus la masse volumique diminue, suivie d'une baisse de la conductivité thermique (Azil et al., 2023; Liuzzi et al., 2017). Le Tableau 1.3 présente les

données de quelques propriétés des briques de terre et de terre renforcée avec des fibres végétales.

Tableau 1.3 Quelques propriétés thermiques et hydriques des briques de terre et de terre renforcée avec des fibres végétales

Type de matériau	Brique de terre non stabilisée	Brique de terre stabilisée au ciment de 8 %	Brique de terre non stabilisée	Argile renforcée avec différentes fibres végétales
Masse volumique (kg/m ³)	1750 à 2200	1818 à 2000	1700 et 2200	1409 à 1669
Conductivité thermique (W/m. K)	0,40 à 0,69	0,66 à 0,85	0,66 et 0,75	0,43 à 0,59
Résistance à la vapeur d'eau à l'état humide (-)	3 à 7	7 à 8	6,37 et 9,32	12,5 à 15,1
Résistance à la vapeur d'eau à l'état sec (-)	7 à 19	-	15,49 et 18,56	20,8 à 25,2
Perméabilité à la vapeur d'eau à l'état humide kg/(m. s. Pa)	3 à 6,2 10 ⁻¹¹	2,5 à 2,9.10 ⁻¹¹	2,94.10 ⁻¹¹ et 2,01.10 ⁻¹¹	-
Perméabilité à la vapeur d'eau à l'état sec kg/(m. s. Pa)	1 à 2,7 10 ⁻¹¹	-	1,21 et 1,01	-
Capacité thermique J/(kg. K)	900 à 960	997	956 et 909	850 à 959
Référence	(Cagnon et al., 2014)	(Toure et al., 2019)	(Laou, 2017b)	(Liuzzi et al., 2017)

En termes de résistance à la compression, les matériaux en argile stabilisés au ciment ou à la chaux ont une résistance supérieure à celle des matériaux en argile non stabilisés. Cependant, il faut noter que la capacité isolante de ces matériaux diminue avec l'augmentation de la conductivité thermique et la réduction de la perméabilité à la vapeur d'eau engendrées par

l'ajout de ces adjuvants. La densité sèche des argiles est l'un des paramètres physiques influençant la conductivité thermique des matériaux en argile (Kadir, Mohajerani, Roddick, & Buckeridge, 2009). Le rapport entre la conductivité thermique à la saturation et la conductivité thermique à l'état sec ($\lambda_{Sr}/\lambda_{sec}$) des briques d'argile varie entre 1 et 1,5 pour un degré de saturation (sr) allant de 0 à 25 % (Cagnon et al., 2014). Il faut également noter que le degré de saturation (sr) des briques d'argile impacte leur conductivité thermique. Malgré le comportement hygrothermique intéressant des matériaux en terre crue, leurs propriétés mécaniques restent toujours faibles selon la littérature. Ils présentent une faible résistance à la flexion et à la compression. Ces propriétés sont déterminantes pour le dimensionnement des structures en terre. En effet, une résistance à la compression élevée implique une épaisseur de l'enveloppe plus faible (Laou, 2017b). Les éléments de maçonnerie en adobe et en briques de terre comprimée ont une résistance à la compression pouvant atteindre entre 1 MPa et 16 MPa (Laou, 2017b). Celle-ci diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. En revanche, les briques d'argile ont une effusivité plus élevée, et bien qu'elles aient une faible résistance à la vapeur, elles permettent tout de même de répondre aux besoins hygrothermiques de l'enveloppe du bâtiment.

1.3.2 Phénomène thermique

La terre crue est l'un des matériaux offrant le plus de confort thermique. La structure poreuse des matériaux en terre et leur interaction avec l'eau confèrent à ce matériau une importante capacité de stockage de la chaleur. L'eau emprisonnée dans les pores du matériau s'évapore ou se condense, libérant ou absorbant une quantité d'énergie sous forme de chaleur pour atteindre l'équilibre thermique du mur. Ce changement de phase libère de la chaleur quand la température intérieure est basse, ce qui a pour effet de réchauffer l'espace intérieur. À l'inverse, lorsque la température intérieure est élevée, l'évaporation de l'eau contenue dans les matériaux de l'enveloppe contribue à diminuer la température interne du bâtiment. La présence d'eau dans les pores des matériaux entraîne une augmentation des valeurs de la conductivité thermique apparente des éléments de l'enveloppe. Cette augmentation est due au fait que la conductivité thermique de l'eau est 30 fois supérieure à celle de l'air, présent initialement dans

les pores des matériaux à l'état sec (Cérézo, 2005; Touré, 2018). Sur une plage de teneur en eau comprise entre 0 % et 3 %, la conductivité thermique des matériaux en terre varie entre 0,11 et 1,41 W/(m·K). Bien que cette variation ne puisse pas provoquer la formation de pathologies, elle peut entraîner la dégradation de l'enveloppe en réduisant sa performance (Laou, 2017b). Le Tableau 1.4 présente les masses volumiques et l'inertie thermique des murs en terre, en bois et en béton, chacun ayant une épaisseur de 20 cm. Selon les données illustrées dans le tableau 1.4, les murs en terre crue ont une capacité thermique presque quatre fois supérieure à celle des murs en terre cuite et en sapin massif, et supérieure à celle des murs en béton plein de 18 Wh/(m²·K).

Tableau 1.4 Performances d'inertie thermique de différentes enveloppes de 20 cm d'épaisseur
Tiré de Laou (2017a, p. 31)

Type de matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Épaisseur de la paroi (m)	Inertie thermique Wh/(m ² K)
Mur en terre crue monolithique	1700-1900	0,2	157
Mur en béton plein	2500	0,2	139
Mur en brique cuite creuse	600-800	0,2	40
Mur en sapin massif	450	0,2	40

1.3.3 Phénomène hydrique

La capacité d'absorber et de désorber rapidement l'humidité permet aux matériaux à base d'argile de réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments, en établissant un équilibre avec la condition ambiante. Ces matériaux captent l'humidité de l'air ambiant et la restituent lorsque l'air devient sec. La capacité d'adsorption d'eau de la terre peut varier de 2 % à 8 % de sa masse sèche en fonction de la teneur en eau, du type d'argile qu'elle contient, ainsi que de la surface spécifique des feuillets qui la composent (Laou, 2017b). Elle est capable de maintenir sa stabilité et son équilibre hygrométrique entre 5 % et 7 % de sa masse dans une pièce à 95 %

d'humidité relative pendant six jours et peut également réguler l'air ambiant pour se maintenir dans la zone de confort optimale de 40 % à 50 % d'humidité relative (Laou, 2017b). La couche responsable des échanges hydriques dans les matériaux en terre crue est d'environ 1,5 cm et peut absorber 300 g d'eau par mètre carré en 48 heures lorsque l'humidité ambiante augmente de 50 % à 80 % HR (Laou, 2017b). Le confort thermique des occupants est assuré lorsque l'humidité relative de l'air varie entre 35 % et 65 % (Holm & Engelbrecht, 2005). En ce qui concerne la résistance à la vapeur d'eau, les matériaux en terre crue ont une très faible résistance par rapport aux matériaux de construction tels que le bois, la brique de terre cuite et les blocs de béton pleins lourds, mais une résistance similaire à celle du béton cellulaire (Tableau 1.5).

Tableau 1.5 Valeurs de résistance à la diffusion de vapeur d'eau des certains matériaux
Tiré de Laou (2017a, p.30)

Matériaux	Conditions sèches (0 – 55 %HR)	Conditions humides (55 % - 95 % HR)
Terre crue (2200 kg/m ³)	10	5
Béton cellulaire (1300 kg/m ³)	9	7,5
Brique de terre cuite (2100 kg/m ³)	31	-
Béton plein lourd (2300 kg/m ³)	135	20
Bois (Douglas)	112	34,50

1.3.4 Phénomène thermique et hydrique du bois

Le bois est un matériau naturel, rigide et résistant, qui requiert une faible consommation d'énergie pour sa transformation, est peu polluant et surtout abondant dans la majorité du territoire Canadien, ainsi que dans certains pays du continent d'Afrique et d'Europe. Il est caractérisé par une grande complexité, avec une hétérogénéité à différentes échelles physiques et structurelles. Le bois est majoritairement composé de cellulose (40 % à 50 %), d'hémicellulose (20 % à 40 %) et de lignine (20 % à 30 %) (Laou, 2017b; Navi & Frederic, 2005). Ces trois constituants essentiels déterminent la durabilité du bois, sa masse volumique, sa vulnérabilité face aux insectes et sa résistance mécanique. Ils sont également à l'origine des variations des propriétés physiques du bois (Navi & Frederic, 2005; Varnier, 2019). Le bois

est aussi un matériau hygroscopique doté d'excellentes qualités thermiques et structurelles, ce qui en fait un bon matériau pour la construction des maisons à ossature bois, que ce soit dans les pays à climat très chaud comme en Afrique ou dans les climats froids. Sa forte capacité à réguler la température en fait un excellent régulateur thermique. La structure d'une maison en bois, utilisant l'argile comme matériau de remplissage, offre un double avantage en termes de régulation thermique. Le taux d'humidité du bois saturé varie entre 20 % et 40 % selon le type de bois (Laou, 2017b). En raison de sa porosité et de sa faible conductivité thermique, le bois élimine l'effet de condensation et réduit les pertes de chaleur dans un mur à ossature bois. Bien que le bois soit connu pour être un matériau à grande capacité hydrique, il reste assez étanche à la vapeur d'eau et possède une faible densité, ce qui lui confère une effusivité thermique comparable à celle des matériaux moins hygroscopiques (Rode & Grau, 2008).

1.4 Raison relative au déficit de logement

Le déficit de logements est un problème complexe qui peut être attribué à un ensemble de facteurs économiques, sociaux, politiques et environnementaux. Dans la grande majorité du continent africain, l'accès aux logements abordables est un défi crucial. Bien que les spécificités de ces défis varient d'un pays à l'autre et d'une région à l'autre, il est de plus en plus difficile pour la majorité des résidents urbains d'obtenir et de conserver des terrains et des logements adéquats et abordables (Majale, Tipple, & French, 2011). L'offre de logements abordables reste un défi pour la plupart des pays, en particulier ceux de l'Afrique (Majale et al., 2011). Il faut noter la mauvaise gestion des sites de construction, le manque d'attention portée à la qualité des logements, l'expertise insuffisante des entrepreneurs en matière de qualité et l'emploi de personnel inexpérimenté (Aigbavboa, A Oke1, Aghimien, & Okgonne, 2019). En plus du manque de main-d'œuvre qualifiée et de connaissances sur l'utilisation des matériaux locaux disponibles s'ajoute le déficit de logements qui représente environ 51 millions de logements (Bah et al., 2018 b). Ces estimations ont été réalisées en 2015, 2018 et 2019 pour évaluer la gravité de la pénurie de logements due à la croissance démographique (Figure 1.11). En effet, en Afrique, la demande de logements dépasse l'offre.

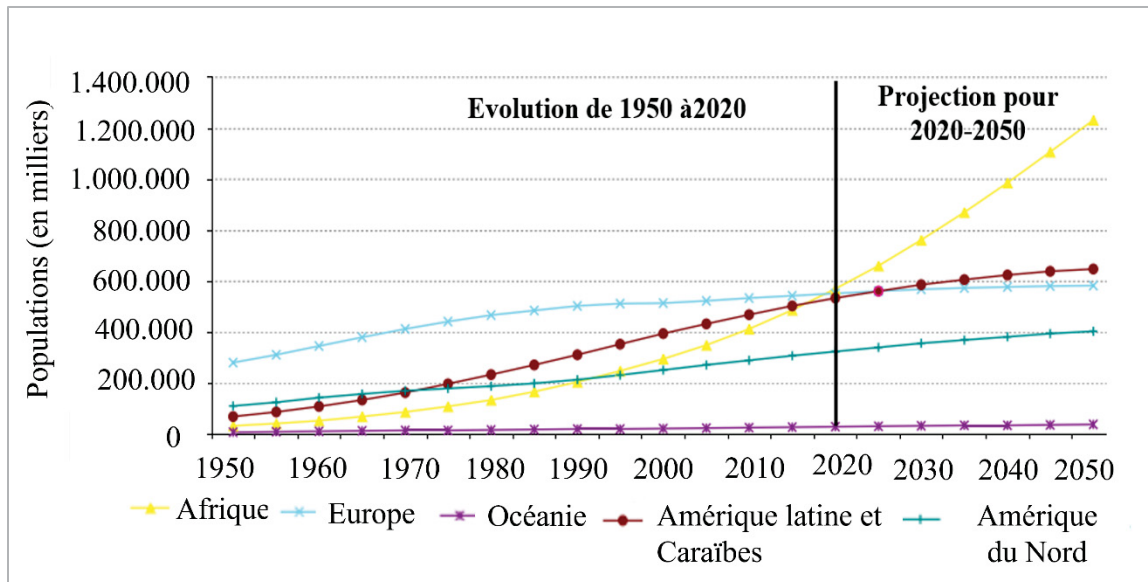


Figure 1.11 Croissance de la population urbaine dans certaines régions de 1950-2020 et projection 2020-2050
Tirée de Majale et al., (2011, p.21)

L'Afrique occupe la première place en termes de croissance démographique, et cette croissance engendre une pénurie de logements. Selon les données obtenues de la littérature, l'Ouganda et le Nigéria sont les deux pays où le manque de logements est le plus critique, avec un taux de 33,6 % pour le Nigéria et de 31,6 % pour l'Ouganda. Le secteur le plus touché par la demande de logements est celui de la construction résidentielle (CAHF, 2017; Majale et al., 2011; Yetunde, 2014). En Angola, au Cameroun, en Côte d'Ivoire, en Éthiopie, au Kenya et en Afrique du Sud, 40 % de la demande porte sur des logements individuels de 40 m², 40 % sur des appartements de 60 m² et 20 % sur des appartements duplex de 80 m² (Bah et al., 2018 b).

Pour satisfaire l'ensemble de la demande de logements en Afrique, le Centre for Affordable Housing Finance Africa estime qu'un investissement de 400 milliards USD (soit 523,71 milliards de dollars canadiens) serait nécessaire pour la construction de 52 millions de logements. Cela équivaut à 7500 USD (9820 CAD) par maison, ce qui permettrait à plus de 50 % de la population de pouvoir se procurer une maison (CAHF, 2017). Afin de faciliter l'accès aux logements abordables, les gouvernements africains doivent jouer un rôle actif plutôt que de simples facilitateurs. Ils doivent être proactifs et également ouverts aux offres de projets de construction de logements abordables provenant des autres continents. Ces offres de

logements peuvent contribuer à l'économie nationale, créer des emplois, améliorer l'industrie de la construction et les conditions de vie pour la santé et le bien-être de tous les Africains.

En examinant le déficit de logements en Amérique du Nord, et plus précisément au Canada, les cinq dernières années ont vu un consensus croissant sur le problème de logements abordables et adéquats pour une grande proportion de ménages canadiens (Smith, 2024; Weiler & Caxaj, 2024; Whitzman, 2023). À Québec, le taux d'inoccupation est de 0,9 %, le niveau le plus bas en 15 ans, et les loyers ont augmenté de 4,8 % en un an, entraînant ainsi une augmentation du nombre de sans-abri (Steele, Cameron, Revington, & Director, 2024). La province de Québec connaît des crises majeures du logement, rendant l'accès au logement de plus en plus difficile (Grimard, Lapalme, Wagner-Lapierre, & Blank, 2024; Weiler & Caxaj, 2024). La croissance démographique et l'urbanisation, dues à l'augmentation de la population par l'immigration et la concentration dans les zones urbaines, exercent une pression sur le marché du logement, augmentant ainsi la demande qui dépasse l'offre disponible et aggrave le déficit de logements abordables. La construction de logements sociaux apparaît donc comme la seule solution pour résoudre ce problème sur le marché immobilier.

1.5 Résumé de la revue de la littérature

La terre est de plus en plus reconnue comme un matériau de construction innovant. Ses nombreuses qualités écologiques et environnementales lui permettent de retrouver une place importante dans le secteur de la construction. Les matériaux en terre présentent des avantages en matière de réduction de la consommation énergétique et d'amélioration du confort intérieur au sein des bâtiments, grâce à leur capacité à réguler la température et l'humidité. Cependant, leurs performances sont limitées en raison de leur vulnérabilité face aux forts gradients hygrométriques. Pour promouvoir l'utilisation des matériaux en terre avec les nouvelles technologies de construction, favorisant ainsi une approche écologique et économique, il est essentiel d'établir une base de données scientifiques sur leurs performances hygrothermiques. Cette démarche pourrait permettre d'établir des codes, des normes et des lois pour l'avenir en ce qui concerne la construction en terre argileuse, en bois/terre ou en bois/torchis. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet, qui vise à étudier et à établir une base de données sur les

propriétés hygrothermiques et mécaniques des matériaux à base de terre argileuse, renforcés avec 3 % et 6 % de fibres de blé, pour la conception des bâtiments à ossature de bois. Des simulations numériques sont réalisées pour différentes configurations de murs en torchis afin d'évaluer leur performance hygrothermique dans diverses zones climatiques. Le prochain chapitre abordera les différentes méthodes utilisées pour la caractérisation des matières premières et des échantillons formulés, ainsi que les simulations numériques qui seront réalisées pour répondre à l'objectif 3.

CHAPITRE 2

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce chapitre décrit, dans un premier temps, les matériaux et les procédures utilisés pour fabriquer les échantillons nécessaires à l'étude dans le cadre de ce doctorat. Il développe ensuite l'ensemble des méthodes de caractérisation utilisées pour atteindre les objectifs de la recherche. Toutes les méthodes et les normes présentées dans ce chapitre sont résumées dans la Figure 2.1. Enfin, un échéancier global est également présenté à la fin du chapitre.

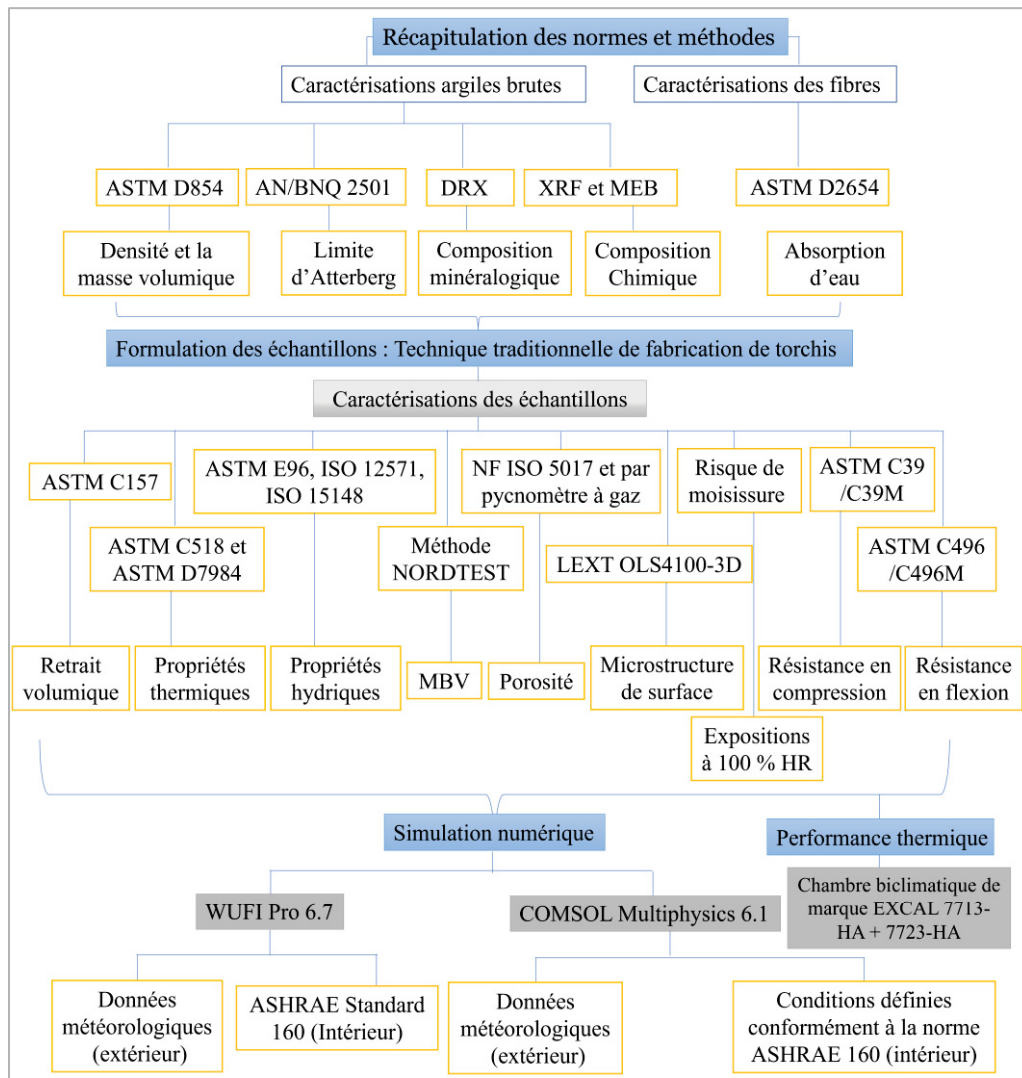


Figure 2.1 Diagramme de la méthodologie globale permettant à répondre aux objectifs de la thèse

2.1 Matériels

Dans un premier temps, les matériaux sélectionnés pour la confection du torchis et des matériaux en argile pour l'étude sont présentés. La revue de la littérature a révélé un grand nombre de liants et de fibres utilisés pour la stabilisation et le renforcement des matériaux en terre. En ce qui concerne le torchis, plusieurs méthodes et types de fibres sont utilisés pour sa fabrication. Dans cette étude, les fibres de blé ont été retenues en raison de leur disponibilité en abondance. Initialement, le torchis étudié est non stabilisé, puis stabilisé avec 2 %, 4 % et 6 % de ciment. L'étude se concentre davantage sur le torchis non stabilisé. Pour le torchis stabilisé, seules les propriétés thermiques, mécaniques et la porosité ont été déterminées.

La section 2.2 donne plus de détails sur la méthodologie utilisée pour la caractérisation des argiles ainsi que sur les tests d'absorption/désorption d'eau des fibres, et le processus de fabrication des échantillons. Deux types d'argiles et des fibres de blé ont été sélectionnés pour confectionner les blocs d'argile et de torchis. Les deux types d'argiles ont été choisis pour leur disponibilité et leur utilisation importante dans la construction. Les analyses ont inclus la détermination de la composition minéralogique et la limite d'Atterberg des argiles, ainsi que l'évaluation de la capacité d'absorption et de désorption d'eau des fibres avant de procéder à la confection des torchis.

2.1.1 Types d'argile et de ciment

Les argiles rouge et beige utilisées proviennent de la province de l'Alberta, au Canada, et sont disponibles chez Sial Laval, une entreprise de fabrication et de distribution de produits pour les potiers et les céramistes. Les argiles sont vendues en sacs de 23 kg. Avant de commencer la fabrication des matériaux en torchis, les deux types d'argiles ont fait l'objet d'une série de tests de caractérisation, présentés dans le chapitre 5. Les échantillons stabilisés avec le ciment ont été confectionnés avec du ciment hydraulique à usage général de type GU, déjà caractérisé dans une thèse de doctorat (Brial, 2022). La figure 2.2 présente un aperçu des argiles rouge (a) et beige (b) et du ciment GU (c) utilisés pour la fabrication des échantillons.

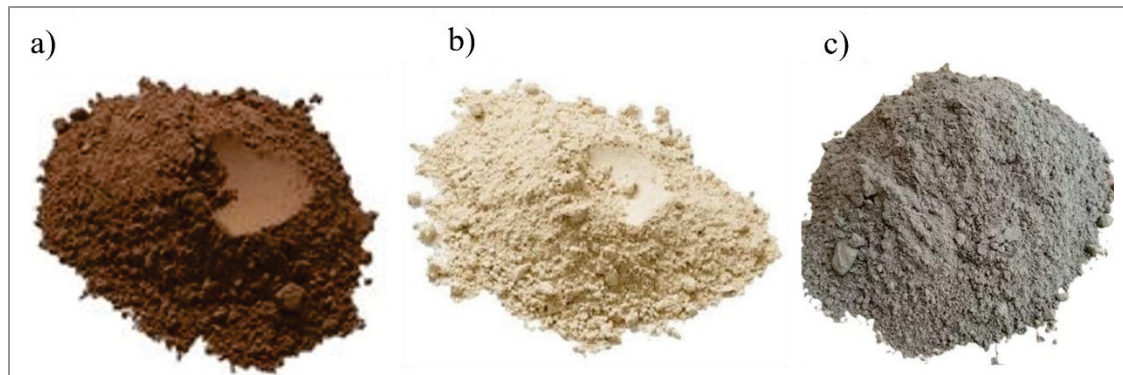


Figure 2.2 Matières premières : (a) argile rouge, (b) argile beige et (c) ciment GU

2.2 Méthodes

2.2.1 Densité sèche et limite d'Atterberg

2.2.1.1 Densité sèche des argiles en poudre

La densité de chaque argile a été déterminée par la méthode du pycnomètre, en suivant les directives de la norme ASTM D854. Pour effectuer les essais, 200 g de chaque argile ont été prélevés directement dans les sacs, puis pesés à l'aide d'une balance de précision de 0,1 g avant d'être placés dans une étuve pendant 24 heures à environ 110 °C. Ensuite, elles ont été séparées en quatre parties de 50 g pour chaque argile. Trois échantillons de 50 g ont été utilisés pour chaque argile pour le test. La Figure 2.3 montre les argiles préparées pour le séchage (a), le prototype de la méthode du pycnomètre (b), les trois échantillons d'argile rouge introduits dans les pycnomètres remplis d'eau distillée (c) et placés dans l'appareil d'élimination des bulles d'air (d) (A Kaboré & Ouellet-Plamondon, 2021).

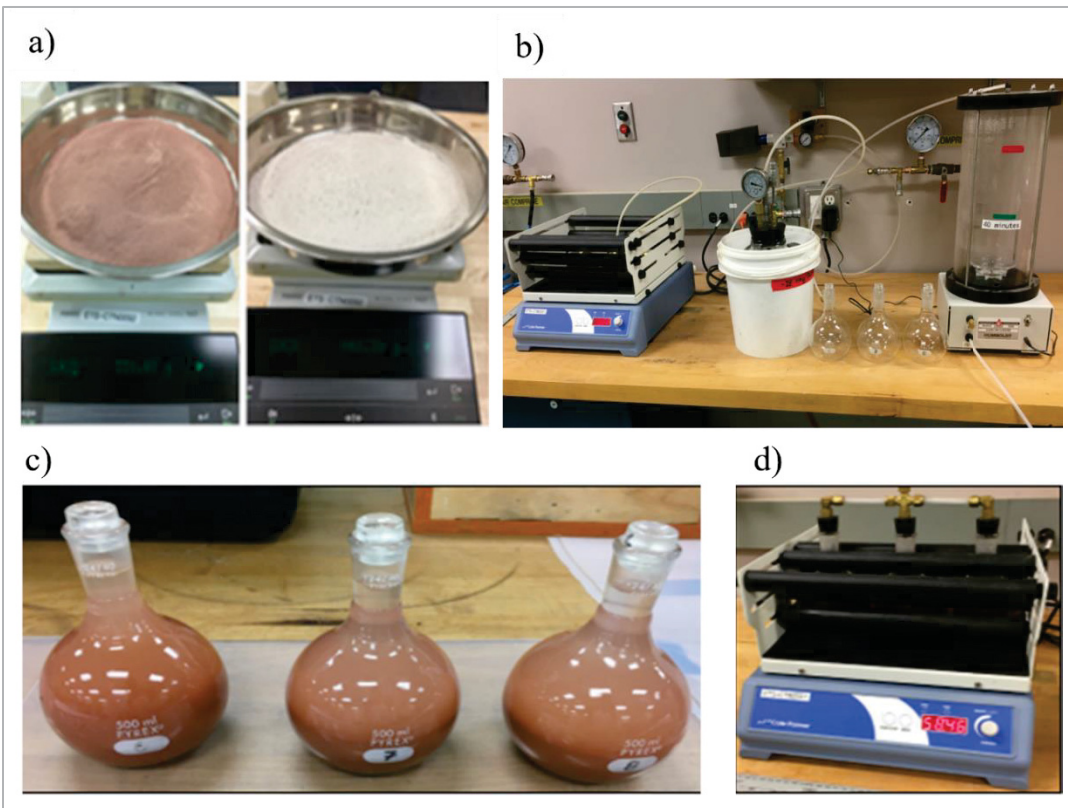


Figure 2.3 Échantillons d'argile (a), Prototype de la méthode du pycnomètre (b), échantillons dans les tubes à essai (c) et l'élimination des bulles d'air (d)
Tirée de Kaboré & Ouellet-Plamondon (2021)

2.2.1.2 Limite d'Atterberg

La limite d'Atterberg, obtenue en fonction de la limite de liquidité et de plasticité, a été déterminée à l'aide de l'appareil Casagrande, en suivant les directives de la norme CAN/BNQ 2501 (CAN/BNQ-2501-090, 2011).

- Limite de liquidité

Pour la détermination de la limite de liquidité, environ 250 g de chaque type d'argile ont été pesés. Ensuite, une quantité d'eau comprise entre 20 et 30 % de la masse de l'argile a été utilisée pour réaliser des mélanges manuellement dans un récipient non absorbant, afin d'obtenir une pâte homogène à l'état plastique. Afin d'assurer l'homogénéité du mélange, la pâte obtenue a été conservée à température ambiante pendant 24 heures dans un sac en

plastique hermétique en laboratoire (Figure 2.4). Cet essai a été réalisé avec Meriam Aouinti (Aouinti, 2023).

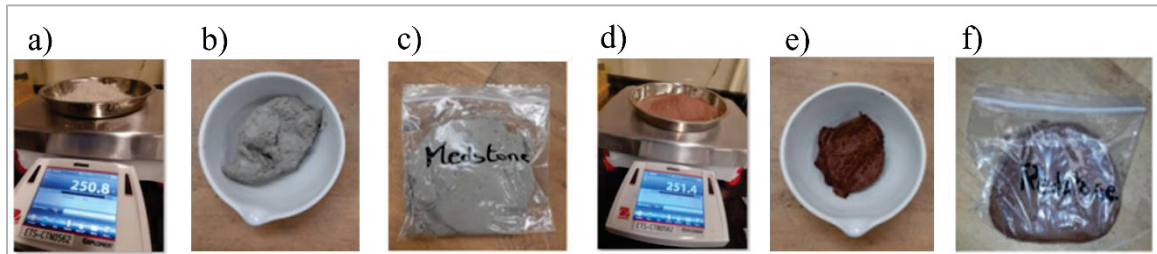


Figure 2.4 Préparation des échantillons pour l'essai des limites d'Atterberg, (a, d) pesé des argiles, (b, e) mélange d'argile-eau et (c, f) conditionnement du mélange
Tirée du mémoire de Meriam Aouiti (2023)

Avant de déterminer la limite de liquidité, le dispositif de Casagrande a été ajusté pour que la coupelle contenant l'échantillon chute d'une hauteur de 1 cm pendant l'essai (Figure 2.5a). Ensuite, une portion du mélange destinée à l'essai a été placée et étalée dans la coupelle à l'aide d'une spatule pour obtenir une épaisseur de 1 cm au centre de la coupelle (Aouinti, 2023). Une rainure a été tracée le long de l'axe de la coupelle, et la manivelle de la coupelle a été mise en rotation à une vitesse de deux tours par seconde pour que les deux bords de la rainure se croisent à une distance de 12 à 13 mm. Par la suite, un échantillon d'environ 10 grammes a été prélevé à l'endroit où les deux bords se sont croisés. Cet échantillon a été immédiatement pesé et placé dans une étuve à 110 °C pendant 24 heures (Figures 2.6b et 2.6d). L'objectif est d'obtenir 3 à 4 teneurs en eau correspondant à des fermetures de rainures réparties des deux côtés de la rainure pour les 25 coups de la manivelle. Les étapes de l'essai sont illustrées dans la Figure 2.5. Chaque teneur en eau a ensuite été déterminée par l'Équation 2.1.

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_h} * 100 \quad (2.1)$$

Avec w la teneur en eau en %, m_h la masse de l'échantillon humide prélevé juste après le test en g et m_s la masse de l'échantillon après séchage en g.

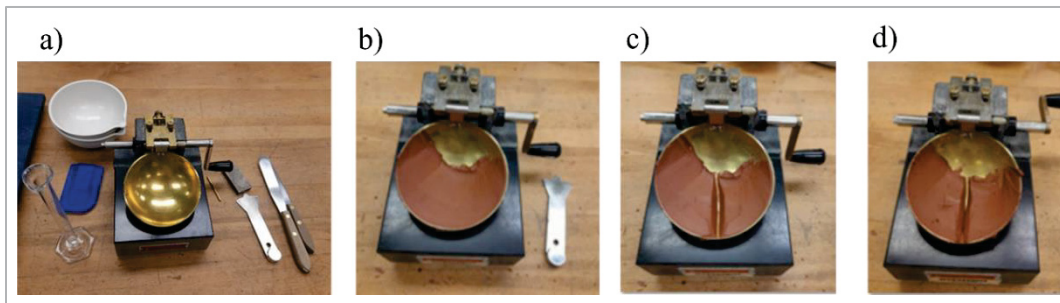


Figure 2.5 Coupelle de Casagrande (a), mise en place de l'échantillon dans la coupelle (b), traçage de la rainure (c) et fermeture de rainures (d)
Tirée du mémoire de Meriem Aouiti (2023)

- Limite de plasticité

Pour déterminer la limite de plasticité, une masse de 40 grammes de chaque échantillon d'argile humidifiée a été préalablement pesée. Les échantillons ont été séchés avec du papier absorbant jusqu'à pouvoir former une petite boule qui ne se fissure pas sous pression. Chaque échantillon a ensuite été travaillé manuellement pour former un rouleau de forme cylindrique de 3 mm de diamètre et de 5 à 6 cm de longueur (Figure 2.6a). Lorsque le diamètre du rouleau atteint 3 mm, il se fracture en morceaux de 1 à 2 cm de long (Figure 2.6 b). Ces fragments ont été pesés et placés directement dans l'étuve à 110 °C pendant 24 heures afin de déterminer leur teneur en eau (Figures 2.6c et 2.6d). La teneur en eau a ensuite été déterminée par l'Équation 2.1.

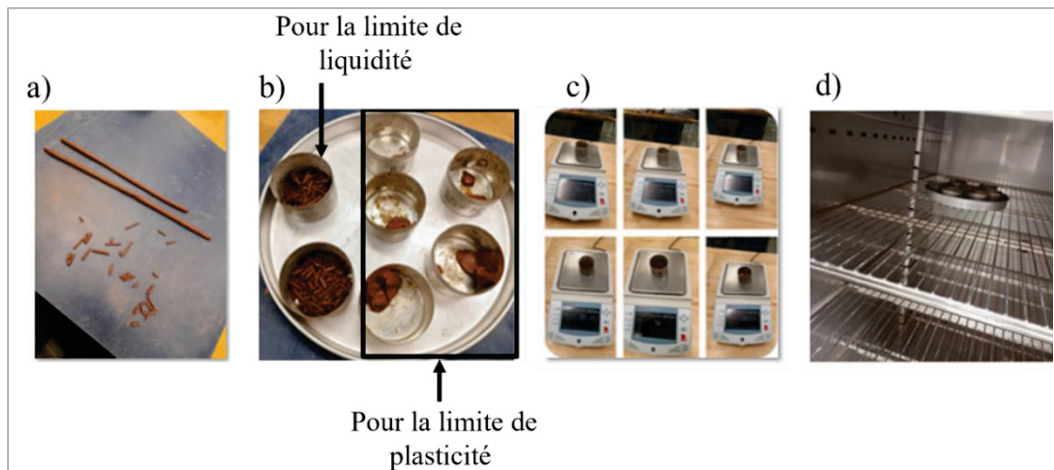


Figure 2.6 Étapes pour la détermination de la limite de liquidité, (a) rouleaux cylindriques, (b) échantillons pour limite de liquidité et plasticité, (c) pesée et (d) séchage. Tirée du mémoire de Meriem Aouiti (2023)

2.2.2 Compositions minéralogiques, chimiques et analyse thermogravimétrique

La composition minéralogique des deux argiles utilisées dans ce projet a été déterminée par la méthode de diffraction des rayons X (DRX) sur des échantillons en poudre de taille 300 μm (Figure 2.7c). Les analyses ont également été réalisées sur les échantillons mélangés avec 3 % et 6 % de fibres pour vérifier l'influence de l'ajout de fibres sur la composition minéralogique et chimique des argiles. Pour cela, les fibres ont été mélangées à l'argile et broyées à l'aide d'un broyeur Krups (figure 2.7a). Le mélange a ensuite été tamisé pour obtenir une poudre de 300 μm adaptée pour les tests (Figure 2.7c).

La composition chimique a été analysée par spectromètre de fluorescence à rayons X (XRF) et par microscope électronique à balayage (MEB). Pour les tests avec le MEB, un petit morceau de chaque échantillon, avec ou sans fibre, a été prélevé et recouvert d'or pour rendre les échantillons conducteurs. Chaque échantillon a été marqué d'un numéro pour une meilleure identification facile une fois à l'intérieur de l'appareil (Figure 2.8). L'analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) a été réalisée sur les échantillons en poudre de 300 μm (Figure 2.7c), sur les échantillons contenant 3 % et 6 % de fibres, ainsi que sur les échantillons stabilisés avec 2 %, 4 % et 6 % de ciment. Pour déterminer la distribution granulaire des argiles, la granulométrie par diffraction laser Mastersizer 3000 a été utilisée. Les détails sur les essais et les résultats ont été réalisés et présentés dans les travaux de (Aouinti, 2023)

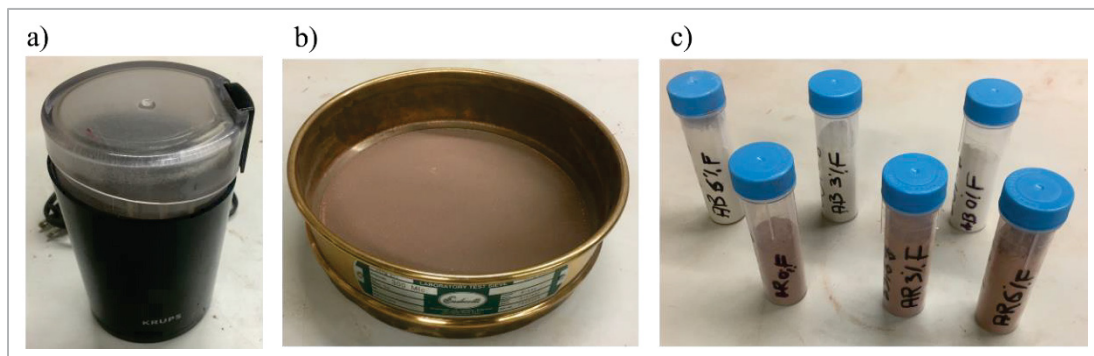


Figure 2.7 Étapes de préparation des échantillons d'essai, (a) Broyeur Krups, (b) tamis de 300 μm et (c) échantillons d'essai

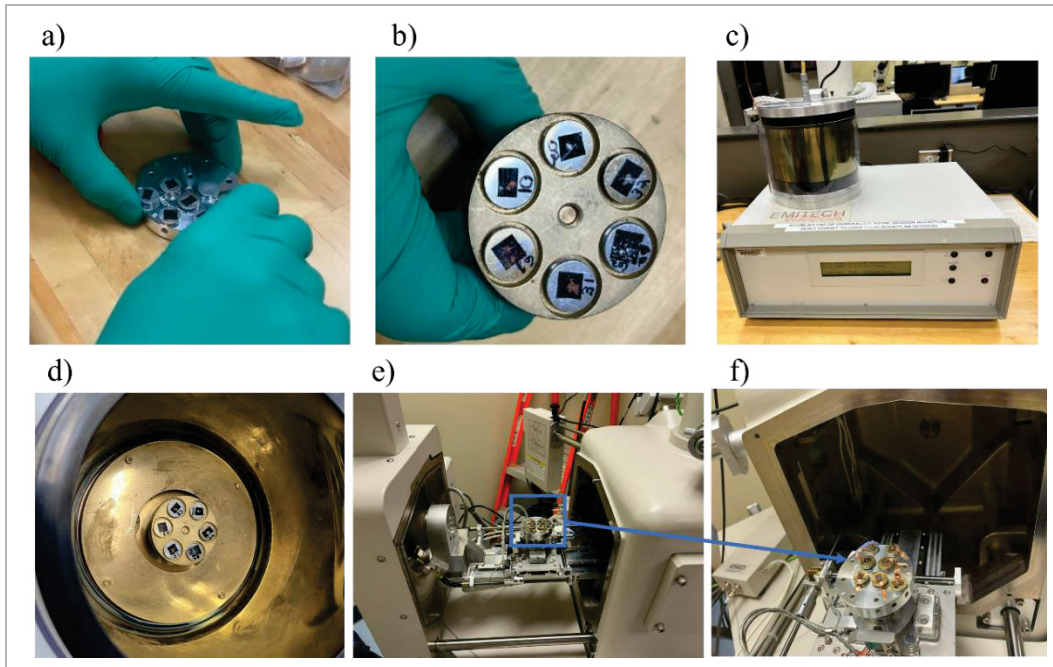


Figure 2.8 Étapes pour la détermination des éléments chimiques et la microstructure par le MEB, (a) couverture d'or sur les échantillons, (b) numérotage (c, d) maintenir les échantillons sur le support et (e, f) mise dans l'appareil MEB pour le test

2.2.3 Fibres végétales

Les fibres de blé utilisées pour la formulation des échantillons pour ce projet ont été fournies par l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) à Saint-Bruno-de-Montarville, au Québec, Canada. Avant de procéder aux essais, la teneur en eau initiale des fibres a été mesurée. Pour ce faire, les fibres ont été prélevées directement des sacs, puis 10,26 g ont été séchés dans une étuve à 50 °C pendant deux heures pour une première mesure, et ensuite remises rapidement dans l'étuve à la même température pour une durée d'une (1) heure. La teneur en eau mesurée après ces deux séchages était de 0 %. La teneur en eau initiale a ensuite été calculée en utilisant l'Équation 2.2.

$$w_i = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2.2)$$

Avec w_i la teneur en eau initiale en %, m_i la masse de l'échantillon avant séchage (fibres prélevées directement dans le sac) en g et m_s la masse de l'échantillon après séchage en g.

Avant d'utiliser les fibres de blé pour la fabrication des échantillons en torchis, des tests d'absorption et de désorption d'eau ont été réalisés. Cela afin de déterminer le coefficient d'absorption d'eau des fibres, dans le but de réduire le nombre de tests de qualité nécessaires pour obtenir des échantillons de torchis satisfaisants pour les tests. Les tests ont été réalisés en suivant les directives de la norme ASTM D2654 (ASTM D2654-22, 2022). La Figure 2.9 illustre chaque étape pour la réalisation des tests d'absorption d'eau des fibres. Les résultats obtenus après les tests ont permis de choisir le meilleur ratio eau/fibre pour la fabrication des échantillons en torchis. Par la suite, les tests de désorption d'eau ont été effectués sur les mêmes fibres après saturation. Ces dernières ont été exposées à l'air ambiant du laboratoire, à une température d'environ 23 °C, jusqu'au séchage complet.



Figure 2.9 Étapes pour l'essai d'absorption d'eau à température de 23 °C, 40 °C et 50 °C

Le taux d'absorption d'eau pour chaque échantillon de fibres est déterminé par l'Équation 2.3 après chaque pesée des fibres retirées de l'eau à un intervalle de temps régulier.

$$w_t = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \quad (2.3)$$

Avec w_t en % la teneur en eau absorbée par les fibres à l'instant t , m_w la masse des fibres après immersion dans l'eau en g et m_d la masse des fibres à l'état initial (fibres prélevées directement dans le sac) en g. Pour évaluer la capacité des fibres à restituer l'humidité absorbée pendant l'essai, tous les échantillons de fibres ont été exposés à l'air ambiant (à 23 °C) à la fin de l'essai d'absorption d'eau (après saturation). La pesée a été effectuée toutes les 2 heures jusqu'au séchage complet (retour à la masse initiale).

2.2.4 Formulation des échantillons

La formulation de 57 échantillons sans fibres, de dimensions 25,4 cm x 25,4 cm x 2,5 cm (10 pouces x 10 pouces x 1 pouce) et avec un rapport eau/argile (E/A) de 15 %, 20 %, 25 % et 30 %, a été réalisée (ANNEXE II). Parmi ces échantillons, seuls six (6), fabriqués avec un rapport E/A de 25 % et séchés à 30 °C dans une étuve pendant 24 heures, ont été retenus. Les échantillons non retenus présentaient des fissurations et/ou un retrait supérieur à 15 %, donc non utilisables pour les essais. Les échantillons retenus sont composés de trois (3) échantillons d'argile rouge et trois (3) d'argile beige. Après la sortie des échantillons de l'étuve, ils ont été exposés à l'air ambiant du laboratoire pendant sept (7) jours à une température de 23 °C. Le séchage des échantillons a été réalisé dans les laboratoires de l'École de technologie supérieure.

Durant le processus de séchage, la perte de masse, le taux de retrait volumique et l'évolution de la masse volumique ont été évalués. Les masses des échantillons ont été obtenues en les pesant à l'aide d'une balance de précision 0,01 g, et les dimensions des échantillons ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse, de précision 0,01 mm, chaque jour jusqu'au septième jour de séchage. La masse volumique a ensuite été calculée en fonction de la masse et du volume de l'échantillon à l'aide de l'Équation 2.4.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.4)$$

Avec ρ est la masse volumique en kg/m^3 , m est la masse en kg et V est le volume en m^3 .

Pour les échantillons renforcés avec des fibres, la fabrication a été réalisée en commençant avec 3 % de fibres non humidifiées, puis avec des fibres humidifiées à 50 % d'eau, 205 % d'eau (résultats du test d'absorption d'eau des fibres à 25 minutes) et 443 % d'eau (fibres saturées, résultat du test d'absorption d'eau). Le retrait volumique causé par le séchage, correspond au changement dimensionnel entre l'état humide et l'état sec du matériau, a été calculé en fonction du temps de séchage conformément à la norme ASTM C157 (ASTM C157/C157M-17, 2017b) et à l'aide de l'Équation 2.5. La décision de fabriquer les échantillons avec des fibres humidifiées en utilisant un rapport eau/fibre de 205 % d'eau en masse a été prise à la fin de cette étape (chapitre 4). Les détails sur le choix du rapport eau/argile, eau/fibre et de la méthode de séchage sont présentés dans le Tableau-A II-1 de l'ANNEXE II.

$$R_v = \frac{V_0 - V_f}{V_0} \times 100 \quad (2.5)$$

Avec R_v est le retrait volumique en %, V_0 est le volume à l'état humide des échantillons en m^3 et V_f est le volume en fonction du temps de séchage en m^3 . Tous les échantillons avec et sans fibres utilisés pour les essais hygrothermiques, mécaniques, porosité et au feu ont été fabriqués avec un rapport eau/argile de 25 % d'eau en masse d'argile. Tandis que les échantillons avec 3 % et 6 % de fibres ont été fabriqués avec des fibres humidifiées selon un rapport eau/fibre de 205 % d'eau en masse des fibres (valeur obtenue après les tests d'absorption d'eau des fibres). Les étapes pour la sélection du rapport eau/argile et eau/fibres, ainsi que les détails de la fabrication de torchis avec 3 % et 6 % de fibres sont décrits au chapitre 3. Quelques échantillons pour chaque type de test sont illustrés à la Figure 2.10. La fabrication du torchis sur le chantier de construction est décrite au chapitre 5, section 3.5.

Pour les torchis stabilisés, le mélange a d'abord été réalisé avec l'argile et le ciment avant l'ajout de l'eau, suivi de l'ajout des fibres, mais avec un rapport eau/argile de 27 %. Les propriétés mesurées de ces échantillons concernent uniquement les propriétés thermiques, mécaniques et la porosité. La même méthode de séchage a été appliquée à tous les échantillons.

La quantité d'échantillons sans ciment fabriqués pour les essais sont présentés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Nombre d'échantillons non stabilisés pour chaque type d'essai

Type de tests	Nombre d'échantillons
Essais thermique et hydrique	36
Essais mécaniques	36
Essais de porosité	18
Essais à la résistance au feu	50

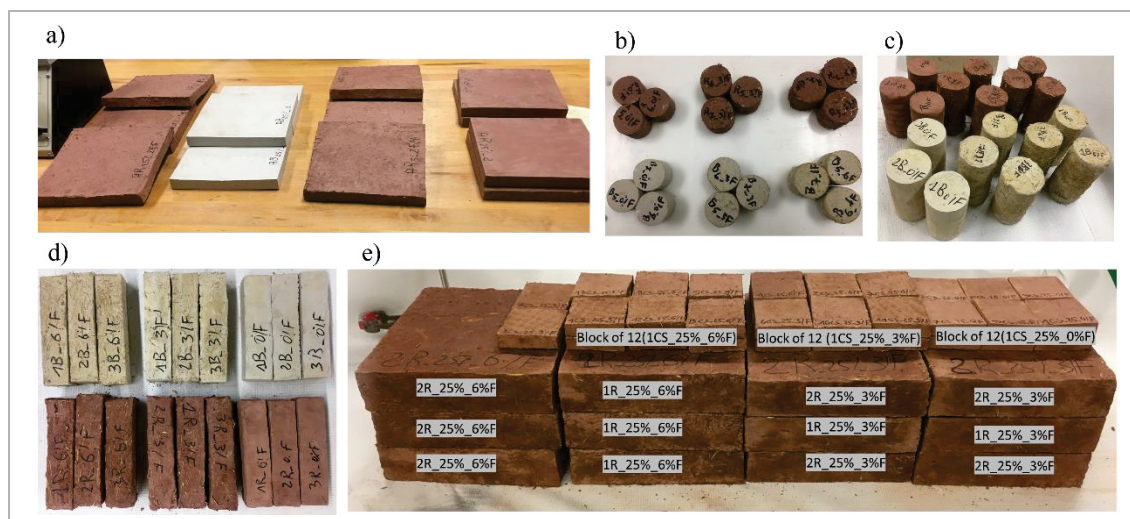


Figure 2.10 Quelques échantillons pour les essais, (a, b) essais propriétés hygrothermiques, (c, d) propriétés mécaniques et (e) résistance au feu

2.2.5 Détermination des propriétés hygrothermiques

Pour évaluer la performance thermique d'un matériau, les propriétés visées sont la conductivité thermique, la résistance thermique, la capacité thermique, sa masse volumique et l'inertie thermique. Les coefficients de l'inertie thermique sont l'effusivité et la diffusivité thermique. Pour les matériaux de construction, les propriétés thermiques sont généralement mesurées pour évaluer la capacité du matériau à réguler les variations de température, qu'elles soient élevées

ou basses. D'autre part, les propriétés hydriques sont mesurées pour évaluer la capacité du matériau à supporter des niveaux variables humidité élevée. Ces propriétés comprennent la perméabilité à la vapeur d'eau, le coefficient de résistance à la vapeur d'eau, le coefficient d'absorption d'eau, la capacité spécifique hydrique, la courbe de sorption et l'inertie hydrique. Les coefficients de l'inertie hydrique sont la diffusivité hydrique et l'effusivité hydrique. En général, la mesure des propriétés hygrothermiques d'un matériau constitue la première étape pour comprendre son comportement face aux différentes conditions climatiques avant son utilisation en conditions réelles. Les propriétés thermiques et hydriques des échantillons déterminées dans ce projet sont présentées dans les Figures 2.11 à 2.13. SEREX, affilié au Cégep de Rimouski, est un centre collégial de transfert technologique spécialisé dans la transformation, qui explore et teste les possibilités d'innovation des produits de construction.

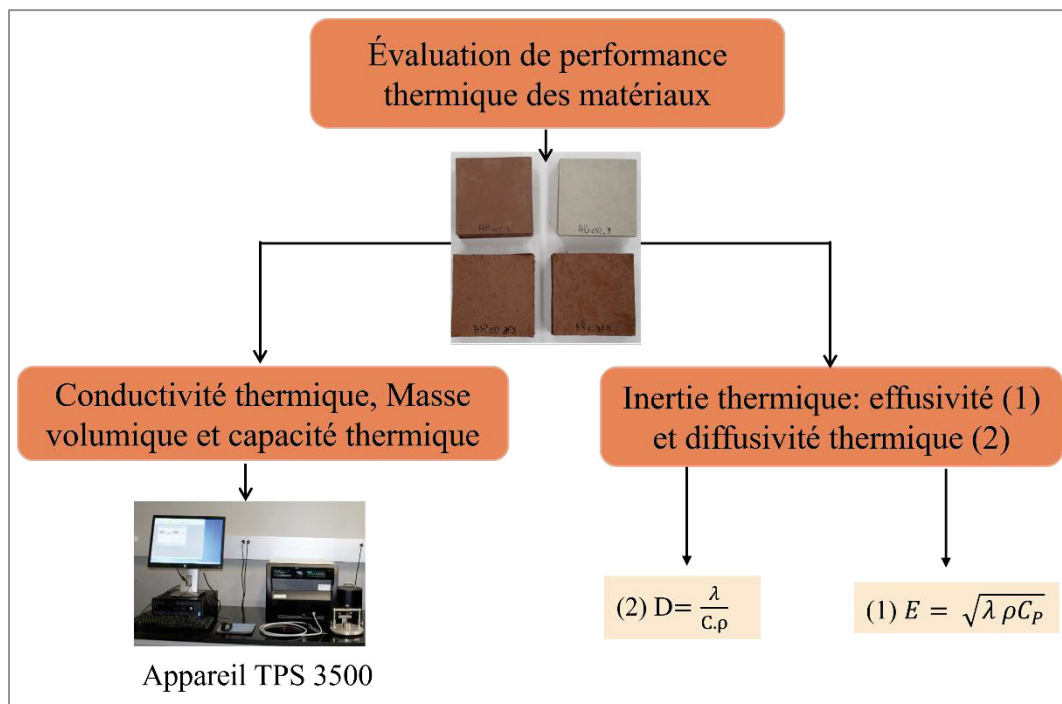


Figure 2.11 Propriétés thermiques à déterminer suivant les conditions du laboratoire au SEREX

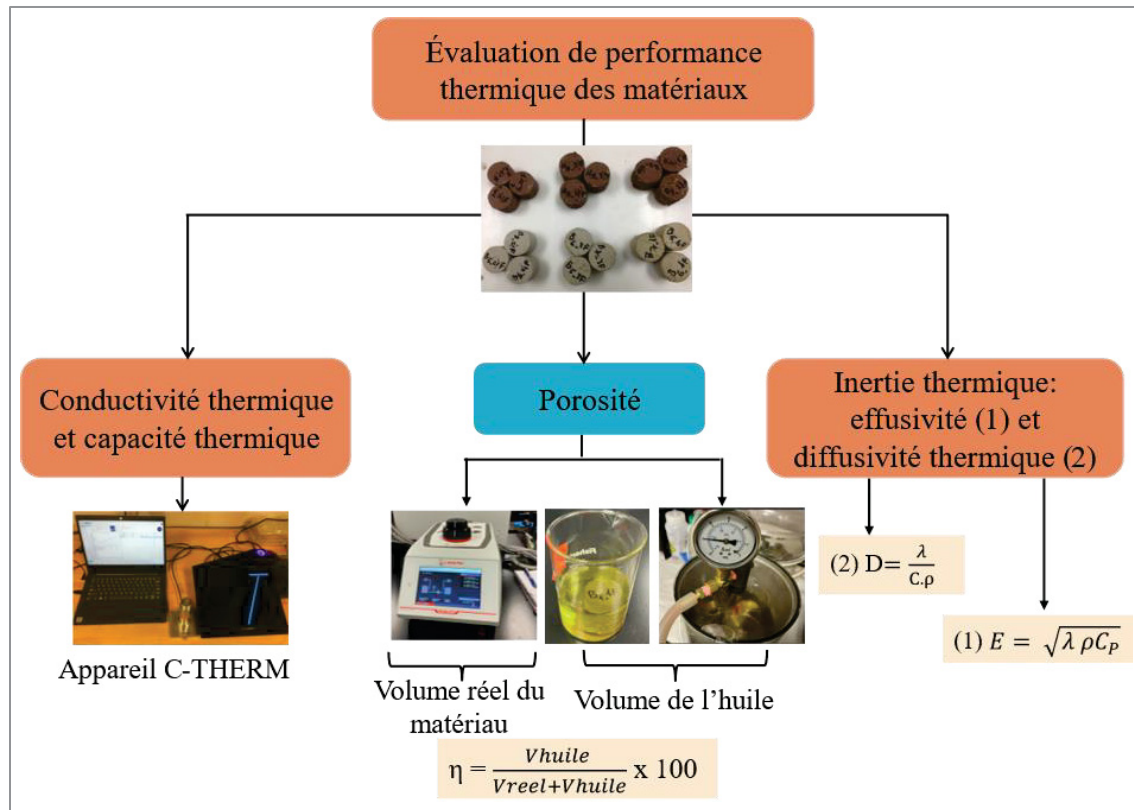


Figure 2.12 Propriétés thermiques et porosité à déterminer suivant les conditions du laboratoire à l'ÉTS

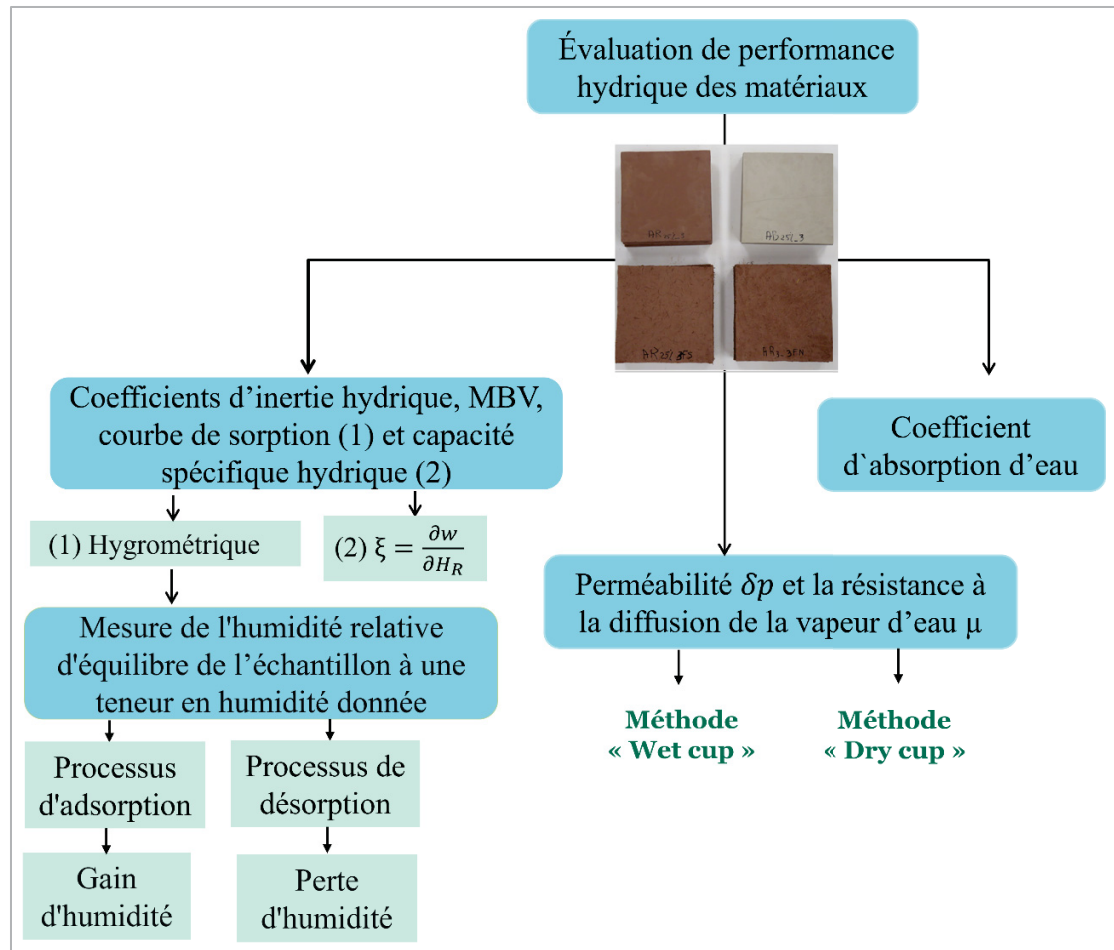


Figure 2.13 Propriétés hydriques à déterminer au SEREX

2.2.5.1 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques ont été mesurées à l'aide de deux méthodes. La première méthode a été réalisée avec l'appareil TPS 3500 (Hot Disk) conformément aux directives de la norme ASTM C518 (ASTM C518-21, 2021). Cette méthode repose sur la technique des sources planes transitoires (TPS-Transient Plane Source) et permet de déterminer simultanément la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique. Par la suite, l'effusivité thermique est calculée en utilisant l'Équation 2.6.

$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (2.6)$$

Avec E est l'effusivité thermique en $J/(m^2.K.s^{1/2})$, λ est la conductivité thermique en $W/(m.K)$, ρ est la masse volumique en kg/m^3 et C_p la capacité thermique spécifique en $J/(kg.K)$. Avant de réaliser les tests, les échantillons de 25,4 cm x 25,4 cm x 2,54 cm ont été conditionnés à 50 % HR à 23 °C. La Figure 2.14 présente l'appareil de mesure TPS 3500 et quelques échantillons d'essai.



Figure 2.14 Appareil TPS 3500 et échantillons d'essai au SEREX

La deuxième méthode a été réalisée en utilisant l'instrument de mesure C-Therm conformément à la norme ASTM D7984 (ASTM D7984, 2021). Avec cette méthode, la conductivité thermique et l'effusivité thermique ont été mesurées, tandis que la chaleur spécifique et la diffusivité thermique ont été obtenues par calcul en utilisant les Équations 2.7 et 2.8.

$$D = \frac{\lambda^2}{E^2} \quad (2.7)$$

$$C_p = \frac{\lambda}{D \cdot \rho} \quad (2.8)$$

Pour cette méthode, des échantillons cylindriques de dimensions 43 mm de hauteur et 36 mm de diamètre ont été utilisés. Afin d'observer l'influence de l'humidité sur les propriétés thermiques des échantillons, les mesures ont été effectuées en trois étapes :

1. Séchage des échantillons à l'air ambiant avec une humidité relative d'environ 50 % ± 10 % HR et une température d'environ 23 ± 2 °C ;
2. Séchage à 105 °C dans une étuve ;

3. Conditionnement à 75 ± 5 % d'humidité relative et à une température de 23 ± 1 °C pendant 48 heures.

Pour obtenir une humidité relative de 75 % HR, de l'eau a été saturée avec du sel de chlorure de sodium (NaCl) et placée dans un récipient hermétique. Le processus de conditionnement pour les trois étapes est illustré dans la Figure 2.15. Avant de commencer les essais, les échantillons ont été aplanis à l'aide de papier abrasif. Ensuite, la machine C-Therm a été connectée au logiciel Trident et étalonnée avant de commencer les tests. Pour ce faire, un échantillon de référence, le Pyrex, a été utilisé et mis en contact avec le capteur MTPS en utilisant de l'eau distillée comme élément de contact entre le capteur et le Pyrex. Ce calibrage est crucial pour ajuster l'appareil avant les essais. Enfin, pour optimiser le contact thermique entre les échantillons et le capteur, une pâte thermique a été appliquée sur la surface de contact.

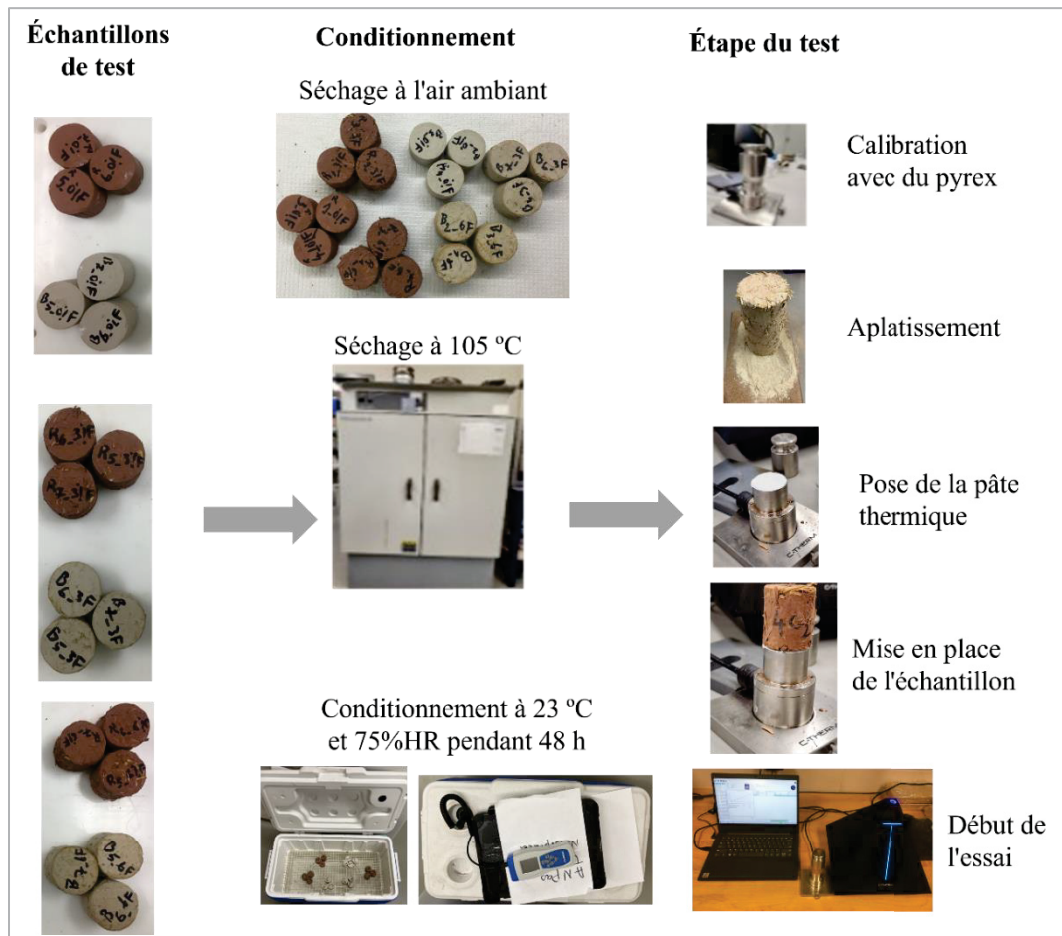


Figure 2.15 Protocole de mise en œuvre pour la mesure des propriétés thermiques

2.2.5.2 Détermination de la porosité

La porosité ouverte des échantillons d'argile et de torchis a été évaluée par la méthode de pycnomètre à gaz combinée à la méthode d'essai à l'huile non mouillante. La méthode de pycnomètre à gaz permet de déterminer le volume et la masse volumique de la matière solide des échantillons. Quant à la méthode d'essai à l'huile, elle est réalisée selon les directives de la norme NF ISO 5017 (NF ISO 5017, 2013) et permet de déterminer le volume des vides accessibles des échantillons.

Le principe de fonctionnement consiste à placer les échantillons dans l'huile sous une hotte aspirante durant 24 heures afin de saturer les pores accessibles d'huile, tout en éliminant l'air présent dans les échantillons. Ensuite, les échantillons ont été retirés de l'huile et pesés pour déterminer le volume des pores. La porosité ouverte des échantillons a été calculée en utilisant l'Équation 2.11, en connaissant le volume total de l'échantillon et le volume des pores qui représente le volume de l'huile absorbée par l'échantillon. La masse des pores est déterminée comme étant la différence entre la masse totale et la masse de la matière solide de l'échantillon ($m_{réelle}$) (Équation 2.9). Le volume d'huile a été calculé en fonction de la masse volumique d'huile et de la masse des pores (Équation 2.10). Le protocole de mise en œuvre de cet essai est illustré dans la Figure 2.16, dont le volume réel représente le volume de la matière solide.

$$m_{pores} = m_{totale} - m_{réelle} \quad (2.9)$$

$$V_{pores} = \frac{m_{pores}}{\rho_{huile}} \quad (2.10)$$

$$n = \frac{V_{pores}}{V_{pores} + V_{réelle}} \times 100 \quad (2.11)$$

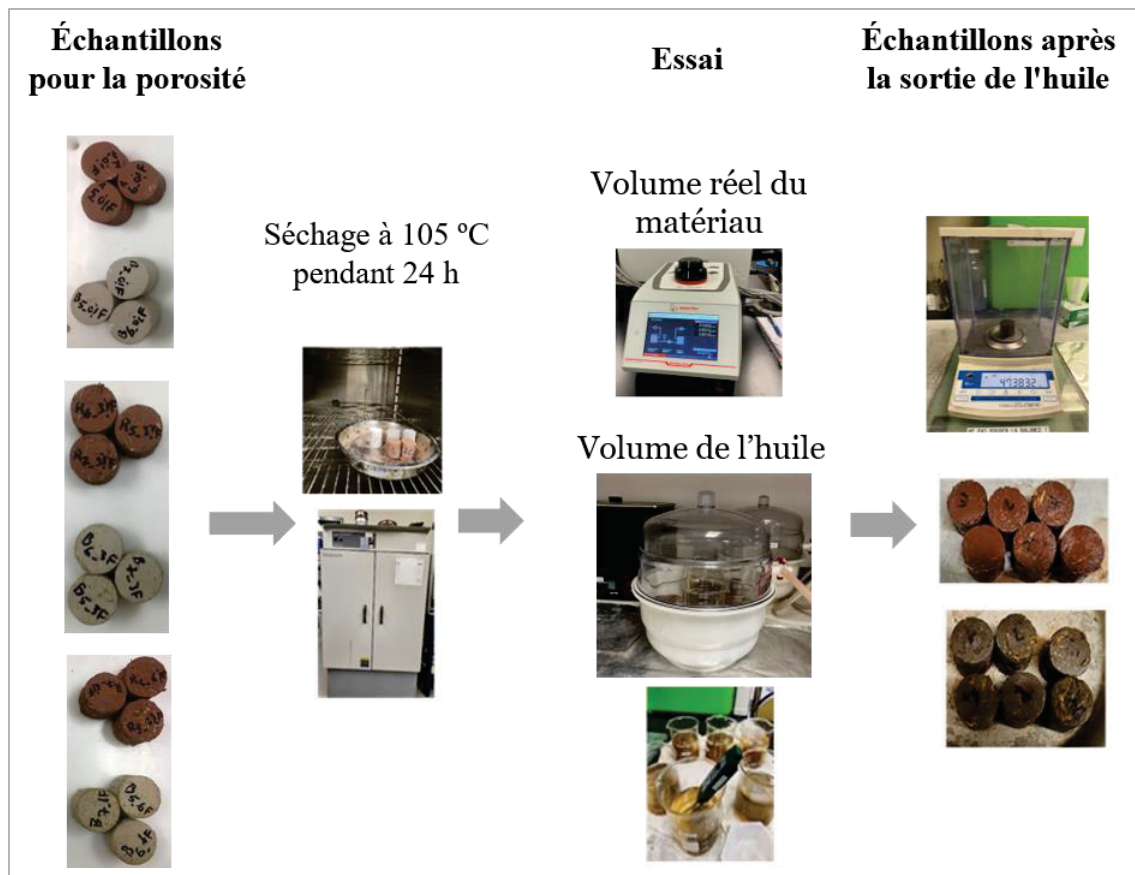


Figure 2.16 Protocole pour la mesure de la porosité ouverte

2.2.5.3 Propriétés hydriques

Les propriétés hydriques des échantillons en argile et en torchis sans ciment mesurées sont les coefficients d'absorption d'eau (α_{mat}), la perméabilité à la vapeur d'eau (δ), la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (μ), la valeur tampon d'humidité expérimentale (MBV_{exp}) et les isothermes de sorption. Pour la diffusivité hydrique (Rios & O'Dwyer), l'effusivité hydrique (b_m), la profondeur équivalente de pénétration de l'humidité ($dp_{1\%}$), la capacité spécifique hydrique (ζ) et la valeur tampon d'humidité théorique (MBV_{theo}), elles ont été déterminées par calcul. Rappelons que la diffusivité hydrique et l'effusivité hydrique sont les coefficients de l'inertie hydrique.

Deux méthodes ont été utilisées pour évaluer la capacité d'absorption d'eau ou l'humidité de l'air des échantillons, conformément à la norme EN ISO 1514 (EN ISO 15148, 2016). La

première est la méthode d'absorption capillaire qui consiste à immerger partiellement les échantillons dans un bocal contenant de l'eau pendant 24 heures, tandis que l'autre méthode consiste à utiliser une solution saline de chlorure de sodium (NaCl) pour conditionner les échantillons pendant 48 heures. La variation de la masse de chaque échantillon a été mesurée par pesée à des intervalles réguliers pour déterminer la quantité d'eau ou d'humidité absorbée.

La perméabilité à la vapeur d'eau a été mesurée selon la méthode de la coupelle humide et sèche conforme à la norme ASTM E96 (ASTM E96, 2017), et les valeurs tampons d'humidité (MBV) ont été mesurées selon le protocole NORDtest (Rode et al., 2005). Pour la détermination des isothermes de sorption, la méthode de sorption dynamique de la vapeur (DVS) selon la norme ISO 12571 (ISO 12571, 2021) a été utilisée.

2.2.6 Détermination du risque de moisissure : risque de dommage

Pour estimer le temps d'apparition de moisissure sur les surfaces des échantillons, ces derniers ont été exposés à une humidité relative de 100 %. Pour ce faire, les échantillons ont été placés dans un récipient hermétiquement fermé contenant de l'eau au fond pendant deux mois et 15 jours. L'eau a été utilisée comme catalyseur pour atteindre une l'humidité relative de 100 % à l'intérieur du récipient. La Figure 2.17 illustre la méthode de l'essai expérimental.



Figure 2.17 Test de risque de moisissure

2.2.7 Microstructure de surface

Pour examiner la microstructure des échantillons d'argile et de torchis, le microscope à balayage laser Olympus LEXT OLS4100-3D a été utilisé (Figure 2.18a). Cet instrument, équipé de lentilles optiques de 5x à 100x et d'un laser de 405 nm, permet une observation précise des défauts de surface des échantillons, allant du nanomètre au micromètre. La porosité et l'homogénéité des mélanges ont été analysées sur des échantillons de 30 mm de hauteur par 36 mm de diamètre, sectionnés en deux parties, comme illustrés dans la Figure 2.18 b.

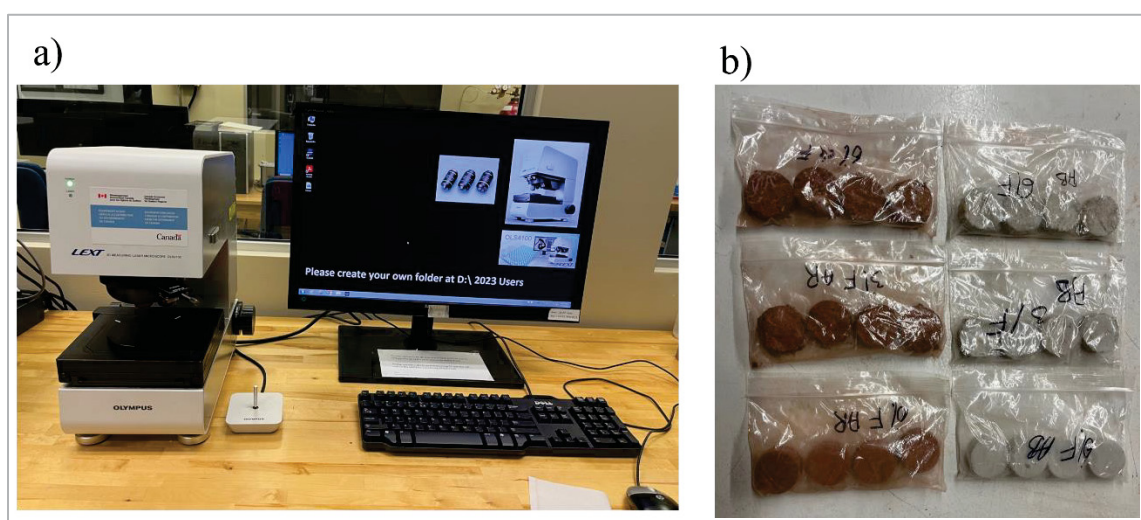


Figure 2.18 Analyse de la microstructure des échantillons, (a) microscope à balayage laser Olympus LEXT OLS4100-3D et (b) échantillons de test

2.2.8 Détermination des propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques évaluées dans cette section sont la résistance à la compression et à la flexion. La caractérisation mécanique a été réalisée sur 36 échantillons, soit trois répliques par formulation, avec 18 échantillons pour la résistance à la compression et 18 autres pour la résistance à la flexion.

2.2.8.1 Essai en compression

Les essais en compression ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de 150 mm de hauteur et 76 mm de diamètre à l'échelle de laboratoire, selon la norme ASTM C39/C39M (ASTM C39/C39M, 2020). Au préalable, les échantillons ont été soumis à des coiffes pour lisser leurs surfaces, favorisant un meilleur contact entre la surface de l'appareil d'essai et l'échantillon lors des tests. La Figure 2.19 illustre les échantillons et les étapes pour la réalisation des essais en compression.

1. Les échantillons destinés à la coiffe doivent être secs au moment de la confection de la coiffe (Figure 2.19a) ;
2. Les extrémités des échantillons doivent être complètement débarrassées de tout matériau huileux pour éviter de nuire à l'adhérence de la coiffe ;
3. Les plaques de confection des coiffes doivent être à une température de 20 à 30 °C ou plus, et les surfaces en contact avec le produit (mortier de soufre) doivent être recouvertes d'une mince couche d'huile minérale (Figure 2.19 b) ;
4. Pour la préparation du mortier de soufre, chauffer le mortier dans un fondoir (Figure 2.19c) à une température de 130 à 145 °C (température de fusion du soufre) et mélanger soigneusement le produit fondu immédiatement avant la confection de chaque coiffe ;
5. Versez rapidement le mortier de soufre sur la plaque de confection des coiffes, posée sur l'extrémité de l'échantillon à l'aide d'un outil approprié. Cette technique se fait en 5 secondes, car le mortier de soufre sèche complètement après ce laps de temps ;
6. Répétez la même technique sur l'autre extrémité de l'échantillon. Les deux coiffes sous forme de chapeau doivent avoir une épaisseur de 6 mm, correspondant à l'épaisseur du mortier de soufre sur l'échantillon (Figures 2.19c et 2.19d).

L'objectif de cette opération est d'obtenir une surface plane des deux côtés de l'échantillon, permettant ainsi à la presse d'exercer une charge uniforme sur l'échantillon lors du test. Le taux de chargement appliqué est de 0,5 kN/seconde, avec une force de départ de 1 kN et un arrêt à une force équivalente à 30 % , conformément à la norme ASTM C39/C39M (ASTM

C39/C39M, 2020). Chaque échantillon est positionné verticalement, et reçoit une pression uniforme sur sa surface supérieure et inférieure lorsque la presse est mise en marche.

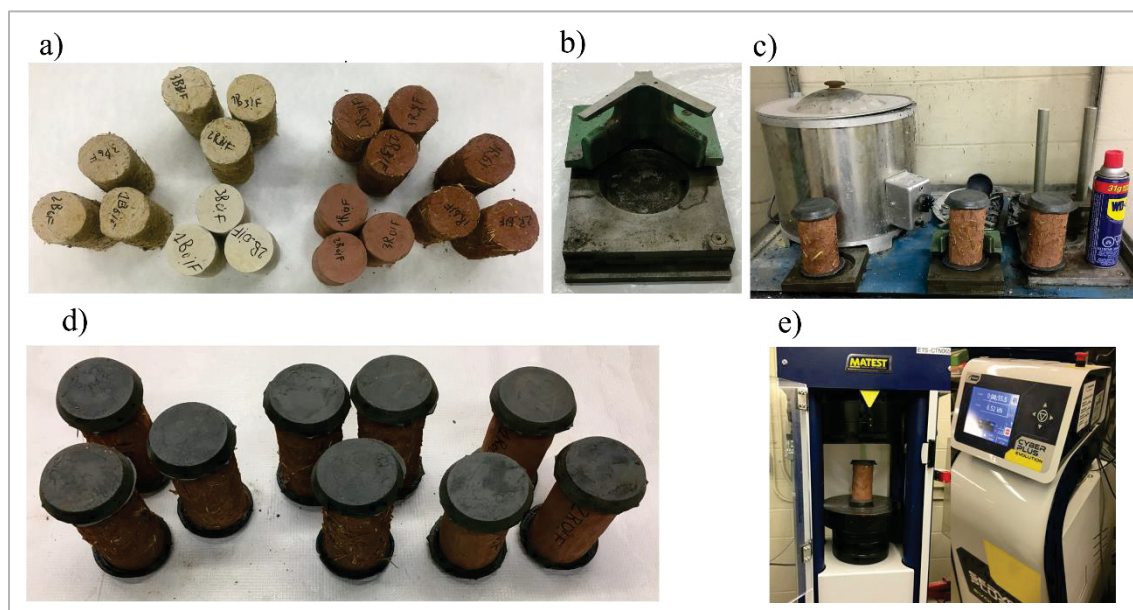


Figure 2.19 Essai en compression, (a) échantillons avant la pose du soufre, (c) appareil pour la pose de soufre, (d) Procédure d'aplanissement des surfaces et (e) appareil d'essai en compression

2.2.8.2 Essai en flexion

Un testeur manuel de résistance à la flexion de quatre points avec l'appareil ME-8236 (Figure 2.20c), possédant une cellule de charge de 50 kN, a été utilisé pour les tests de flexion selon les méthodes stipulées dans la norme (ASTM C78/C78M, 2021). L'essai consiste à déterminer la charge maximale à la rupture des échantillons placés sur quatre appuis, deux appuis supérieurs et deux inférieurs, avec une application de l'effort au milieu des deux appuis inférieurs. Une vitesse de déplacement constante d'environ 1 mm/min a été appliquée. Les échantillons sont positionnés horizontalement de telle sorte à recevoir une charge uniforme le long des deux appuis longitudinaux jusqu'au point de rupture (Figures 2.20b et 2.20c). Les dimensions des échantillons sont de 38 mm x 38 mm x 150 mm. La distance entre les appuis inférieurs est de 90 mm et celle des appuis supérieurs est de 30 mm (Figure 2.20 b). Pendant

l'essai, la charge maximale appliquée et toutes les autres données sont enregistrées au moment et après la rupture de l'échantillon.

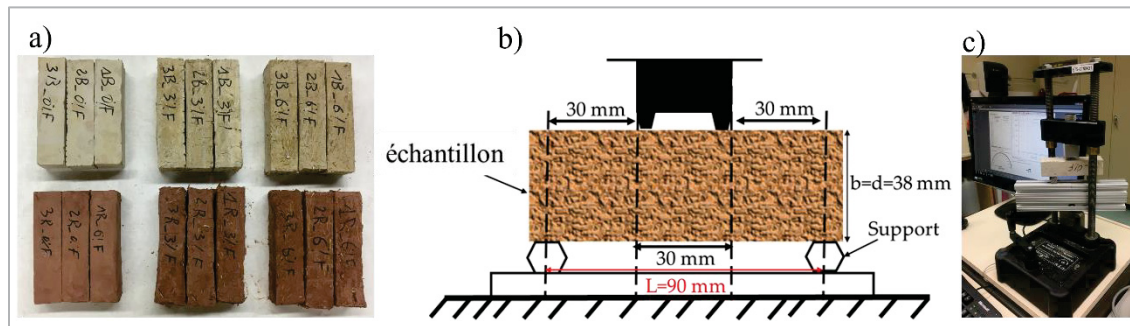


Figure 2.20 Essai en flexion, (a) échantillons, (d) Procédure pour la pose des échantillons (e) appareil d'essai en flexion

2.2.9 Mesure de l'évolution de la température dans un mini-mur

La chambre biclimatique disponible chez SEREX est le modèle EXCAL 7713-HA + 7723-HA du fabricant CLIMATS. Comme son nom l'indique, elle est composée de deux enceintes, une pour simuler des conditions intérieures en termes de température et d'humidité relative, et l'autre pour les conditions extérieures. Les deux enceintes peuvent assurer un large spectre de température et d'humidité relative allant de -35 °C à 100 °C et de 10% à 95% respectivement. Le principe de fonctionnement de la chambre biclimatique consiste à suivre le comportement thermique d'une section de mur d'environ $80\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, placée en sandwich entre les deux enceintes au moyen d'un porte-échantillon (Figure 2.21). Des sondes de température et d'humidité sont placées en surface extérieure, au cœur et en surface intérieure du mur, permettant ainsi de mesurer la température et l'humidité en chaque position des sondes. Cela permet de caractériser la performance du mur, notamment en termes de capacité d'isolation thermique et de régulation de l'humidité.

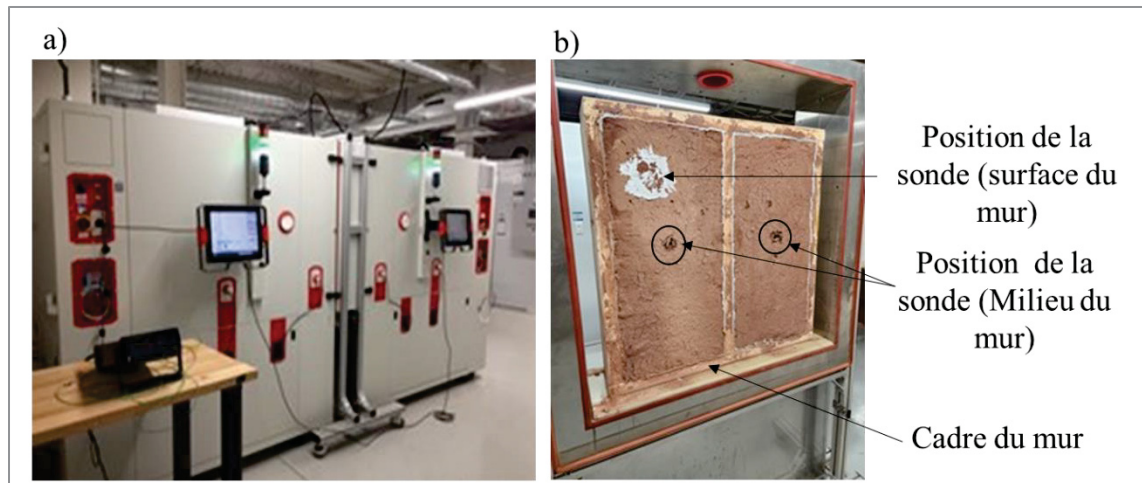


Figure 2.21 Mesure de la température et de l'humidité d'un mur en torchis de 3 % de fibre

2.2.10 Simulation numérique

L'enveloppe des bâtiments en bois/argile, que le matériau en argile soit renforcé avec de la fibre ou non, est constituée des matériaux poreux. L'enveloppe, étant séparée entre deux environnements (extérieur et intérieur), est le siège de transferts de chaleur et d'humidité. Les modes de transfert dans ces types d'enveloppes sont donc le transfert de chaleur, d'eau en phase liquide et/ou en phase vapeur (H. M. Künzle & Germany, 2012b). Ainsi, pour prédire le comportement hygrothermique des enveloppes poreuses de façon réaliste, il est nécessaire de tenir compte du couplage des transferts énergétiques et massiques (Laou, 2017b). L'impact des transferts énergétiques et massiques dans les enveloppes s'explique par le déséquilibre des flux de chaleur, qui se traduit par une variation de température à travers l'enveloppe entre l'instant t et l'instant $t + dt$. De même, un déséquilibre des flux hydriques (vapeur à l'état liquide) se traduit par une variation (stockage ou déstockage) de l'humidité à travers l'enveloppe (Figure 2.22). De plus, un déséquilibre des flux de vapeur entraîne une adsorption ou une désorption de l'eau (condensation de la vapeur) mettant en jeu la chaleur latente (L_v), qui s'ajoute au bilan thermique de l'équation de la chaleur.

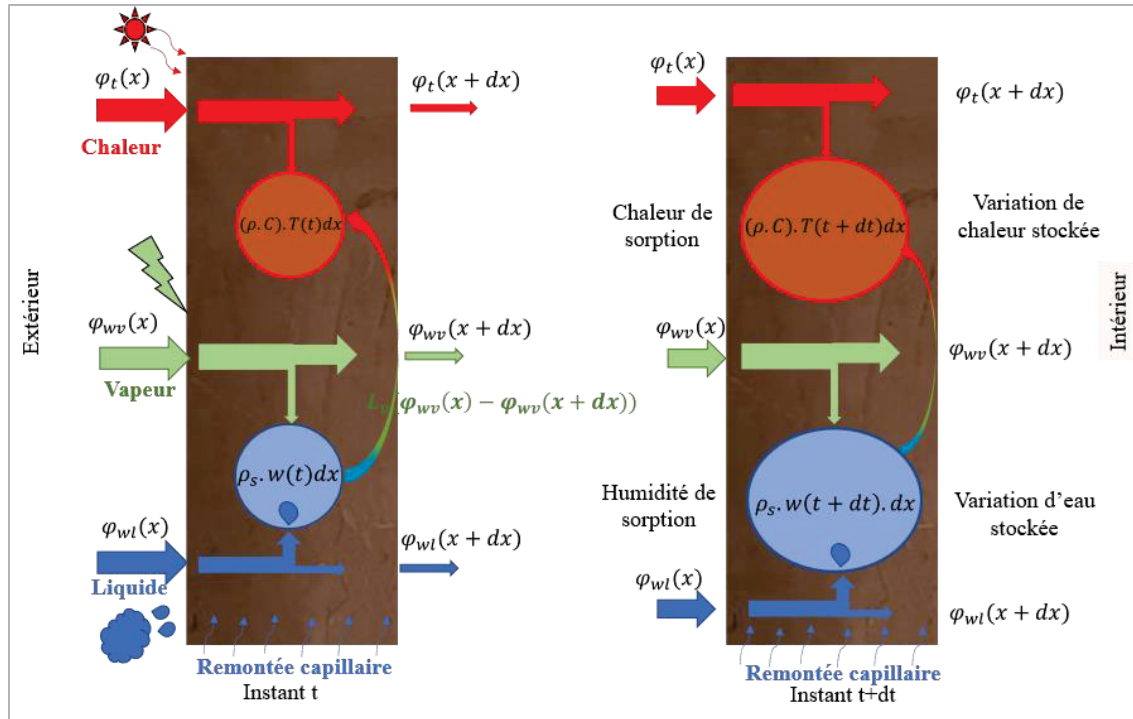


Figure 2.22 Phénomènes thermique et hydrique agissant sur une tranche infinitésimale d'une enveloppe

La simulation des transferts de chaleur et de masse est basée sur les lois inspirées des travaux de (Medjelekh, 2015b), qui considèrent le milieu poreux comme homogène. Cette approche permet de formuler les équations de transfert thermique et hydrique de l'enveloppe à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique, en prenant en compte la phase liquide (Chabriac, 2014; Laou, 2017b). Le phénomène de couplage entre l'humidité et la chaleur se réfère à l'interaction entre la température et l'humidité dans les matériaux poreux, où ces deux variables sont étroitement liées dans les processus de transfert de chaleur et de masse. Une augmentation de la température entraîne généralement une diminution de la quantité d'eau dans un matériau poreux en raison de l'évaporation, tandis qu'une augmentation de l'humidité induit une baisse de la température. Ce phénomène, fréquemment observé dans les bâtiments, peut avoir un impact significatif sur les performances hygrothermiques des matériaux de construction. La représentation du couplage entre le transfert de chaleur et de masse est illustrée dans la Figure 2.23.

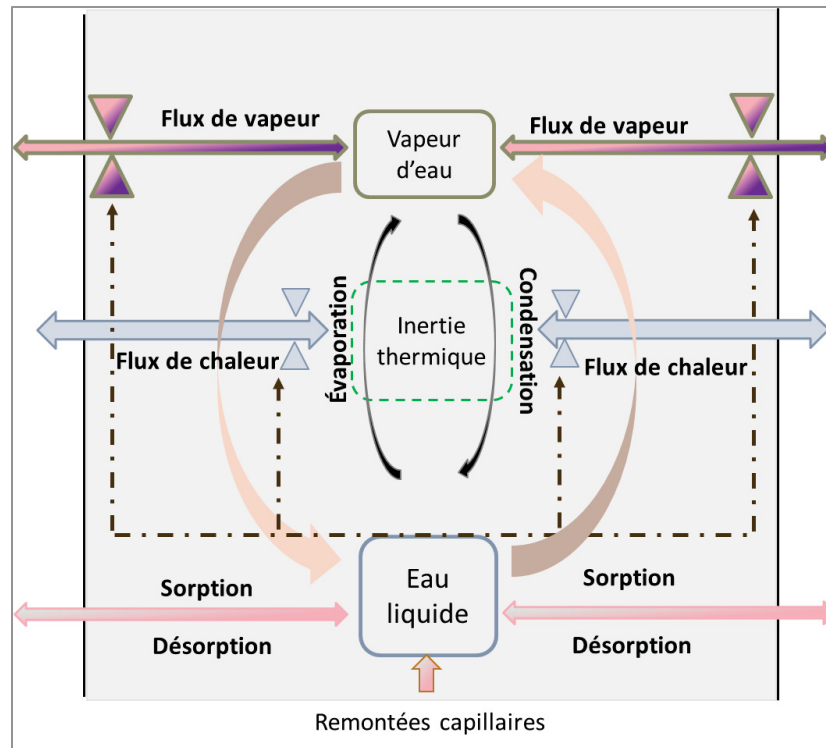


Figure 2.23 Représentation du couplage de transfert de chaleur et de masse.
Tirée de Chabriac (2014, p.74)

2.2.10.1 Bilan énergétique et massique

Dans cette étude, deux logiciels de simulation ont été utilisés pour évaluer la performance hygrothermique de huit murs en torchis, trois murs monocouches et six murs multicouches unidimensionnels. Un mur en argile a été utilisé comme mur de référence.

Le logiciel WUFI Pro 6.7 simule le processus d'accumulation de l'humidité dans les murs pour évaluer le comportement hygrothermique des deux matériaux en torchis (torchis avec 3 % et 6 % de fibres), face au climat extérieur. Il prend en compte les précipitations, la pluie battante, la nébulosité, les remontées capillaires dans la structure des murs et l'orientation du mur pour le pire scénario possible. Cela est très pertinent pour une évaluation de l'évolution de la température intérieure et de l'humidité à travers les murs en torchis, en vue de leur application dans différentes zones climatiques. Le modèle utilise l'équation couplée de chaleur et de masse établie par Kunzel et utilisée par (Kaboré et al., 2024) dans leurs travaux. Le comportement

hygrothermique des murs en torchis, en enduit/torchis/enduit, en bois/torchis/bois et en enduit/bois/torchis/bois/enduit a été évalué. Les deux derniers systèmes de mur sont considérés comme des coupes transversales d'un mur en torchis avec une structure en ossature de bois en épicea. Les pertes ou gains d'énergie, ainsi que les flux d'humidité à travers les murs par remontée capillaire, ont également été analysés.

Le logiciel COMSOL Multiphysics 6.1 est l'autre logiciel utilisé, qui ne prend pas en compte les précipitations, la pluie battante et la nébulosité. Il a été utilisé pour évaluer l'influence de l'absence de nébulosité, de pluie et de non-prise en compte de l'orientation des murs monocouches unidimensionnels sur leur performance hygrothermique. L'objectif de l'utilisation de ces deux modèles est d'évaluer l'influence de la pluie battante, de la nébulosité, de l'humidité par remontée capillaire et de l'orientation sur la performance hygrothermique des différents murs en torchis. Ils permettent également d'évaluer la capacité du mur à réguler ou non la température intérieure en l'absence de pluie et de nuages.

2.2.10.2 Modélisation des transferts de chaleur et d'humidité selon chaque logiciel

Pour établir le bilan énergétique et massique, les hypothèses mises en place sont conformes aux hypothèses utilisées par (Bendouma, 2018b; Bennai, 2017; Laou, 2017b) dans leurs travaux afin de simplifier la formulation du modèle mathématique. Les modèles sont donc développés en se basant sur les hypothèses suivantes :

- ✓ La phase gazeuse, composée de vapeur d'eau et d'air, obéit à la loi des gaz parfaits avec les constantes thermophysiques de la phase liquide considérées comme celles de l'eau pure ;
- ✓ L'isotherme d'absorption est supposée unique en considérant que la surface d'échange ne peut absorber que la vapeur d'eau ;
- ✓ Les réactions chimiques et l'effet de la gravité dans le matériau sont négligeables ;
- ✓ La paroi est traversée par des flux thermiques et d'humidité uniformes sur toute la surface de l'enveloppe ;
- ✓ Les différentes phases solide-liquide-vapeur sont en équilibre thermodynamique ;

- ✓ L'influence des résistances thermiques correspondant aux joints entre bois et argile est négligeable;
- ✓ La phase solide est indéformable et isotrope;
- ✓ Les fluides absorbés dans le milieu poreux sont incompressibles (eau liquide essentiellement) et continus;
- ✓ Le milieu poreux est considéré comme un milieu continu, homogène et indéformable.

Les équations de transfert couplé de chaleur et de masse utilisées pour la simulation WUFI Pro 6.7 sont données par les Équations 2.12 et 2.13.

$$\frac{\partial w}{\partial H_R} \cdot \frac{\partial H_R}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla H_R + \delta_p \nabla \cdot (H_R P_{sat})) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L_v \nabla \cdot (\delta_p \cdot \nabla (H_R P_{sat})) \quad (2.13)$$

Avec w la teneur en eau (k/kg), D_ϕ le coefficient de diffusion hydrique ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$), H_R l'humidité relative (%), P_{sat} la pression de vapeur saturante (Pa), δ_p la perméabilité à la vapeur d'eau ($\text{kg/m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$) et T la température ($^\circ\text{C}$).

La courbe de sorption de chaque matériau a été ajustée en fonction des valeurs de la teneur en eau mesurées. Le modèle GAB a été utilisé pour déterminer les coefficients nécessaires à la simulation numérique sur COMSOL Multiphysics 6.1. Les Équations 2.14 et 2.15 représentent les Équations de la chaleur et de masse (Colinart, Bendouma, & Glouannec, 2019) et l'Équation 2.16 représente le modèle GAB. Ces Équations sont également présentes dans le chapitre 6.

$$\rho_s \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = -\nabla \cdot (- (D_v^{HR} + D_l^{HR}) \nabla HR - D_v^T \nabla T) \quad (2.14)$$

$$C_{mat} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(-\lambda \nabla T) - \rho_s \cdot c_{p_l} \cdot T \cdot \frac{d(Wm)}{dt} + \left(D_v^{HR} \frac{d(HR_x)}{dx} + D_v^T \frac{d(T_x)}{dx} \right) \cdot Lv \quad (2.15)$$

$$w_m = \frac{(w_{GAB} \cdot C_{GAB} \cdot K_{GAB} \cdot HR)}{((1 - K_{GAB} \cdot HR)(1 - K_{GAB} \cdot HR + C_{GAB} \cdot K_{GAB} \cdot HR))} \quad (2.16)$$

Avec D_v^{HR} , D_l^{HR} et D_v^T sont les coefficients de diffusion de la vapeur d'eau, de migration de l'eau liquide et de thermo-diffusion de la vapeur d'eau, respectivement, dont les expressions sont présentées au chapitre 6. La variable ρ_s est la masse volumique sèche du matériau (kg/m^3), C_{mat} est la capacité thermique du matériau ($\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$), λ est la conductivité thermique ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), D_v est le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau (m^2/s), Lv est la chaleur latente de vaporisation constante et égale à 2500 kJ/kg, c_{p_l} est la chaleur spécifique de l'eau liquide ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) et $\frac{\partial w}{\partial HR} = \zeta$ est la capacité spécifique hydrique (kg/kg).

2.2.10.3 Conditions aux limites et données climatiques

Les échanges de chaleur et d'humidité sur les surfaces extérieures (en $x=0$) et les surfaces intérieures (en $x=L$) sont illustrés par la Figure 2.24. Les deux surfaces, extérieures et intérieures de la paroi, sont exposées à des transferts de chaleur par convection, évaporation ou condensation, et rayonnement à grandes ou courtes longueurs d'onde. Le bilan énergétique et de masse de la surface extérieure en $x=0$ a été établi au chapitre 6 en utilisant les données météorologiques de chaque ville d'étude, tandis que celui de la surface intérieure en $x=L$ est déduit des conditions intérieures (température, humidité et pression atmosphérique).

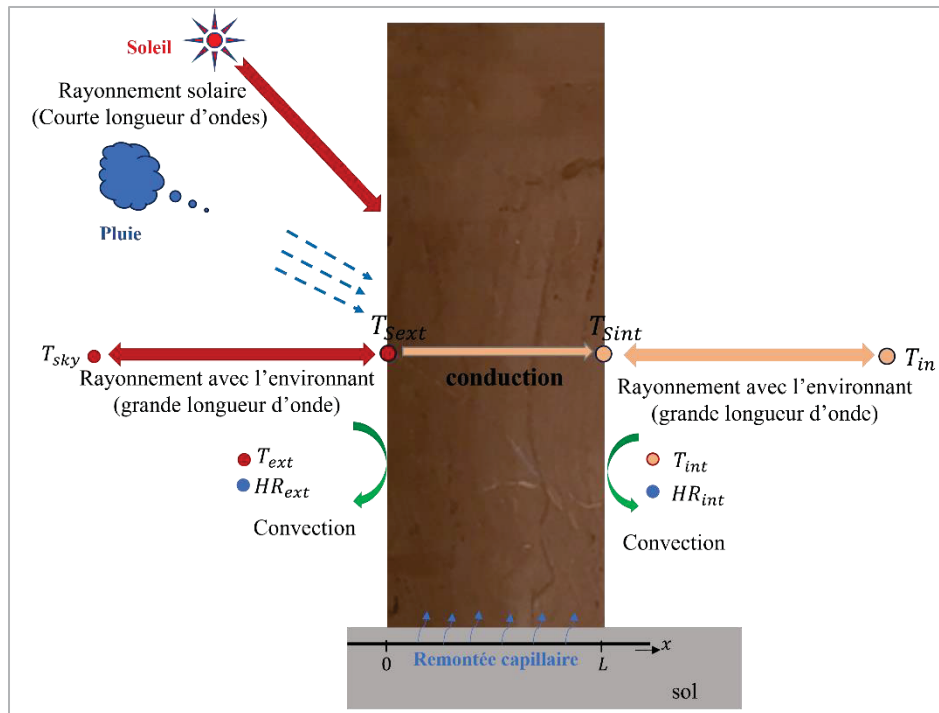


Figure 2.24 Échange entre les surfaces extérieure et intérieure d'un mur

Les paramètres climatiques utilisés sont présentés dans le Tableau 2.2, et la simulation numérique a été réalisée en utilisant les données climatiques de huit villes illustrées par la Figure 2.25, afin d'étendre l'utilisation de ces matériaux dans une vaste zone en construction. Les villes ont été regroupées en deux zones, une zone chaude pour les villes à températures élevées et une zone tempérée et froide pour les villes à température basses (Tableau 2.3).

Tableau 2.2 Paramètres climatiques utilisés pour les deux logiciels

	Paramètres	Unité
WUFI PRO 6.7 et COMSOL Multiphysics 6.1	Température	°C
	Humidité relative	%
	Direction du vent	°
	Vitesse du vent	m/s
	Rayonnement solaire global	W/m ²
	Rayonnement solaire direct	W/m ²
	Rayonnement solaire diffus	W/m ²
	Pression atmosphérique	Pa
Éléments de plus pour la simulation WUFI PRO 6.7	Précipitation	Litre/m ² .h
	Indice des nuages (nébulosité)	-
	Facteur d'absorption d'eau de pluie	-

Tableau 2.3 Villes à l'étude

	Villes	Zone climatique	Pays
Zone tempérée et chaude	Djibouti	Désertique	Djibouti
	Johannesburg	Subtropicale	Afrique du Sud
	LeCaire	Désertique chaude	Égypte
	Abidjan	Équatoriale	Côte d'Ivoire
Zone tempérée et froide	Montréal	Continental humide	Canada
	Paris	Tempérée	France
	Rennes	Océanique	France
	Reno	Semi-aride	USA



Figure 2.25 Présentation des villes étudiées sur la carte

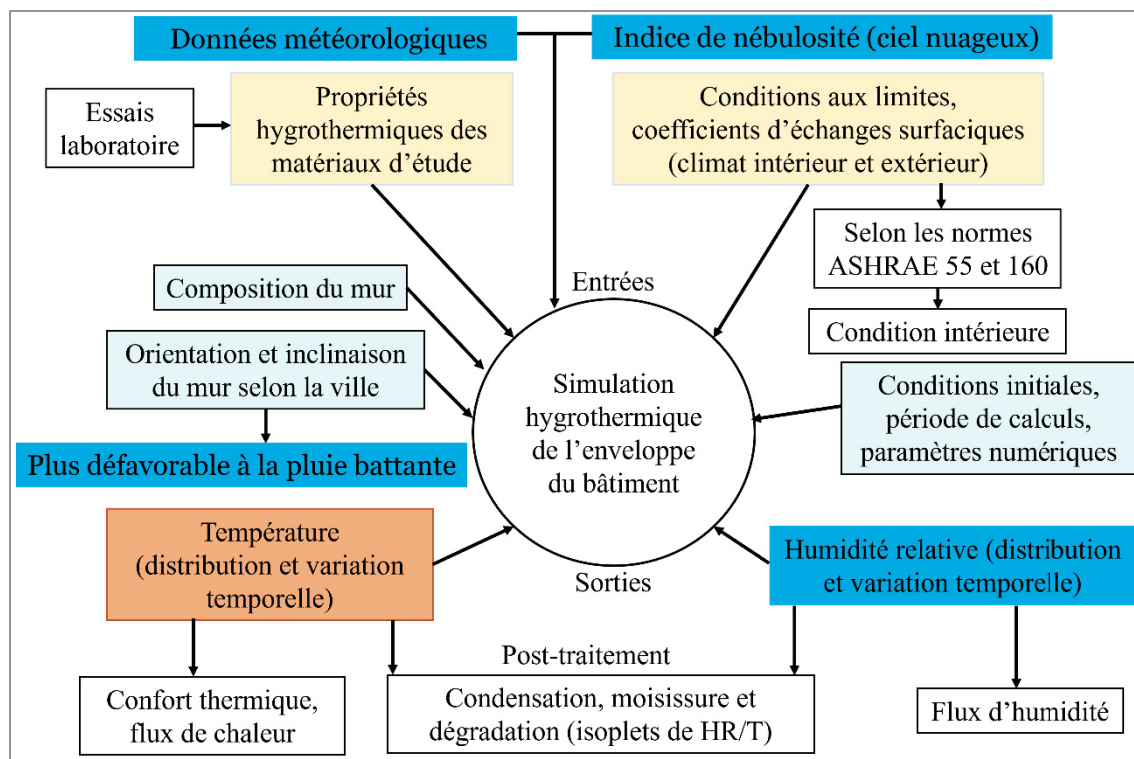


Figure 2.26 Méthodologie pour la simulation numérique utilisant les données externes

2.2.11 Calcul de l'écart-type

Les écarts-types de chaque essai expérimental ont été calculés à partir des résultats de trois répétitions du même mélange ou plus. Ensuite, une analyse statistique à l'aide de l'ANOVA à facteur unique et du t-test a été réalisée, et les moyennes individuelles ont été comparées pour identifier les différences significatives à $p < 0,05$, c'est-à-dire $p < \alpha\text{-value} = 0,05$, soit un intervalle de confiance de 95 %.

2.3 Planification des activités de recherche

L'échéancier, illustré sous forme d'un diagramme de Gantt (Tableau 2.4), résume les tâches du projet de doctorat qui a débuté à l'été 2020. Le processus a commencé par la caractérisation des matières premières utilisées pour fabriquer les échantillons, une étape cruciale pour le début du projet. La pandémie de COVID-19 a restreint l'accès aux laboratoires, affectant la recherche des ratios adéquats des matières premières pour la réalisation des échantillons

CHAPITRE 3

IMPROVED INSULATION WITH FIBRES IN HEAVY COB FOR BUILDING WALLS

Aguerata Kabore and Claudiane M. Ouellet-Plamondon*

Department of Construction Engineering, École de technologie supérieure, Université du Québec, 1100 Notre-Dame West, Canada.

Article publié dans « Industrial Crops & Products », mai 2024

3.1 Avant-propos

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la recherche sur les matériaux de construction naturels, en particulier le torchis, utilisé depuis des siècles pour ses propriétés écologiques. Ce travail a été motivé par la nécessité de trouver des alternatives durables aux matériaux de construction conventionnels, souvent coûteux et énergivores. Les résultats de l'objectif spécifique 1 sur la formulation des deux matériaux pour la technologie de construction en bois/argile renforcée de fibres végétales ont permis d'identifier les rapports eau/argile et eau/fibre appropriés pour la formulation des échantillons en torchis. Des échantillons sans fissuration ont été réalisés par la suite et leurs propriétés thermiques ont été déterminées et présentées dans ce chapitre.

3.2 Résumé

La construction en terre promet de réduire l'impact du dioxyde de carbone des matériaux de construction, et davantage d'investigations sont nécessaires pour définir les régions où ces matériaux sont adaptés. Ce travail vise à formuler des matériaux argileux renforcés avec des fibres végétales de manière traditionnelle afin de déterminer leurs propriétés thermiques pour des applications dans les structures modernes à ossature bois. L'objectif principal est de fabriquer du torchis en utilisant différents types d'argile, sans tenir compte du ratio argile/sable, et d'obtenir un matériau de torchis solide caractérisé par l'absence de fissures, un faible retrait

volumétrique et des propriétés thermiques similaires à celles d'un torchis normal. Les limites d'Atterberg de chaque argile et le coefficient d'absorption des fibres ont été déterminés avant la fabrication des échantillons. La formulation de 93 échantillons a été réalisée avec 15, 20, 25 et 30 % d'eau et 0 %, 3 % et 6 % de fibres de blé en masse. Par la suite, 18 échantillons produits avec 25 % d'eau et 0 %, 3 % et 6 % de fibres de blé en masse ont été retenus et utilisés pour les tests. La conductivité thermique (λ), la capacité thermique spécifique (C_p), la diffusivité thermique (D) et l'effusivité thermique (E) ont été mesurées après le séchage des échantillons. L'étude a montré une amélioration des propriétés thermiques avec l'augmentation des fibres dans les mélanges, conduisant à une amélioration significative des performances thermiques. Les échantillons d'argile et de torchis ont montré une conductivité thermique (λ) de 1,16 W/(m K) et de 0,55 à 0,2 W/(m K), respectivement. Une augmentation de la capacité thermique a été observée avec les échantillons contenant des fibres, tandis que la diffusivité thermique et l'effusivité thermique diminuaient avec l'augmentation des fibres dans les mélanges. Des tests ANOVA à facteur unique ont été utilisés pour montrer qu'il n'y avait pas de différence significative entre les propriétés thermiques des échantillons d'argile rouge et beige. Notre observation soutient l'idée que l'argile beige peut être utilisée comme matériau de finition pour les murs en torchis formulés avec de l'argile rouge.

3.3 Abstract

Earth construction promises to reduce the carbon dioxide impact of building materials, and more investigations are needed to define regions where the latter are suitable. This work aims to formulate clay materials reinforced with plant fibres in a traditional manner to determine their thermal properties for applications in modern wood-frame structures. The main objective is to manufacture cob using different types of clay, disregarding the clay/sand ratio, and to achieve a solid cob material characterized by an absence of cracks, low volumetric shrinkage, and thermal properties like those of a normal cob. The Atterberg limits of each clay and the absorption coefficient of the fibres were determined before the samples were made. Formulation of 93 samples was carried out with 15, 20, 25, and 30% water and 0%, 3%, and 6% wheat fibers by mass. Subsequently, 18 samples produced with 25% water and 0%, 3%, and 6% wheat fibres by mass were retained and used for testing. The thermal conductivity (λ),

specific heat capacity (C_p), thermal diffusivity (D), and thermal effusivity (E) were measured after sample drying. The study showed an improvement in thermal properties with increasing fibers in the mixtures, leading to a significant improvement in thermal performance. The clay and cob samples showed a thermal conductivity (λ) of 1.16 W/(m K) and 0.55-0.2 W/(m K), respectively. An increase in thermal capacity was observed with the samples containing fibre, while the thermal diffusivity and thermal effusivity decreased with increasing fibres in the mixtures. Single-factor ANOVA tests were used to show no significant difference between the thermal properties of red and beige clay samples. Our observation supports the idea that beige clay can be used as a finishing coating material for cob walls formulated with red clay.

Keywords: Thermal properties, wheat fibres, clay/fibres, cob, clay panels, wood structure, sustainable buildings.

3.4 Introduction

Eco-materials are promising alternative materials for the construction sector, but additional data are needed to define how they can be reintroduced into certain regions. Earth materials present several advantages, including availability, low energy consumption during production and use (and at the end of their life), and the possibility of being recycled, in contrast with synthetic and non-biodegradable materials (Aubert et al., 2022; Laborel-Préneron, Magniont, & Aubert, 2018; Sathish, Jagadeesh, Rangappa, & Siengchin, 2022). These materials, which have been recognized in traditional construction for thousands of years, are currently experiencing a resurgence of interest due to their low environmental impact. Approximately 15% of the architectural works appearing on the UNESCO World Heritage List are built using earth (Saidi, Cherif, Zeghmami, & Sediki, 2018; Zeghmami & Sediki, 2016). The wood/cob construction system is an ecological and sustainable method. Compared to traditional clay structures, this type of construction increases the lifespan of the building thanks to the wood frame used as a load-bearing structure (Tomovska & Radivojević, 2017; Volhard, 2016). The wood frame provides better resistance to structural stresses, such as soil movements and seismic loads, which allows the building to remain strong and stable over a longer period. Earth material mixed with plant fibres is carbon-neutral and contributes to the fight against climate

change. This mixture holds significant potential for use in regions with high demand for housing and cooling, particularly in rural Africa. With a housing deficit of approximately 51 million units and a rapidly growing population, the African continent could benefit greatly from this innovative solution (Bah et al., 2018b). Using available low-carbon or carbon-neutral materials in construction could reduce the global warming potential and energy demand of buildings by providing suitable, sustainable, and environmentally friendly housing. The use of these materials could also help to address the housing deficit, especially in regions where housing is scarce or inadequate. The thermal properties of earth building materials foster the self-regulation of indoor humidity and temperature by reducing the use of air conditioning and heating systems (Meyer, 2010a). Wood/clay walls are soundproof, termite-resistant, and chemical-free, and the wood frame provides good seismic resilience for the building structure (Meyer, 2010a; Tomovska & Radivojević, 2017). However, earthen materials are criticized for their sensitivity to water and weathering, which makes them unsustainable, and explains their limited thermal performance (Lahbabi, Bouferra, Saadi, & Khalil, 2024). Current thermal regulations require the use of efficient insulating materials to limit energy needs during the use phase of the building. The building envelope design takes advantage of the thermal inertia of these materials. All these have led to the study of several techniques, such as mechanical stabilization (where earth materials are compressed by machines to obtain earth blocks), chemical stabilization (where cement is mixed with clay earth), stabilization by firing unstabilized or chemically stabilized earth blocks, and physical stabilization (in which clay earth is mixed with plant or organic fibres). Nevertheless, it should be noted that mechanical, chemical, and baking stabilization improve mechanical properties at the expense of thermal properties (B. Ouedraogo, Palm, Ouedraogo, Bathiebo, & Kam, 2016). Physical stabilization using plant fibres is the only method that improves the thermal properties of earth materials (B. Ouedraogo et al., 2016). Nevertheless, it is important to consider factors such as the type of fibres, fibre size, fibre dosage, and material manufacturing technique. These factors make use of the manufacturing technique more complex for producing materials on construction sites. Nevertheless, the key concept of an optimized building envelope relies on the thermal properties and composition of the envelope materials (Bekkouche et al., 2014).

Earth composite materials reinforced with plant fibres remain a biodegradable material that can easily meet thermal performance requirements if used appropriately. As shown in the literature, the addition of plant fibres to the earth-clay mixture improves the thermal behavior (Laborel-Préneron et al., 2018; Millogo, Morel, Aubert, & Ghavami, 2014). Therefore, the implementation of wood/cob walls meets sustainable development objectives. These types of walls are durable, recyclable, and reusable at the end of their life. Cob materials are traditionally manufactured without industrial processing and used on-site to fill the structures of wood-frame buildings (Gomaa, Vaculik, Soebarto, Griffith, & Jabi, 2021; Keefe, 2012; Quagliarini, Stazi, Pasqualini, & Fratolocchi, 2010). However, their use in wood construction is hampered by a lack of data on their thermal properties such as thermal conductivity, thermal effusivity, thermal diffusivity, and specific heat. This data needs to be available for the thermal performance of the wood/clay mixed fibre envelope to be assessed. Existing constructions are made of rammed earth, compressed brick, and adobe, which are the materials that have been most extensively studied in the literature (Muazu & Alibaba, 2017a; Patenaude, 2010; Spišáková & Mačková, 2015; Waters, Bernazzani, & Jao, 2016). Cob, which is a carbon-neutral eco-material, has not been the subject of many studies, and studies on this type of construction to date have focused on existing buildings.

The current challenge is to identify an alternative cob formulation that could be easily reformulated on construction sites, as this would diversify the material supply in the construction market. Furthermore, it would contribute to mitigating housing scarcity and reducing energy consumption in the building sector (Alassaad, Touati, Levacher, El Mendili, & Sebaibi, 2022; Alassaad, Touati, Levacher, & Sebaibi, 2023; Gounni & Louahlia, 2019; Touati et al., 2023). In Africa and other regions, red clay is commonly used as filler material, while white and beige clay are applied for finishing. For example, the Winchester Hampshire Amesbury adobe building was finished in white clay, the multi-family and single-family dwellings built by Colombian architects Mauricio Sanchez and Dario Angulo were finished in beige clay, and 1200 adobe homes were finished in white clay in New-Gouma (Maniatidis & Walker, 2003; Paulus, 2015b). In the Middle East, Latin America, China, and India, earthen constructions exist in the form of vernacular buildings (Anger, 2011; Paulus, 2015b). In Europe, old earthen buildings are still used for housing (Hall & Swaney, 2012). Further data

on the thermal performance of these materials and of cob is needed to facilitate their use in other parts of the world.

Research on earth and fibre building materials has been conducted under various conditions in previous research. Moroccan researchers have produced two reinforced materials with 2% and 4% sisal fibre for construction (Ouakarrouch et al., 2020). For the fabrication of the test samples, the fibres were washed with water, dried, and cut to a length of 2 cm before being used. The researchers discovered that incorporating sisal fibres in the clay reduced thermal conductivity by 11.2%, while thermal diffusivity was reduced by 8%. The specific heat of the composite was also increased. Despite the improved thermal properties of these samples, reproducing the material in large quantities on a construction site is complex. Alfa fibres are often used in the fabrication of test samples (Ajouguim et al., 2021). The fibres are typically treated with an alkaline treatment by immersing them in a soda solution for 6 hours, followed by a hydrothermal treatment in which they were immersed in boiling water for 1 hour. After fabrication with a hydraulic press, the samples are stored in plastic bags for 7 days. This sample fabrication method is very challenging for large-scale reproduction in real-world construction. As the samples are manufactured by compression with a hydraulic press, using them to fill wooden building structures could be complicated due to the inconsistency of the mixture (Danso, Martinson, Ali, & Williams, 2015; Laborel-Préneron, Aubert, Magniont, Maillard, & Poirier, 2017; Laborel-Préneron, Aubert, Magniont, Tribout, & Bertron, 2016; Laborel-Préneron et al., 2018). Also, the sample fabrication methods available are too complex for use as filling cob materials for wood frames. However, the previous studies pretreated the fibres in the laboratory and these conditions are not realistic in the field conditions.

In our study, to ensure that the cob mixtures could be used in other countries, red and beige clays were selected as they are the two main types of clay used for earth construction in most of Africa and on other continents. This paper presents the results of experiments aimed at finding the optimal water/clay ratio for sample production using the cob manufacturing technique, along with the thermal properties of the resulting samples. In our work, the cob is manually mixed using hands, a shovel, and on foot with boots on, and a concrete mixer can be used for the mixing process in large quantities. Manual production was chosen because the

fibre-reinforced clay used to fill the wooden frame is typically made by hand and foot on construction sites in Africa. The proposed fabrication method is very accessible, and no machinery or no fibre pre-treatment is needed. Additionally, reproducing this type of material in different geographical conditions is easily achievable when the data, production method, and resting time of the mixture are available. The choice of the basic components for the mixture is based on their availability on the African continent. The wheat fibres added to the mix in this study were chosen based on availability. The novelty of this article is to evaluate the thermal properties of cob material made with traditional methods with current characterization methods such as steady-state thermal transmission method and modified transient plane source method. These two characterization methods have allowed for a more precise and comprehensive evaluation of the thermal properties of cob. In addition, statistical tests have been conducted to validate these results. Cob is a material traditionally used in construction, but its thermal properties have not been fully exploited and validated until now. This study aims to fill this gap and provide accurate data on their thermal properties.

3.5 Materials and methods

3.5.1 Materials

Red (Redstone) and beige clays (Midstone) were provided by Plainsman (Alberta, Canada) with an initial water content of 1.68% and 1.12% respectively (A Kaboré & Ouellet-Plamondon, 2021). The wheat fibres used for the formulation of the samples of this project were obtained from the Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) in Quebec, Canada (Fig. 3.1). They were 0.4 cm to 30 cm in length with an initial water content of 7.99%. Before fabrication of the samples with these fibres was started, their capacity to absorb water was determined according to the ASTM D2654 standard (ASTMD2654-89a, 1989) to adjust or choose the mode of wetting of the fibres. Distilled water was used for fibre uptake testing, while potable water from the laboratory was used for sample preparation. Before the absorption tests, a 123 g mass of wheat fibres was cleaned with distilled water and dried at 50 °C in an oven before sampling. After drying, the fibres were separated into three 5 g samples, and each sample was completely immersed in distilled water at a

temperature of 23 °C for water absorption tests. The clays were also characterized before use, and the characterization methods and results are described in another article (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024a).



Figure 3.1 Photographic images of a) the red clay, b) the beige clay, c) the dry fibres, and d) the wet fibres

3.5.2 Methods

3.5.2.1 Atterberg limits

The liquidity limits of the clays were measured by the Casagrande method and the plasticity limit by the roll method, following the guidelines of the CAN/BNQ-2501-090 Canadian standard (CAN/BNQ-2501-090, 2011). After the liquidity and plasticity limits were determined, the plasticity index IP, which corresponds to the average clay plasticity range, was calculated using Eq. 3.1:

$$IP = wL - wp \quad (3.1)$$

where IP is the plasticity index in %, wL the liquidity in %, and wp the plasticity limit in %.

3.5.2.2 Samples production: water-to-clay and water-to-fibre ratios

The samples of the tests were composed of clay materials, wheat fibres, and water. The experimental tests to assess the quality of the mixture was conducted by varying the water/clay ratio respectively by 15%, 20%, 25%, and 30% before adding 3% and 6% fibres by mass. Fibre-free samples, measuring 25.4 cm × 25.4 cm × 2.54 cm (10 inches × 10 inches × 1 inch), were fabricated for each water/clay ratio. This step was meant to determine the optimal

water/clay ratio that yields uncracked samples with low shrinkage (fibre-free samples). The best-performing water/clay ratio would then be used to produce the samples with fibres. Fig. 3.2 illustrates the water/clay ratio selection experiments.

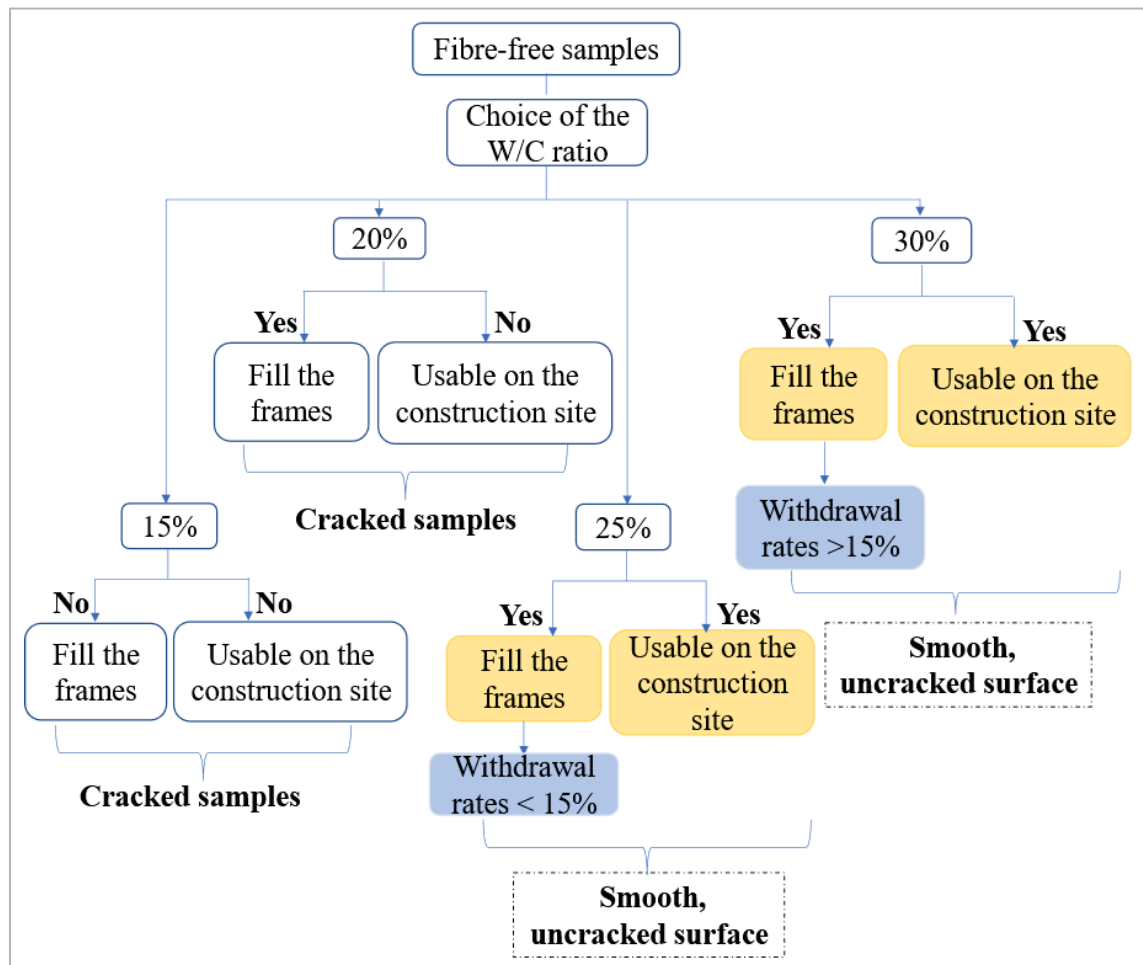


Figure 3.2 Experiments to select the water/clay ratio

The fibre-free samples made with a 25% water/clay ratio showed no cracking. The red and beige clay samples showed cumulative shrinkage of 13% and 12%, respectively (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024a). This ratio was chosen to produce the fibre-free specimens for testing and to continue with the quality control tests for the fibre-reinforced samples. Samples made with 15% and 20% of water were difficult to press by hand. They were unsuitable for use in filling the wood frames, including those at construction sites. For the mixtures with 30%

water, the shrinkage rate exceeded 15%, and so using this mixture to produce samples is not recommended.

To produce fibre reinforced samples, it was crucial to determine the fibre wetting method that would achieve the ideal plastic state of the mixture. Therefore, some samples were made with dry fibres, while others were made with humidified fibres. Water absorption tests of the fibres was carried out for this purpose. The fibres were immersed in distilled water and the measurement of water absorption began after 6 minutes. It was observed that the fibres can absorb (205 ± 15) % of their weight in water after 25 minutes of immersion and (439 ± 2) % of their weight in water after 60 hours of immersion (saturated state). The high-water absorption of fibres is due to the presence of non-cellulosic hydrophobic materials in their structure (Dallel, 2012). This high-water absorption has also been observed for several other types of vegetable fibres (Beténé et al., 2022; Dallel, 2012; Hamza, Saad, Charrier, Ayed, & Charrier-El Bouhtoury, 2013; Surajarusarn, Traiperm, & Amornsakchai, 2019). The objective of these tests was to optimize the number of sample fabrication trials with different water/fibre ratios. The water/fibre ratios used for fibre humidification are (50 ± 34) %, (205 ± 15) %, and (439 ± 2) % by weight of water. These percentages represent the amount of water absorbed by the fibres during absorption tests. The immersion time for the fibres to obtain these ratios was respectively 6 minutes, 25 minutes, and 60 hours for saturated state fibres.

The samples obtained with unhumidified fibres and those with 50% humidified fibres were unusable due to cracks observed on both their surfaces. Those reinforced with fibres that had been wetted for 25 minutes showed no cracks, while those made with water-saturated fibres exhibited small surface cracks. In this step, the choice of technique for fabricating the samples with the fibres was also based on the quality of the mixture, the samples, and the cracking rate after drying, according to the experimental process explained in Fig. 3.3.

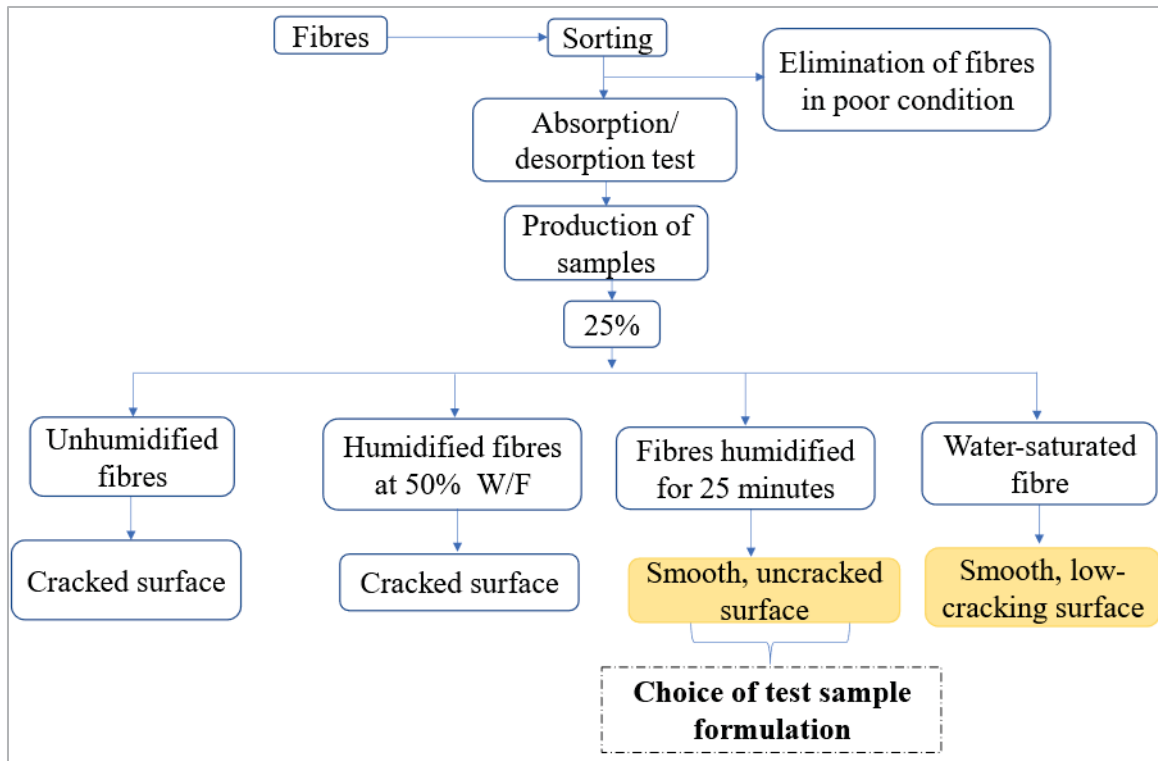


Figure 3.3 Step to select the fibres humidification mode with water/clay to 25%

Subsequently, the water/clay ratio of 25% was chosen to produce the samples with and without fibres for all tests. Samples reinforced with 3% fibres showed a shrinkage rate ranging from 2% to 5.3%, and those with 6% fibres had a maximum shrinkage rate of 1%, whether the fibers were moist or not (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024a). Depending on surface cracking, samples reinforced with wheat fibres for the tests were made with humidified fibres at a 205% water/fibre ratio (water absorption coefficient of the fibres after 25 minutes of testing). After humidification, the fibres were kept for 2 to 3 hours before being used in the mixtures. The samples for hygrothermal testing were prepared with specific dimensions. Two apparatus were used to measure the thermal properties. For the TPS-3500 apparatus, the samples measured 25.4 cm × 25.4 cm × 2.54 cm (10 inches × 10 inches × 1 inch), while for the Trident apparatus, the samples were 3.8 cm (1.5 inches) in height and 3 cm (1.2 inch) in diameter.

The samples were dried after demolding in an oven at 30 °C for 10 to 11 hours for maximum moisture removal. Once they were taken out of the oven, they were left to air dry in the ambient

atmosphere in the laboratory for 7 days at 23 °C. The steps involved in sample production are shown in Fig.3.4. Next, they were weighed, and Eq.3.2 was used to calculate the density of each sample, using their respective mass and volume:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

with ρ is the density in kg/m^3 , m is the sample weight in kg, and V is the sample volume in m^3 .



Figure 3.4 Steps in the production of samples

3.5.2.3 Thermal conductivity from steady thermal transmission

Thermal properties were evaluated on 18 samples measuring 25 cm × 25 cm × 2.54 cm with the TPS 3500 (Hot Disk AB, Sweden) heat flow meter apparatus, according to the ASTM C518 standard (ASTM C518-21, 2021), based on the transient plane source technique, also known as the hot disc method. Before testing, the surfaces of all samples were smoothed with abrasive paper. The samples were conditioned at a temperature of 23 °C and relative humidity of 50%RH in a climate chamber. After the mass of the samples had stabilized, measurements began. The test protocol was performed at room temperature (23 °C). The thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat were determined simultaneously and the thermal effusivity was then calculated by using Eq.3.3:

$$E = \sqrt{\lambda\rho C_p} \quad (3.3)$$

where E is the thermal effusivity in J/(m². K.s^{1/2}), λ is the thermal conductivity in W/(m.k), ρ is the sample density kg/m³ and Cp is the specific heat in J/(kg. K). The experimental setup is presented in Figure-A IV-1a, b.

3.5.2.4 Thermal conductivity and effusivity from a modified transient plane source instrument

Thermal conductivity and thermal diffusivity measurements were performed using the Trident device (C-Therm Technologies, Canada), a modified transient plane source instrument (MTPS), on 18 samples measuring 3 cm in height and 3.6 cm in diameter, in accordance with the ASTM D7984 standard at an ambient temperature of 23 °C (ASTM D7984, 2021). Tests were performed on samples conditioned at ambient laboratory temperature and humidity (23 °C and 50%RH) and on dried samples. The moisture content of the samples after conditioning ranged from 0.53% to 0.39%. To obtain the dry thermal properties of the samples, they were dried at 105 °C in an oven for 24 hours. The first step was to calibrate the device with the reference sample, which had similar thermal properties as earth samples. After calibration, the second step was to place the test sample on the sensor after applying a contact

agent (thermal paste) to reduce the contact resistance. Pressure was applied on the sample to ensure the best possible contact. After thermal stabilization, the sample was heated with a direct electric current generated by the MTPS Trident sensors. Unlike the TPS 3500 device, the Trident instrument measures the thermal conductivity and thermal effusivity. The thermal diffusivity and specific heat were then calculated using Eq. 3.4 and 3.5:

$$D = \frac{\lambda^2}{E^2} \quad (3.4)$$

$$C_p = \frac{\lambda}{D \cdot \rho} \quad (3.5)$$

with D is the thermal diffusivity in m^2/s , E is the thermal effusivity in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2})$, C_p is the specific heat in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, λ is the thermal conductivity in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ and ρ is the sample density kg/m^3 . The thermal properties of six mixtures were measured with three replications for each mixture. The experimental setup is presented in Figure-A IV-1c,d.

3.5.2.5 Statistical test

The data are presented as the means \pm standard deviation (SD) of three independent replicates or more. All results presented in the tables were subjected to ANOVA or a t-test. Individual means were compared for the identification of significant differences at $p < 0.05$. Error bars on the graph were generated using 2 SD.

3.6 Results and discussion

3.6.1 Atterberg boundary: liquidity and plasticity limits of clay

The average liquidity value limits observed after the tests vary between 33% and 36% for the red clay, and between 31% and 35% for the beige clay, while the number of strokes of the Casagrande apparatus varies between 18 and 32 and 17 and 34 for the red and the beige clay, respectively. The plasticity limits determined after the tests were $(15.3 \pm 0.3) \%$ for the red clay and $(16.4 \pm 0.4) \%$ for the white clay. The liquidity limits obtained during the tests were

(32.5 ± 0.6) % for the red clay and (34.0 ± 0.8) % for the beige clay. The Atterberg limits of different clays obtained in the literature vary greatly. The liquidity limit values are between 20% and 45%, while the plasticity limits are between 15% and 29%. In some cases, the liquidity limits range between 39% and 70%, while the plasticity limits go from 24% to 35% (Aubert, Marcom, Oliva, & Segui, 2015; Chakchouk, Samet, & Mnif, 2006). The Atterberg limit values obtained for the two clays are in line with the range of compared values.

For the plasticity index, the usual values for clay soils used to manufacture compressed earth brick samples range from 10% to 39%; for adobes, 20% to 39% (Fabbri et al., 2022). Table 3.1 presents a summary of the liquidity limits, plasticity limits, and plasticity index results. The tested clay samples present a lower plasticity index as compared to some data in the literature.

Tableau 3.1 Summary of test results

Clay	Liquidity limit W_L %	Plasticity limit W_p %	Plasticity index IP %
Red	32.5 ± 0.6	15.3 ± 0.3	17.2 ± 0.3
Beige	34.0 ± 0.8	16.4 ± 0.4	17.6 ± 0.4

3.6.2 Thermal properties of clay fibres and earthen samples

3.6.2.1 Thermal conductivity and specific heat

Table 3.2 shows the thermal conductivity and specific heat mean values and standard deviations obtained for samples conditioned at 50%RH and 23 °C from measurements of the steady thermal transmission method according to the ASTM D518 standard and the modified transient planar source method according to the ASTM D7984 standard. Statistical tests showed that the thermal conductivity values (λ) measured with the steady thermal transmission method (TPS-3500) are slightly higher than those measured with the modified transient planar source method (Trident) for the two clays with 3% and 6% fibre samples ($p= 0.0003$ to $1 \text{ E-}73$, Table AA-1 to AA-3, Supplementary information). The difference between the two methods can be explained by the difference in the acquisition environment. The TPS-3500 is a sensitive method performed under a controlled environment. Consequently, slight variations in conditions affect measurement results. In contrast, the Trident method is used to measure

thermal conductivity in unstable conditions, which means that small changes in temperature and relative humidity will not affect the measured results. As widely reported in the literature, the use of plant fibres to produce clay-based composite materials offers significant advantages, particularly in terms of improving thermal insulation. Additionally, this practice also facilitates the efficient removal process of plant fibres on agricultural sites. The test results showed an improvement in thermal conductivity of the samples with a fibre content of 3% from 40% to 51% and from 56% to 63% for the samples with a fibre content of 6% (Table AA-3).

Tableau 3.2 Density, thermal conductivity, and average specific heat of the samples conditioned at 50%RH and 23 °C

Clay	Fibre %	Steady thermal transmission			Modified transient planar source method		
		ρ kg/m ³	λ W/(m.K)	Cp J/(kg.K)	ρ kg/m ³	λ W/(m.K)	Cp J/(kg.K)
Red	0	2016 ± 17	1.16 ± 0.25	786 ± 52	1954 ± 21	1.10 ± 0.05	901 ± 7
	3	1654 ± 80	0.70 ± 0.07	865 ± 60	1538 ± 17	0.55 ± 0.03	917 ± 5
	6	1412 ± 80	0.51 ± 0.02	870 ± 69	1370 ± 80	0.42 ± 0.04	927 ± 20
Beige	0	1956 ± 16	1.28 ± 0.06	738 ± 33	1914 ± 51	1.13 ± 0.01	930 ± 18
	3	1588 ± 39	0.56 ± 0.01	962 ± 12	1650 ± 55	0.60 ± 0.03	903 ± 34
	6	1367 ± 80	0.44 ± 0.07	1133 ± 14	1400 ± 63	0.42 ± 0.05	988 ± 22

This improvement in insulation can be explained by the decrease in density due to the increase in porosity of the material thanks to the fibres in reinforced clay samples. Air-filled pores significantly reduce the materials' thermal conductivity. The thermal conductivity of the air is 0.026 W/(m. K). Due to the low thermal conductivity of these materials, they are more insulating and thermally efficient. For the specific heat, a 2 to 10% improvement is observed for the samples reinforced with 3% fibres and from 3 to 10% for the 6% fibres (depending on the type of test). The thermal conductivity values of the clay fibre-free materials conditioned at 50%RH and 23 °C presented in the literature vary between 1.25 and 1.66 W/(m. K) with specific heat between 817 and 1129 J/(kg. K) (Bal, Jannot, Gaye, & Demeurie, 2013; Laou, 2017a; Medjelekh, 2015a; Millogo et al., 2014). Other authors have presented thermal

conductivity values between 0.50 and 1.10 W/(m. K) with specific heat between 678 and 1030 J/(kg. K) obtained for dried clay fibre-free materials (Cagnon et al., 2014; El Azhary, Chihab, Mansour, Laaroussi, & Garoum, 2017; Laborel-Préneron et al., 2018; Maillard & Aubert, 2014). The thermal conductivity and thermal capacity values obtained with the two tests align with the thermal conductivity values in the literature. With the samples conditioned at 50%RH and 23 °C, the thermal conductivity increases significantly (C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023).

The clay samples with 3% and 6% fibres have thermal conductivity values ranging from 0.20 W/(m. K) to 0.52 W/(m. K) for dry red clay and from 0.40 W/(m. K) to 0.58 W/(m. K) for dry beige clay. The increase in the quantity of fibres to 6% improves the thermal performance by 75% for red clay samples (Table AA-4) and by 54% for beige clay samples (Table AA-5). In comparison, it has been demonstrated that the most effective vegetable fibres for improving the thermal performance of clay materials is straw (Laborel-Préneron et al., 2018). Indeed, the addition of 6% fibres in the mixture leads to a 75% reduction in thermal conductivity compared to the fibre-free mixture. These results are consistent with our findings.

The thermal conductivity values appearing in the literature vary between 0.26 W/(m. K) and 0.7 W/(m. K) with a specific heat between 596 J/(kg. K) and 897 J/(kg. K) (Bachar, Azzouz, Rabehi, & Mezghiche, 2015; El Azhary et al., 2017; Laborel-Préneron et al., 2018; Medjelekh, 2015a). The specific heat values obtained with the Trident apparatus are slightly higher than those obtained in the literature. The specific heat values increase with the volume of fibres contained in the mixtures due to the presence of more voids (pores) in the material. The same observation has been made in the work of other authors (Charai, Salhi, et al., 2022; Laborel-Préneron et al., 2018; Limami et al., 2023; Sayouba et al., 2023). However, this increase could be attributed to the type of fibers and the method used for the production of the test samples (Sayouba et al., 2023; Tchiotsop, Issaadi, Poullain, Bonnet, & Belarbi, 2022). These results show that the addition of wheat fibres in the clay matrix positively affects the thermal properties of clay-based materials.

This combination simultaneously improves thermal conductivity and specific heat. The incorporation of more fibres in clay mixtures is very useful for the development of insulating

materials for the construction of thermally efficient wood-frame residential buildings. The advantage of adding fibres in clay mixtures is also observed in the works of several authors, regardless of the fabrication method (Charai et al., 2020; Laborel-Préneron et al., 2018; Mellaikhafi et al., 2021). The effect of the fibre content on the thermal conductivity and specific heat of the samples dried and conditioned at 50%RH and 23 °C is shown in Fig.3.5 and Fig.3.6.

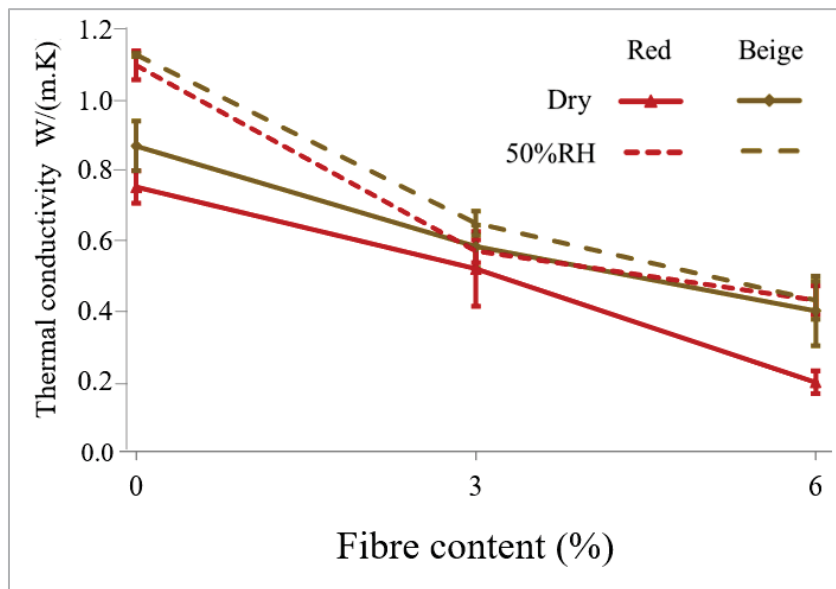


Figure 3.5 Influence of fibre content on thermal conductivity:
Modified transient planar source method

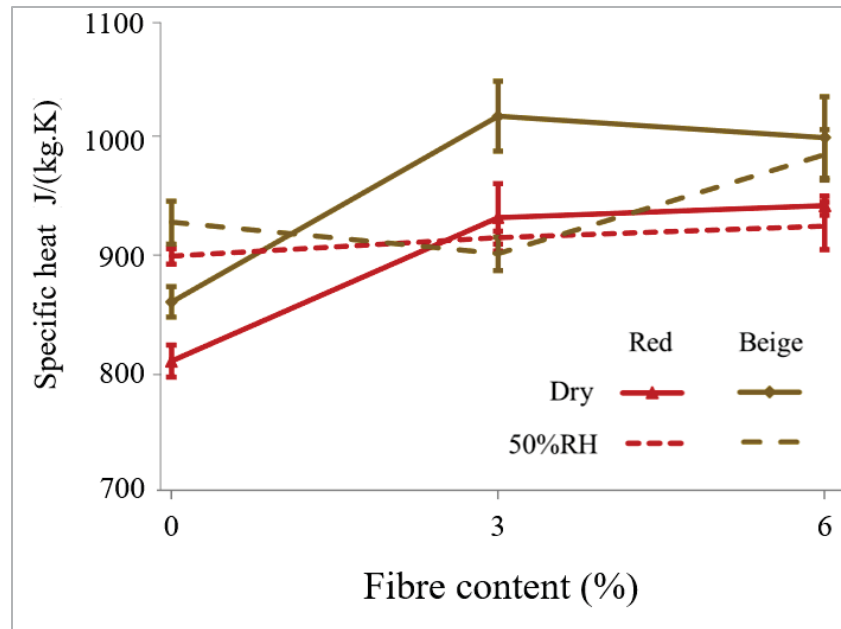


Figure 3.6 Influence of fibre content on the specific heat of samples: Modified transient planar source method

3.6.2.2 Thermal effusivity and diffusivity averages of clay fibres and earthen materials

Table 3.3 shows the thermal diffusivity and thermal effusivity values obtained from measurements made with the steady thermal transmission (according to ASTM D518) and modified transient planar source methods (according to ASTM D7984) (mean values and standard deviations). The thermal diffusivity and thermal effusivity are more affected by the addition of wheat fibres, decreasing when the fibre content increases (Table AA-6). The thermal effusivity (E) and thermal diffusivity (D) of the red and fibre-free beige samples and of the samples with fibre conditioned at 50%RH and 23 °C are approximately the same for the values obtained with the modified transient planar source method. With the regular heat transfer method, the thermal effusivity of the samples of both clays is the same and the thermal diffusivity of the red clay samples is 30% lower than that of the beige clay. The thermal effusivity of the clay samples containing 3% and 6% wheat fibres is reduced by 37% and 46% for the red clay mixture, respectively, and by 34% and 47% for the beige clay mixture, respectively. For the thermal diffusivity, it is reduced by 38% and 51% for the red clay cob, respectively, and by 36% and 52% for the beige clay mixture, respectively for the same

samples. This damping of the thermal diffusivity is due to the fibre structure of the samples, which opposes heat flow with the creation of pores within the composite materials (Mellaikhafi et al., 2021). This also leads to a decrease in the thermal conductivity of the materials containing fibres, as presented in section 3.5.2.1 of this paper.

Tableau 3.3 Thermal effusivity and diffusivity averages of clay fibres and clay samples conditioned at 50%RH and 23 °C

Clay	Fibre %	Steady thermal transmission		Modified transient planar source method	
		E J/(m ² .K.s ^{1/2})	D m ² /s	E J/(m ² .K.s ^{1/2})	D m ² /s
Red	0	1353 ± 54	6.22E-07 ± 7.00E-08	1398 ± 34	6.23E-07 ± 1.62E-08
	3	1359 ± 44	8.89E-07 ± 6.14E-08	1426 ± 5	6.31E-07 ± 3.34E-09
	6	956 ± 51	6.29E-07 ± 1.06E-07	886 ± 25	3.85E-07 ± 2.48E-08
Beige	0	924 ± 13	3.66E-07 ± 1.02E-8	948 ± 36	4.05E-7 ± 1.51E-8
	3	790 ± 15	4.16E-07 ± 4.65E-08	759 ± 46	3.05E-07 ± 2.27E-08
	6	828 ± 58	3.59E-07 ± 7.17E-09	759 ± 43	3.10E-7 ± 4.43E-08

The effect of fibre content on the thermal diffusivity and thermal effusivity of the dry samples and those conditioned at 50%RH and 23 °C is shown in Fig.3.7 and Fig.3.8. The addition of 3% and 6% fibres in clay mixtures leads to better thermal properties in terms of thermal conductivity, specific heat, thermal diffusivity, and thermal effusivity (Table AA-2). This trend was also reported in other studies (Laborel-Préneron et al., 2018) (Mellaikhafi et al., 2021). Comparing the two clays, it is found that both clays have interesting thermal inertia for a wood/clay-fibre construction. However, red clay is more commonly used and has better thermal inertia than beige clay (Table AA-7).

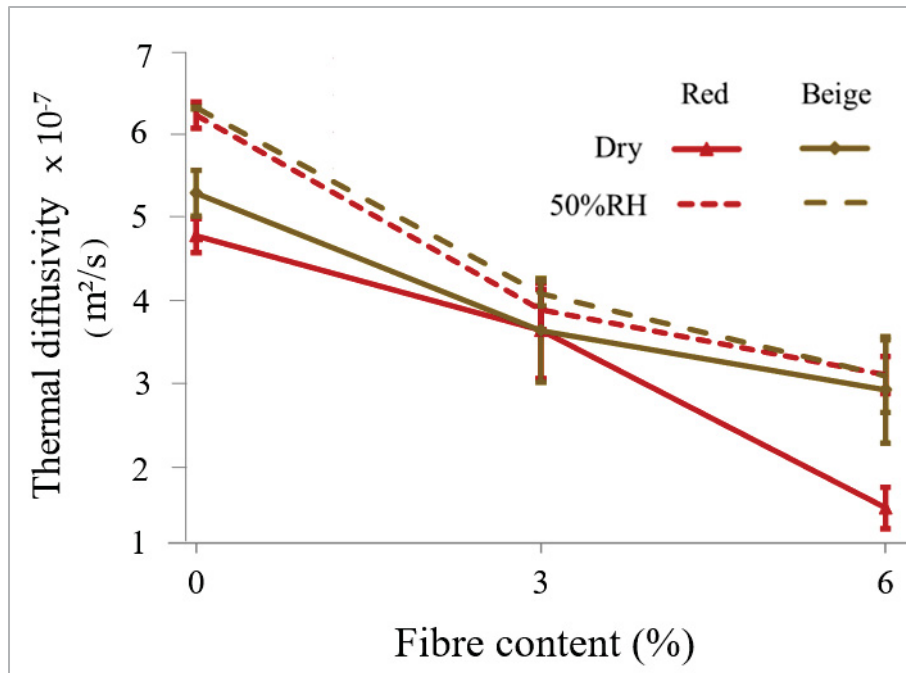


Figure 3.7 Influence of fibre content on thermal diffusivity of samples: Modified transient planar source method

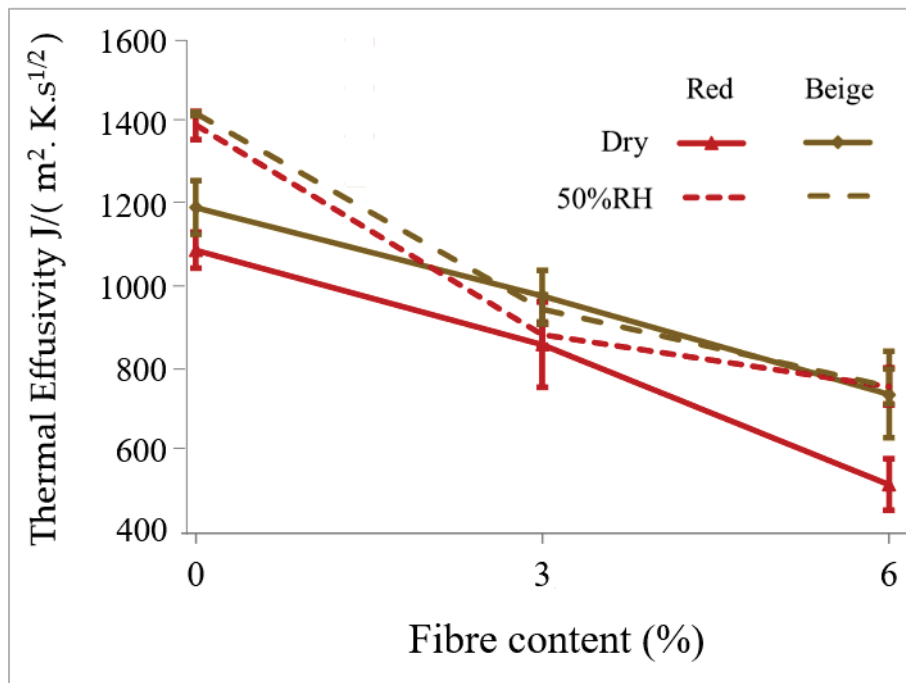


Figure 3.8 Influence of fibre content on thermal effusivity of samples: Modified transient planar source method

For completely dry samples, a decrease in thermal diffusivity of 24% and 70% is observed for red clay mixtures with 3% and 6% fibres, respectively, and of 32% and 46% for beige clay mixtures with 3% and 6% fibres, respectively (Table AA-8). This decrease improves the thermal insulation performance of the sample by increasing the thermal phase shift time between the inside and outside temperatures. The thermal effusivity decreases by 52% (red clay mixes with 6% fibres compared to the fibre-free mix) and by 38% (beige clay with 6% fibres compared to the fibre-free mixture) (Table AA-9). These results illustrate that fibre-reinforced samples can retain heat for a very long time because the heat absorbed at the surface will slowly dissipate when the temperature of its surroundings decreases (Laborel-Préneron et al., 2018). These two distinct coefficients are referred to as the transmission inertia and the storage inertia; the incorporation of fibres into the clay improves both coefficients simultaneously. Based on the results obtained in the present study, fibre-reinforced clay materials are more suitable for building walls than are fibre-free earth materials.

Other materials can be used in combination with cob and earth materials to enhance the overall thermal performance of a building. Tannin-based foam offers a promising alternative to petroleum-based foams in the field of building insulation due to their advantageous characteristics such as low thermal conductivity, high fire resistance, and self-extinguishing properties (Abu-Jdayil, Mourad, Hittini, Hassan, & Hameedi, 2019; Delgado-Sanchez, Santiago-Medina, Fierro, Pizzi, & Celzard, 2018). While commercial petroleum-based foam provides superior thermal insulation (Arafat, Wasiuddin, & Mohammad, 2023; Z. Yang et al., 2023), they have drawbacks including high flammability, high moisture absorption capacity, and low biodegradability, leading to environmental concerns (Chen et al., 2023; Siracusa & Blanco, 2020; Stachowiak & Łukasik, 2021; Z. Yang et al., 2023). A model of a fully hybrid bio-based biocomposite has been developed and compared to a fully petroleum-based composite in terms of volatile organic compound emissions and impact on human health (Al-Mudhaffer, Saleh, & Kadhum, 2022; Khoshnava et al., 2020). The results indicated that a combination of 27% heavy materials, 13% clay, 40% petroleum-based materials, and 20% sandwich panels reduced the indoor temperature of buildings without the need for a cooling system. However, the works of (Balo, 2015) and (Srinivasan et al., 2023) explore solutions to

reduce the use of petroleum-derived chemicals in the development of composite materials in a more sustainable and environmentally friendly manner.

3.7 Conclusion

This article describes a method for producing fibre-reinforced samples using the cob manufacturing technique and presents experimental results of the thermal properties of these samples, as well as samples of raw clay intended for use in filling the wooden frame structure of the building. The main objective of this study was to investigate the possibility of manufacturing cob material that can be used for wooden frame buildings to reduce the energy demand associated with air conditioning or heating. The sample fabrication method presented is very easy to extrapolate to large-scale production without the use of mechanical or electrical mixers. The experimental results indicate that increasing the fibre content in the clay mixture lightens the clay samples by reducing their density while increasing their insulation capacity.

Measurements of the thermal properties of the samples with and without fibres were performed using two methods: 1) steady thermal transmission based on the transient plane source method and 2) the modified transient plane source method. The experimental tests showed that the clay samples had a higher conductivity, ranging from 1.10 to 1.28 W/(m.K). The addition of fibres to the clay matrix improved the thermal insulating behaviour of the material by reducing its thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal effusivity. The thermal capacity increased with the increase in fibre content. The positive influence of loose vegetable fibres on the thermal properties of the samples increased their insulating capacity, providing better thermal comfort. The thermal conductivity of the samples decreased by 40% to 63%, and the thermal capacity increased by 2% to 10% with the addition of 3% and 6% fibres. Thermal conductivity values of 0.2 and 0.4 W/(m K)c were obtained for the dry samples made with 6% fibres of red clay and beige clay, respectively. The thermal properties of the composite materials obtained in this study are promising for the enrichment of clay/fibre materials produced using the cob manufacturing technique. Their use in construction would contribute to reducing the environmental impact due to the availability of raw materials, ease of material production, and low carbon footprint. The statistical analysis (ANOVA, t-test) validated the

thermal property data while highlighting the key role of fibres in enhancing the thermal properties of samples made with cob and adobe fabrication techniques. Statistical test results showed differences between the constant heat transmission method (TPS 3500) and the modified transient plane source method (Trident-C-Therm). TPS 3500 method measures the thermal conductivity in a controlled environment (temperature and relative humidity), while the Trident C-Therm method is performed in a non-controlled environment, which explains the disparity.

These types of materials present the advantage of being mouldable into any shape and size according to needs, which makes them effective as filling material for constructions with wood frame structures. The results of this study can be scaled up in the field because the experiments were carried out in a traditional way, considering their implementation on construction sites. Fibre-reinforced earth materials (3% or 6%) in construction reduce the cost of handling materials for housing due to the abundance of clay earth and limit the incineration of plant fibres after harvesting. In addition, the integration of these materials into the construction process would contribute to a reduction of carbon dioxide emissions related to building materials and the use of cooling and heating systems in buildings. The thermal property results indicate that fibre-reinforced clay materials are more suitable for building walls than fibre-free earth materials.

3.8 Funding

This research was funded by the Pôle de Recherche et d'Innovation en Matériaux avancés du Québec (PRIMA), the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Alliance program, Quebec Wood Export Bureau (QWEB), American Structures, and Boralife. (Funding number: ALLRP 560404-20).

3.9 Acknowledgments

The authors thank SEREX for its participation in the hygrothermal properties measurements of the studied materials for this project. The authors also thank Patrick Brisebois, Mathieu

Bendouma, Jana Vander Goot and Sinead Crotty for reviewing previous versions of the manuscript.

CHAPITRE 4

NATURAL THERMAL AND HYGROTHERMAL REGULATION WITH HEAVY COB FOR LOW CARBON CONSTRUCTION

Aguerata Kabore¹, Aziz Laghdir², Claudiane Ouellet-Plamondon¹

¹ Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure, Université du Québec, 1100 Notre-Dame West, Canada.

² Serv Rech & Expertise Transformat Prod Fore (SEREX), Amqui, Quebec G5J 1K3, Canada.

Article publié dans « Construction and Building Materials », octobre 2024

4.1 Avant-propos

Les résultats de l'objectif spécifique 2 sur la caractérisation des échantillons en argile et en torchis ont été présentés dans ce chapitre. Les propriétés thermiques ont été évaluées en fonction de la teneur en eau. Les propriétés hydriques, la porosité des échantillons en argile et en torchis ainsi que la performance thermique d'un mur en torchis avec 3 % de fibres ont été également évaluées.

4.2 Résumé

La construction moderne s'intéresse de plus en plus aux matériaux géosourcés pour leur faible empreinte carbone. Cette étude vise à investiguer les propriétés hygrothermiques de deux matériaux argileux renforcés avec des fibres de blé en utilisant la technique traditionnelle du torchis pour la construction moderne à ossature bois. Les coefficients d'absorption d'eau (α_{mat}), la perméabilité à la vapeur d'eau (δ), la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (μ), la diffusivité de l'humidité (D_w), l'effusivité de l'humidité (b_m), la profondeur d'infiltration équivalente de l'humidité ($dp_{1\%}$), la capacité spécifique d'humidité (ζ), la valeur théorique et expérimentale du tampon d'humidité (MBV_{exp} et MBV_{theo}), la porosité (η) et les isothermes de sorption ont été étudiés en fonction de la teneur en fibres dans les échantillons à des pourcentages de fibres de 0 % en poids, 3 % en poids et 6 % en poids. La conductivité

thermique (λ), la capacité thermique (C_p), la diffusivité thermique (D) et l'effusivité thermique (E) ont été évaluées en fonction de la teneur en humidité. Les résultats indiquent que la capacité de tamponnage de l'humidité des échantillons d'argile, avec ou sans renforcement de fibres, est supérieure à $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$. Les porosités ouvertes des échantillons variaient de 20 % à 45 %, avec des capacités spécifiques d'humidité allant de 0,014 kg/kg à 0,031 kg/kg. La profondeur d'infiltration équivalente de l'humidité des échantillons variait de 2,17 cm à 2,68 cm. Après exposition du mur en torchis contenant 3 % en poids de fibres à des températures de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $35 \text{ }^\circ\text{C}$ et $45 \text{ }^\circ\text{C}$, les résultats expérimentaux de la température intérieure du mur variaient entre $19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est donc recommandé d'utiliser du torchis contenant au moins 3 % de fibres ou plus pour la conception des enveloppes des bâtiments en environnement réel.

4.3 Abstract

Modern construction has a growing interest in geosourced materials for their low carbon footprint. This study aims to investigate the hygrothermal properties of two clay materials reinforced with wheat fibres using the traditional heavy cob technique for modern wood frame construction. The water absorption coefficients (α_{mat}), water vapor permeability (δ), water vapor diffusion resistance (μ), moisture diffusivity (D_w), moisture effusivity (b_m), equivalent moisture penetration depth ($dp_{1\%}$), specific moisture capacity (ζ), theoretical and experimental moisture buffer value (MBV_{exp} and MBV_{theo}), porosity (η) and sorption isotherms were studied as a function of the fibre content in the samples of the fibre percentages of 0%wt, 3%wt, and 6%wt. The thermal conductivity (λ), heat capacity (C_p), thermal diffusivity (D), and thermal effusivity (E) were evaluated as a function of the moisture content. The results indicate that the moisture buffering capacity of the clay samples, with and without fibre reinforcement, is greater than $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$. The open porosities of the samples varied from 20 to 45%, with specific moisture capacities from 0.014 to 0.031 kg/kg. The equivalent moisture penetration depth of the samples ranged from 2.17 cm to 2.68 cm. After exposure of the cob wall containing 3%wt fibre to temperatures of $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $35 \text{ }^\circ\text{C}$, and $45 \text{ }^\circ\text{C}$, the experimental results of the interior temperature of the wall varied between $19.5 \text{ }^\circ\text{C}$ and $23 \text{ }^\circ\text{C}$. It is therefore

recommended to use cob containing at least 3% or more fibre for wall construction in a real environment.

Keywords: Hygrothermal properties, Moisture Buffer Value, geosourced materials, wood frame structure, open porosity, cob walls.

4.4 Introduction

Buildings and the construction sector account for nearly 40% of CO₂ emissions related to energy and the material manufacturing process (Falana, Osei-Kyei, & Tam, 2024). Buildings use various materials that consume energy and emit CO₂ throughout their life cycle, known as embodied energy and embodied carbon. With increasing urbanization, the number of residential buildings continues to rise, significantly impacting carbon emissions. Understanding the emissions from the construction sector (Wambersie & Ouellet-Plamondon, 2024) and the entire construction process, including extraction, manufacturing, transport, construction, and the building's life cycle, contributes to identifying measures to reduce CO₂ emissions (Myint & Shafique, 2024). Defining net-zero carbon, and low carbon footprint construction also become crucial concepts to achieve global climate goals (Myint & Shafique, 2024). The International Energy Agency (IEA) highlights the importance of government commitments and technological innovations to reduce carbon emissions in the construction sector. Geo-sourced materials in modern building construction are becoming essential due to their low carbon footprint and recyclability (A. Kaboré & C. Ouellet-Plamondon, 2021; Moudjari et al., 2021; C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023).

Currently, clay stabilized with cement and with rammed earth represents modern traditional building techniques. The dynamic compaction of the mixture in temporary boxes is most employed commonly for production bricks or for designing rammed earth walls. Its use is widespread in Australasia, Asia, Spain, Germany, France, and Great Britain (Goodhew et al., 2021; Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). Raw earth is an abundant building material with low grey energy; it is locally available, easy to work, and meets several environmental sustainability criteria. It has grown to become the most explored material for its integration into modern construction (Liuzzi et al., 2018). One of the main qualities of earth materials is

their ability to regulate internal humidity thanks to their hygroscopic properties (Bouasria et al., 2021; Dubois, McGregor, Evrard, Heath, & Lebeau, 2014; Laborel-Préneron et al., 2018; McGregor, Heath, Fodde, & Shea, 2014; McGregor, Heath, Maskell, Fabbri, & Morel, 2016; McGregor, Heath, Shea, et al., 2014). The main drawback is their vulnerability when in contact with water (Kouka Amed Jeremy Ouedraogo, Aubert, Tribout, & Escadeillas, 2020). Indeed, the addition of plant fibres such as flax, hemp, or wheat can increase the resistance of earth materials to moisture and adverse weather conditions (Chabaud, 2015). These plant fibres are ecological and biodegradable, and present numerous advantages, in addition to being recyclable, much like earth materials. Although various methods are used to make earth materials, the traditional technique of constructing with cob stands out for its simplicity and ecological character (Hammiche, Boukerrou, Djidjelli, Kervoëlen, & Grohens, 2015). This technique generally involves mixing earth, plant fibres, and water to obtain a malleable material used to fill voids in timber-frame structures, commonly known as cob buildings (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). The mixture must be plastic enough to adhere to the structure, but rigid enough to maintain its shape after drying (Akinwumi, 2014).

Raw or stabilized earth containing a small quantity of cement can regulate heat transfer but is not a very good insulator (Hamard et al., 2016). The stabilization of earth materials with cement limits their full recyclability at the end of their life (Hamard et al., 2016; Kouka Amed Jeremy Ouedraogo et al., 2020), and affects their moisture retention capacity (Al Haffar, Fabbri, McGregor, & Colina, 2019). In agriculture, when wastes, also known as plant wastes, such as wheat fibre, rice fibre, corn fibre, and cotton straw are present in large quantities, they pose a significant challenge because they can be potentially polluting to the environment (Jannat, Hussien, Abdullah, & Cotgrave, 2020). These wastes are residues generated by the cultivation or raw processing of agricultural products. They can take the form of fibre or non-fibre materials and are available in abundant quantities almost throughout the globe (Taallah, Guettala, Guettala, & Kriker, 2014). Using plant fibres for reinforcement of earthen materials would improve the hydric properties of the latter while effectively removing the fibres from crop fields. Like raw earth, plant fibres are hygroscopic, renewable, and have a sustainable life cycle (Di Bella, Fiore, Galtieri, Borsellino, & Valenza, 2014; Liuzzi et al., 2018). Earth reinforced with plant fibres produces little to no waste, has a very low or zero carbon footprint

(Arman, Chen, & Ahmad, 2021; Labat et al., 2016), and is part of hygroscopic composite materials (Taallah et al., 2014). The fibres are natural composites that are fully recyclable at the end of their life and their production requires local resources, little energy, and can be done at low cost. As these materials are hygroscopic, each element of a building designed with them is impacted by external moisture (R. Bui, Labat, & Aubert, 2017). Managing the moisture of these elements is very energy-intensive. To reduce the energy demand associated with this moisture management, these materials are increasingly being studied to improve their moisture properties. Poor moisture management can lead to fungal and mold growth in walls. If the moisture absorption/desorption of building materials is overestimated or underestimated, HVAC systems may need to be brought in to meet heating or cooling needs (Kreiger & Srubar III, 2019).

Africa is currently experiencing rapid population growth, which is in turn putting pressure on the housing stock, with demand being highest in the residential sector (CAHF, 2017; Majale et al., 2011; Yetunde, 2014). Many African countries are facing major housing-related challenges such as a lack of adequate infrastructure, slums, and high prices. There is currently a 51 million housing unit housing deficit on the African continent, and the number keeps increasing each year due to rapid population growth (E.-H. M. Bah, I. Faye, & Z. Geh, 2018a). This housing crisis is particularly acute in countries such as South Africa and Djibouti, where rapid population growth and urbanization have created increased demand for affordable housing (Zoma & Nakanabo, 2022). Authorities and stakeholders therefore have no choice but to implement effective housing policies promoting sustainable infrastructure development, while focusing on building affordable housing. Walls made of rammed earth with a wooden frame structure are soundproof, termite-resistant, and chemical-free, and the wooden frame provides good seismic resilience to the building structure (Meyer, 2010a; Tomovska & Radivojević, 2017).

To promote a material in the construction sector, highlighting the results of laboratory tests evaluating its thermal and hydric performance is essential for proving its viability (Azil et al., 2022). Assessing and quantifying the hygrothermal properties of cob allows to preserve and enhance traditional construction techniques, while also facilitating the scientific

documentation of its performance. This can position cob as a viable, ecological, and sustainable option for contemporary construction. Although several studies have explored the potential of cob and discussed it in the works of Kamal Haddad (Haddad, Lannon, & Latif, 2024), as well as some data on the thermal performance of 3D-printed cob (Gomaa, Carfrae, Goodhew, Jabi, & Veliz Reyes, 2019), a comprehensive understanding of the formulation (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024), its mechanical (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024a), and hygrothermal properties for cob formulated using the traditional technique for sustainable construction remains to be evaluated. Moreover, it is important to provide clear guidelines for preparing the cob mixture to facilitate the construction process of cob buildings and ensure their hygrothermal performance (Sameh, 2014). A lack of information on all the hygrothermal properties of cob materials, formulated using the traditional cob production technique, has been observed. This lack is especially regarding the evolution of their behavior at 75% humidity, the free saturation coefficient (water saturation in the free state), the hydric inertia coefficients (D_w and b_m), the penetration degree ($dp_{1\%}$), and the specific water capacity (ζ). These coefficients are essential for the hygrothermal simulation of wall systems in different climatic zones. Evaluating all hygrothermal properties of traditionally produced cob using advanced techniques leads to a better understanding of its behavior, providing objective data on its thermal and hygroscopic characteristics, thereby optimizing its overall performance while respecting traditional know-how. This approach can also contribute to beefing up the construction technique and paving the way to the reintegration of cob in construction, particularly in a bid to meet energy efficiency and thermal comfort criteria in housing.

This article presents an experimental study on the influence of moisture content on the thermal and hygroscopic properties of wheat fibre-reinforced clay specimens manufactured using the heavy cob technique. Cob, as a natural material, has several sustainable advantages over conventional building materials (Ayoub Gounni & Hasna Louahlia, 2020). This article examines the thermal conductivity, heat capacity, thermal diffusivity, and thermal effusivity of cob in varying moisture content, as well as the hydric properties of fibre-free and fibre-reinforced clay mixtures. The thermal performance of a mini-wall was also evaluated based on climatic data from Djibouti and Johannesburg, two African cities. The novelty of this work lies in the meticulous experimental evaluation of the hygrothermal properties and thermal

performance of heavy cob, a traditionally made material that is easily reproducible on construction sites. This study presents comprehensive data on the hygrothermal properties of this cob in order to deepen the understanding of its hygrothermal behavior as a function of moisture content and to optimize its performance for sustainable construction while respecting traditional know-how.

4.5 Materials and methods

4.5.1 Materials

For the fabrication of the test samples, two types of clay, red clay, and beige clay in powder ranging in size from 0 to 63 μm , and wheat fibres were used. Red (Redstone) and beige clays (Midstone) were from Plainsman (Alberta, Canada), and the wheat fibres were obtained from the Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) in Quebec, Canada, respectively (C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023). The red clay (RC) is a clay containing iron oxide with a plasticity index of 15%, while the beige clay (Gupta et al.) contains more kaolinite with a plasticity index of 16% (C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023). The plasticity index was determined in accordance with Canadian standard CAN/BNQ-2501-090 (CAN/BNQ-2501-090, 2011), and details of this work are available in Kabore et al. (A Kaboré & Ouellet-Plamondon, 2021). Both clays contain 43% quartz, 8.9% kaolinite, and 2.2% hematite for the red clay, and 25.8% kaolinite and 0.1% hematite for the beige clay (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024a). The mineralogical composition was determined by X-ray diffraction (XRD), chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF), and thermogravimetric analysis (TGA) using the Perkin Elmer STA8000 instrument, and the description of the methods is available in (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024a). The particle size distribution and methylene blue value are available elsewhere (Aouinti, 2023). For the tests in this study, three mixtures, with 0%wt, 3%wt, and 6%wt fibre content, were prepared, with three replicates for each mixture, for every clay type, and for each test. The results for each property presented in this article are therefore the averages of three repetitions for each mixture. The fibre-free red and beige clay samples studied were made with a 25%wt water/clay ratio. For the samples reinforced with 3%wt and 6%wt fibre, the fibres were first wetted with

a water quantity corresponding to a water/fibre ratio of $205\%wt \pm 15 wt\%$. This value was obtained from the water absorption test conducted on the fibres. The clay/water mixture was then made with 25%wt water before the moistened fibres were added.

The samples were produced using the traditional cob production method, which uses raw fibres without chemical treatment. These fibres had a length ranging from 0.4 cm to 40 cm. The mixing process was done manually, beginning with blending clay and water until a consistent mixture was achieved. Subsequently, fibres were added to finalize the mix. A one-hour break was taken after the clay-water-fibre mixture was prepared to allow the entire mixture to reach moisture equilibrium before the samples were fabricated. A $254 \times 254 \times 25 \text{ mm}^3$ rectangular formwork and a 30 mm height and 36 mm diameter cylindrical formwork were used, depending on the type of test being conducted (Figure 4.1). The formwork was filled and pressed by hand, but without measuring the degree of compaction. This technique is commonly used for wood-frame structures. The specimens were dried in an oven set at $30 \text{ }^\circ\text{C}$ for 10-11 hours after demolding to ensure maximum water removal before their exposure to $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ambient laboratory air. More information can be found in the previous article (C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023).

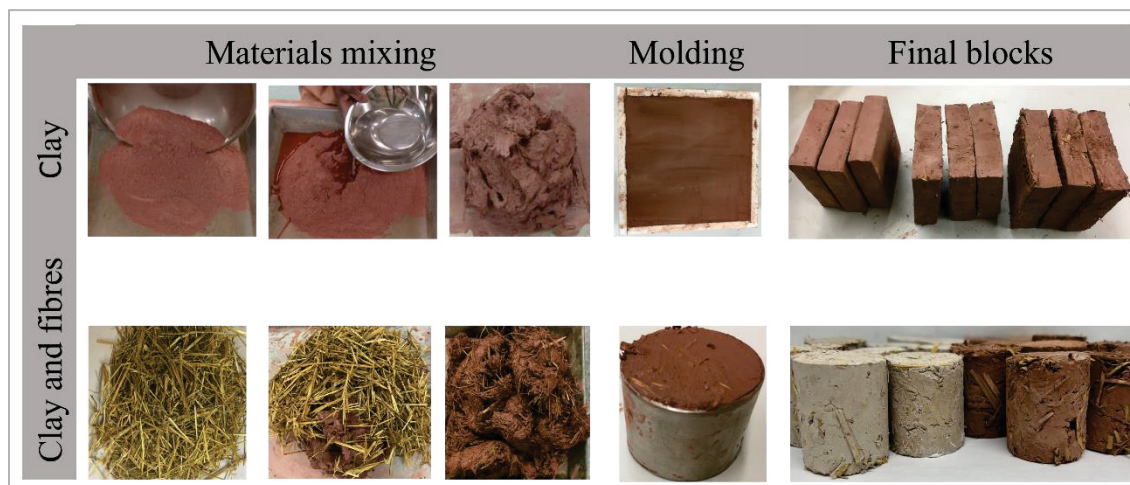


Figure 4.1 Sample preparation protocol of earth and cob blocks developed

4.5.2 Methods

4.5.2.1 Determination of water content and water absorption/desorption of fibres

Before the tests were started, the initial moisture content of the fibres was determined. The fibres were taken directly from the bags and dried in an oven at 50 °C for 2 hours. The moisture was first calculated for a drying time of 2 hours. Subsequently, the fibres were returned to the oven at the same temperature for 1 hour to verify that they were completely dry before determining the initial moisture content. The moisture content obtained between these two drying intervals was 0%. The moisture content of the fibres was calculated using Equation 4.1 (Ikelle & Ivoms, 2014).

$$w_i = \frac{m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}}}{m_{\text{dry}}} * 100\% \quad (4.1)$$

where w_i is the initial water content in %, m_{wet} is the mass of the sample before drying (fibre taken directly from the bag) in grams (g), and m_{dry} is the mass of the sample after drying in grams (g).

For the water absorption and desorption test, the wheat fibres were cleaned with distilled water and dried in an oven at 50 °C for 4 hours before testing. The fibres were then separated into three 5-gram samples for the water absorption test, according to the ASTM D2654 guidelines (ASTM D2654-89a, 1989) referenced in a previous study, to determine the water absorption of the flax and hemp fibres (Ho Thi, 2008). Each sample was completely immersed in distilled water at different temperatures (23, 40, and 50 °C). Some tests were performed at room temperature (23 °C), while for the tests conducted at 40 °C and 50 °C, each sample was submerged in distilled water, heated to the respective temperature, and placed then in an oven set at that temperature for constancy. The containers were closed to prevent surface drying of the fibres. The weight of wet fibres was measured at regular intervals until saturation of the fibres (constant mass). To assess a fibre's ability to release absorbed moisture during testing, all samples were exposed to ambient laboratory air at a temperature of 23 °C and at a relative humidity ranging from 40% to 50% after the water absorption test, following saturation. The

samples were weighed every 2 hours until completely dry (back to the initial mass before the water absorption test). Water content absorbed or lost at time t is calculated by applying Equation 4.1.

4.5.2.2 Density and open porosity measurements

The open porosity of the samples was determined by combining the gas pycnometer method using helium and the non-wetting oil immersing method (olive oil). The open porosity of a porous material refers to the proportion of voids in the material that are interconnected and accessible from the outer surface. The oil test method was performed by NF ISO 5017 (NF ISO 5017, 2013). The gas pycnometer used for the measurement of the solid density and solid volume of the samples is an effective tool for determining the true density and the true volume (density and volume of the material without pores) of porous materials. The apparent density of a porous material is the density of the solid material, including the pores it contains. The true or solid density of a porous material, on the other hand, is the density of the solid portion of the material. In this study, a ULTrapyc 5000 gas pycnometer was used to determine the true density and the true volume of clay without fibres and with 3%wt and 6%wt fibre. The instrument was calibrated at a helium pressure of 20 psi and a temperature of 23 °C. Three 30 mm height and 36 mm diameter samples were made with the same mixture, for a total of nine samples. Before the solid and void volumes were measured, the samples were dried in an oven at 60 °C for 24 hours.

To determine the void volume, the dried samples were first saturated with non-wetting oil under vacuum in a desiccator for 24 hours at a pressure of 80 kPa. This allowed the oil to replace the air in the open pores without interacting with the samples. Figure 4.2 illustrates the steps for determining the open porosity of the samples.

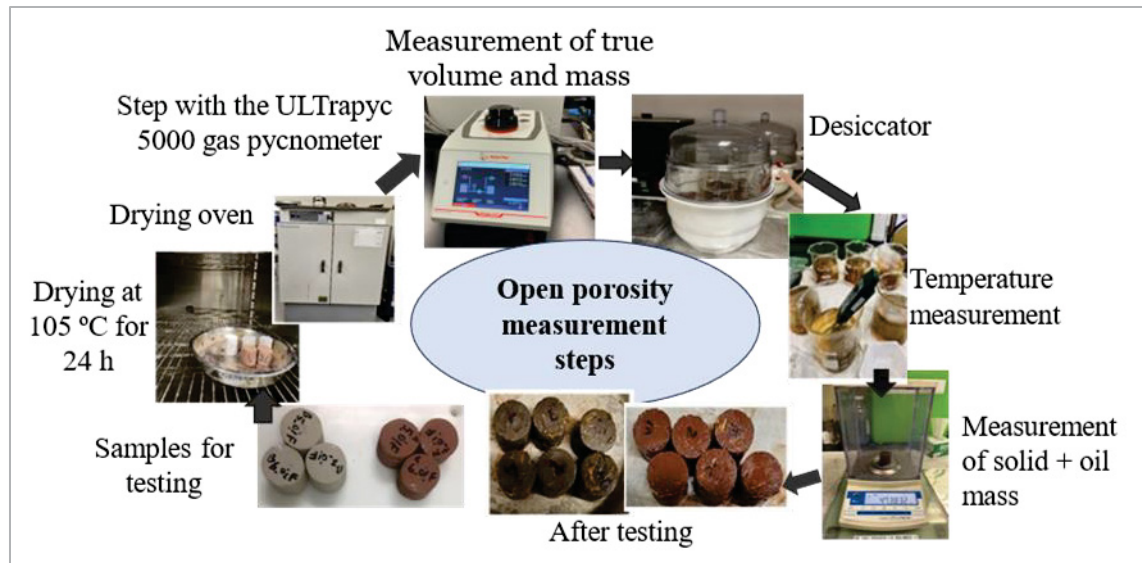


Figure 4.2 Open porosity measurement.

The volume of the oil-filled voids was determined by the ratio of the mass of the oil to the density of the oil. Equation 4.2 was used to determine the open porosity:

$$\eta = \frac{V_{\text{voids}}}{V_{\text{voids}} + V_{\text{true}}} * 100\% \quad (4.2)$$

Where η is the porosity open (%), V_{voids} are the void volumes (m^3) and V_{true} is the true volume, I.e., the volume of the material without pores (m^3).

4.5.2.3 Thermal properties

The thermal properties of three different mixtures (0%wt, 3%wt, and 6%wt fibre content) were initially measured in a dry state, with three replications for each mixture. For this, samples were dried in an oven at 105 °C for 48 hours. Two weighings were performed at 24-hour intervals, and a mass difference of less than 0.01 g was observed before testing. The tests were performed sample by sample to avoid moisture recovery with an MTPS (transient plane source modified) instrument according to the ASTM D7984 standard (ASTM D7984, 2021). Further tests were performed on samples conditioned at ambient laboratory temperature and at relative humidity (23 °C and 50%RH), and with a sodium chloride (NaCl) solution, giving a relative humidity of 75%RH at a 23 °C temperature. The water content that was either absorbed by the

samples was measured before the tests. These measurements were aimed at observing the influence of moisture on the thermal properties of fibre-reinforced clay materials.

4.5.2.4 Water absorption test

Two methods were used to evaluate the water absorption capacity or relative humidity of the materials manufactured for this study, in accordance with ISO 15148 (ISO 15148, 2002).

- Capillary absorption method (partial immersion): this test consisted of partially immersing the samples in a jar containing water for 24 hours. The change in the mass of each sample was determined by weighing it at given time intervals, and the water absorption was determined by Equation 4.3.
- Moisture absorption method: a salt solution was prepared with sodium chloride (NaCl) to obtain a saturated solution, enabling maintaining the relative humidity at $75 \pm 0.4\%$, and the temperature at 23 ± 1 °C during the tests. The samples were then dried at 105 °C in an oven for 48 hours. The first weighing was done at the 24-hour drying mark, and a second weighing was carried out 24 hours after the first one. The difference in mass between the two weighing was 0.01%. The samples were then placed in a sealed container with a tray containing the saturated sodium chloride (NaCl) solution and conditioned for 48 hours before the water content absorbed by the samples was measured.

$$\alpha_{mat} = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} * 100\% \quad (4.3)$$

Where α_{mat} is the water absorption coefficient in %, m_{dry} is the mass of the sample in a dry state in g, and m_{wet} is the mass of the sample in a wet state in g.

4.5.2.5 Water vapor permeability and resistance factor

The measurement of water vapor permeability was determined by the wet and dry cup methods according to the ASTM E96 standard (ASTM E96-95, 1995).

- Dry cup: the samples were sealed in a cup containing a desiccant (silica gel) that maintained the relative humidity of the atmosphere in the cup at 0%RH, leaving a small air space between the desiccant and the samples (Figure 4.3a).
- Wet cup: the samples were sealed in a cup containing distilled water that maintained the relative humidity of the atmosphere in the cup at 100%RH, leaving a small air space between the distilled water and the samples (Figure 4.3b).

The test chamber was maintained at a constant temperature of $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity of $50\%\text{RH} \pm 2\%\text{RH}$. The sample and the cup assembly were then placed in an apparatus equipped with a balance for periodic sample mass measurements that determined the rate of water vapor movement through the sample into the desiccant or to the controlled chamber atmosphere. Figure 4.3 shows the samples' water vapor permeability measurement principle.

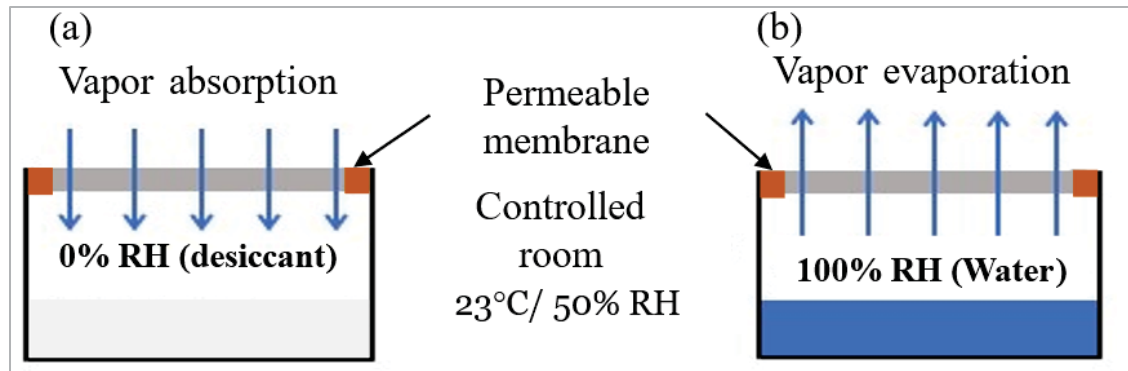


Figure 4.3 Water vapor permeability measurement principle: a) dry cup and b) wet cup

At equilibrium, the water vapor permeability (δ) was then determined by Equation 4.4 and the water vapor diffusion resistance (μ) by Equation 4.5:

$$\delta = \frac{G * e}{\Delta P_v} \quad (4.4)$$

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (4.5)$$

Where ΔP_v is the water vapor pressure difference in Pa (Laborel-Préneron et al., 2018) (Equation 4.6):

$$\Delta P v = (HR_1 - HR_2) * 610.5 * e^{\left(\frac{17,269 * T}{237,3 + T}\right)} \quad (4.6)$$

Where e is the thickness of the sample in m, G is the water vapor transmission rate $G = \frac{\Delta m / \Delta t}{S}$ in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (ASTME96-95, 1995), S is the average surface area of the exposed sample in m^2 , Δm is the weight change in kg, Δt is the time interval during which water vapor transmission occurred in s, δ_a is the water vapor permeability of water ($2.10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$), and T is the temperature in K.

4.5.2.6 Moisture buffer value

Moisture buffer values (MBV) were measured using the NORDtest protocol (Rode et al., 2005). Measurements were made on $254 \times 254 \times 25 \text{ mm}^3$ (10-inch x 10-inch x 1-inch) samples. Prior to testing, the samples were sealed on all sides with aluminum tape except for one side and then conditioned at $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ and $50\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$. After moisture equilibrium, the test samples were placed in a climate chamber and exposed to several cycles of relative humidity (8 h at 75%RH and 16 h at 33%RH). The equilibrium criterion was a period long enough for the mass of the samples to stabilize such that the difference between two successive determinations (24 hours apart) of the mass was within 0.01%. The MBV of the samples at each cycle was calculated by Equation 4.7:

$$\text{MBV} = \frac{\Delta m}{A(75\% \text{RH} - 33\% \text{RH})} \quad (4.7)$$

Where MBV is the moisture buffer value in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{RH})$, Δm is the mass variation (water sorption/desorption) of the samples during the period of high or low relative humidity in g, and A is the surface of the sample m^2 .

4.5.2.7 Sorption, desorption isotherm curves and specific moisture capacity

The Dynamic Vapor Sorption (DVS) method based on the ISO 12571 standard (ISO 12571, 2021) was used for the tests (Figure AB-1). Samples (three per mix) of 0%wt, 3%wt, and 6%wt

fibre, 62 mm in diameter and 23 mm thick, were placed in a climate chamber on one side of a microbalance (DVS2 from SMS Ltd., UK). The relative humidity of the climate chamber varied in successive steps from 20 to 95%RH in 15%RH increments. The microbalance device controlled the temperature (set at 23 ± 0.5 °C) and humidity around the sample placed in a basket suspended from the weighing system. The mass of the samples was measured at regular intervals. Moisture equilibrium was reached when the mass variation did not exceed 0.0005% for each moisture level.

The specific moisture capacity (ξ), which represents the slope of the moisture retention curve between 35 and 75%RH, assumed to be linear, was determined by Equation 4.8 from the experimental sorption data. The moisture effusivity (b_m) and moisture diffusivity (D_w), which are used to evaluate the moisture transport in building materials under a saturating vapor pressure gradient, were calculated by Equations 4.9 and 4.10 using the vapor permeability value obtained by the wet cup method:

$$\xi = \frac{dw}{dRH} \quad (4.8)$$

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta \cdot \rho_0 \cdot \xi}{Pvs}} \quad (4.9)$$

$$D_w = \frac{\delta \cdot Pvs}{\rho_0 \xi} \quad (4.10)$$

where dw is the difference in water content, dRH is the difference in relative humidity, δ is the water vapor permeability determined by the wet cup method, ρ_0 is the dry density, Pvs is the saturation vapor pressure, depending on the test condition in Pa calculated by Equation 4.11:

$$Pvs = Pa e^{\left(13.7 - \frac{5120}{T(23^\circ\text{C})}\right)} \quad (4.11)$$

The theoretical moisture buffer value (MBV_{theor}) and the equivalent moisture penetration depth ($dp_1\%$) in a porous material were calculated by Equations 4.12 and 4.13. These coefficients are

simplified approaches used to evaluate the moisture variation capacity of building materials (Rode et al., 2005):

$$\text{MBV}_{\text{theor}} = 0.00568 \cdot P_{vs} \cdot b_m \sqrt{tp} \quad (4.12)$$

$$\text{dp}1\% = 4.61 \sqrt{\frac{D_w \cdot tp}{\pi}} \quad (4.13)$$

Where P_{vs} is the saturation vapor pressure, b_m is the moisture effusivity, tp (s) is the period corresponding to 24 hours, D_w is the moisture diffusivity.

4.5.2.8 Statistical test

The data presented in this article are shown as means \pm standard deviation (SD) of three or more independent replicates. All results presented in tables and figures were subjected to a one-factor ANOVA for groups of more than three or to a paired samples t-tests. The t-test is a statistical method used to compare paired means in a specific manner. Individual means were compared to identify significant differences with an α value of 0.05, and a significant difference is observed for p less than the α -value ($p < 0.05$).

4.5.2.9 Indoor temperature and humidity in cob on a wall element

Measurements of temperature variations through the mini-wall were conducted on 80 cm width, 80 cm length, and 15 cm thickness walls. Before testing began, the walls were preconditioned at a temperature of 20 °C and a relative humidity of 50% in a climate chamber. Testing began once the temperatures and humidity of the mini-walls had stabilized. The biclimatic chamber used for the experimental thermal performance testing is an EXCAL 7713-HA + 7723-HA model from the manufacturer CLIMATS, and it consists of two chambers, one for simulating indoor conditions in terms of temperature, and the other for outdoor conditions. The operating principle of the biclimatic chamber is to monitor the thermal behavior of a wall sandwiched between the two chambers using a sample holder. Temperature sensors are placed at various positions within the wall thickness (on the interior surface, exterior surface, and in

the middle), allowing the characterization of the wall's thermal performance. The testing and sensor placement procedure is identical to the procedures described in the work of Sawadogo et al. (Sawadogo et al., 2023) using the same equipment. The two cities studied, Djibouti with temperatures ranging from 20 °C to 45 °C, and Johannesburg with temperatures between -5 °C and 35 °C were chosen due to the suitable temperature range of these two cities. City information was obtained by purchasing climate data from the Weather API (Openweather, s.d). Djibouti has higher temperatures, with a maximum of 45 °C, while Johannesburg has lower temperatures, reaching -5 °C. To start the measurements, the outdoor temperature was set at 20 °C and -5 °C for the winter session and 45 °C and 35 °C for the summer session, for Djibouti and Johannesburg respectively. Inside the enclosure, the temperature was maintained at 20 °C. This experimental measurement procedure was used to validate the results obtained from numerical data by Sawadogo et al. (Sawadogo et al., 2023). The purpose of this measurement in this study is to evaluate the capacity of the cob wall with 3%wt fibres to transfer heat or lose heat from the interior side of the wall when the external temperature is high or low. Table 4.1 illustrates the outdoor and indoor conditions defined for the temperature and relative humidity measurements of the outside, middle, and inside walls, and Figure AB-2 in the supplementary document shows the equipment and the experimental wall. The measurements were conducted during seven consecutive days.

Tableau 4.1 Boundary conditions for experimental measurements on the wall element

	Outside wall				Inside wall	
	Winter		Summer		Winter and summer	
Cities	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)
Djibouti	20 ± 1	90 ± 2	45 ± 1	30 ± 2	20 ± 1	50 ± 2
Johannesburg	-5 ± 1	90 ± 2	35 ± 1	25 ± 2		

4.6 Results and discussions

4.6.1 Water absorption and desorption of fibres

Figure 4.4 shows the evolution of the water absorbed by the fibres for 60 hours at different temperatures. The results of the water absorption test show that 25 minutes after being put in water, the fibres absorb about $205 \pm 15\%$ of water compared to their initial mass, and the water absorption continues until saturation (60 hours) at room temperature (23 °C). When the ambient temperature increases, the amount of moisture absorbed by plant fibres also increases. The temperature significantly influences the water absorption rate, with higher temperatures promoting water diffusion within the fibres. This can be explained by the fact that wheat fibres have very high capillary forces, which are impacted by the geometry of the fibres' pores (Bouasker, Belayachi, Hoxha, & Al-Mukhtar, 2014). Alfa fibres absorbed between 156% and 640% of their mass in water after saturation (Dallel, 2012). A recent study has demonstrated that pineapple fibres can absorb 268% of their dry mass in water when immersed in water for one hour (Betené et al., 2022). Other studies have also shown water absorption values ranging from 63% to 300% for different plant fibres (Betené et al., 2022; Hamza et al., 2013). The high water absorption of plant fibres is explained by their porous structure and the presence of hemicelluloses (Dallel, 2012). The drying times of fibres were evaluated in the present study and the results are presented in Figure AB-3 in the supplementary document. The complete saturation of the fibres took about 48 hours, while the drying time was 20 hours for all samples exposed to ambient laboratory air, a temperature of 23 °C, and a relative humidity ranging from 40% to 50%RH. The complete loss of water in the wheat fibre structure was relatively fast. This property allows the composite materials (fibre-reinforced clays) to keep the building elements (wood framing) durable and to prevent moisture from building up in the wall for several days during heavy rainfall.

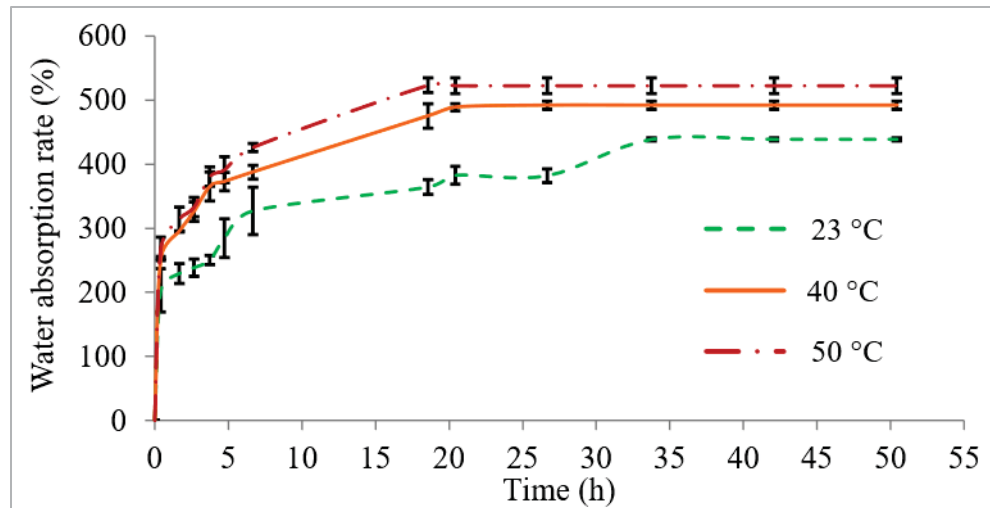


Figure 4.4 Evolution of water absorption rate of wheat fibres as a function of immersion time and temperature

4.6.2 True density and open porosity measurements

Figure 4.5 presents the results of the measurements for the samples' bulk density, true density and the difference between true and bulk density ($\Delta(\text{density})$). The bulk density decreases significantly with increasing fibre content in the mixtures as compared to the solid density determined by the gas pycnometer. The fibre-free red and beige clay samples studied had a dry bulk density from $2016 \pm 17 \text{ kg/m}^3$ to $1956 \pm 16 \text{ kg/m}^3$. The average dry bulk density of the samples with 3%wt fibre varied between $1662 \pm 41 \text{ kg/m}^3$ and $1588 \pm 39 \text{ kg/m}^3$, while for the samples with 6%wt fibres, it varied between $1454 \pm 66 \text{ kg/m}^3$ and $1315 \pm 54 \text{ kg/m}^3$. The average density of the solid material was 2738 kg/m^3 to 2555 kg/m^3 for the red clay samples and from 2671 kg/m^3 to 2489 kg/m^3 for the beige clay samples. This represents a 7% decrease in density for a 6%wt fibre content in the solid matter for both types of clay. This observation is supported by previous research (Liuzzi et al., 2017; Liuzzi et al., 2018; Randazzo et al., 2016). The significant difference observed between the average bulk density and the average solid density is presented in Figure 4.4 by $\Delta(\text{density})$. This difference in density becomes more significant for samples containing 3%wt and 6%wt fibre. As more fibres are added, $\Delta(\text{density})$ increases. This can be explained by the increase of voids in the material due to the presence of fibres.

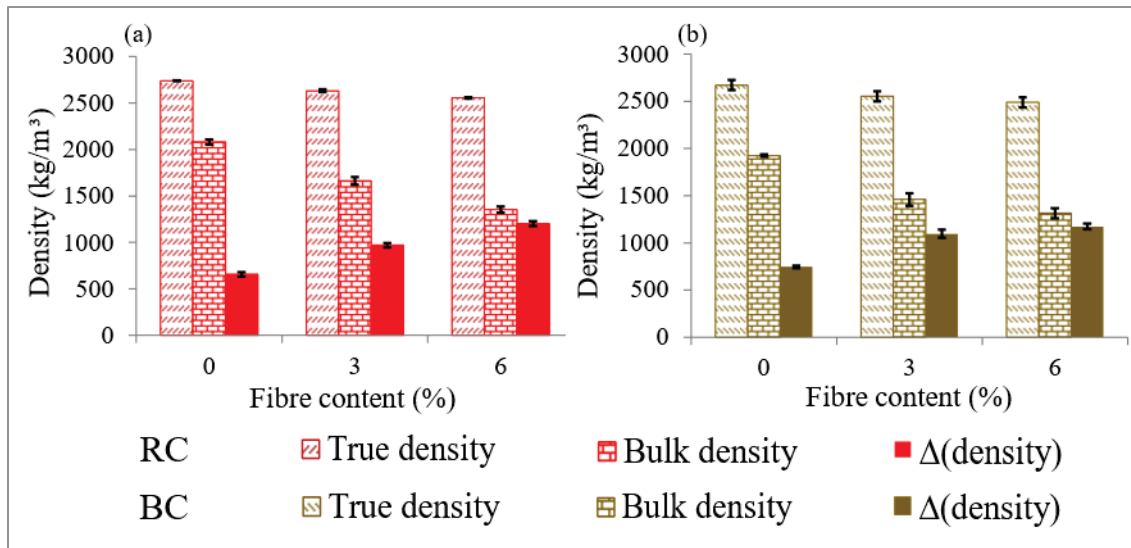


Figure 4.5 True, bulk density and $\Delta(\text{density})$ of the (a) red and (b) beige clay samples

Figure 4.6 presents the trends between the accessible porosity and bulk density of the samples. The bulk density decreases with the open porosity (correlation coefficients are 0.990 for the red clay and 0.999 for the beige clay). The average accessible porosity results are 20.6% and 20.1% for the red and beige clay samples without fibres, respectively. For the fibre-reinforced samples, a significant increase in porosity as a function of the bulk density of the samples was observed. The values obtained for the two types of clay of the same mixture are close, 37.1% and 39.1% for the red and beige samples reinforced with 3%wt fibre, respectively. The porosity of red and beige clay samples reinforced with 6%wt fibre was found to be 45.4% and 44.4%, respectively. A decrease in porosity followed by an increase in density can be explained by the fact that the clay particles feed the pores of the mixture, thus reducing the quantity of open pores in the materials without fibre reinforcement (Alassaad et al., 2022). Porosity values ranging from 21.7% and 41.6% of compressed earth bricks, correlating with a density ranging from 2194 kg/m³ and 1607 kg/m³, respectively, were reported in (Mansour, Jelidi, Cherif, & Jabrallah, 2016). Similarly, porosity values between 38% and 44% were documented for clay materials reinforced with olive pruning waste, with the density ranging from 1669 kg/m³ to 1409 kg/m³ (Liuzzi et al., 2017). Other research has also shown that porosity in clay materials increases with a higher proportion of fibres or plant aggregates, consequently affecting the bulk density of these materials (Azil et al., 2023; Phung, 2018).

The integration of fibres into earth materials increases porosity by reducing the compaction pressure, which decreases density and the contact between clay particles. Fibres act as spacers, creating larger voids and enhancing open porosity. They also form bridges between particles, strengthening the structure and preventing pore collapse. These structural modifications increase open porosity while reducing the bulk density of the samples. The high correlation coefficients confirm a strong relationship between density and open porosity, directly linked to the fibre content in the samples.

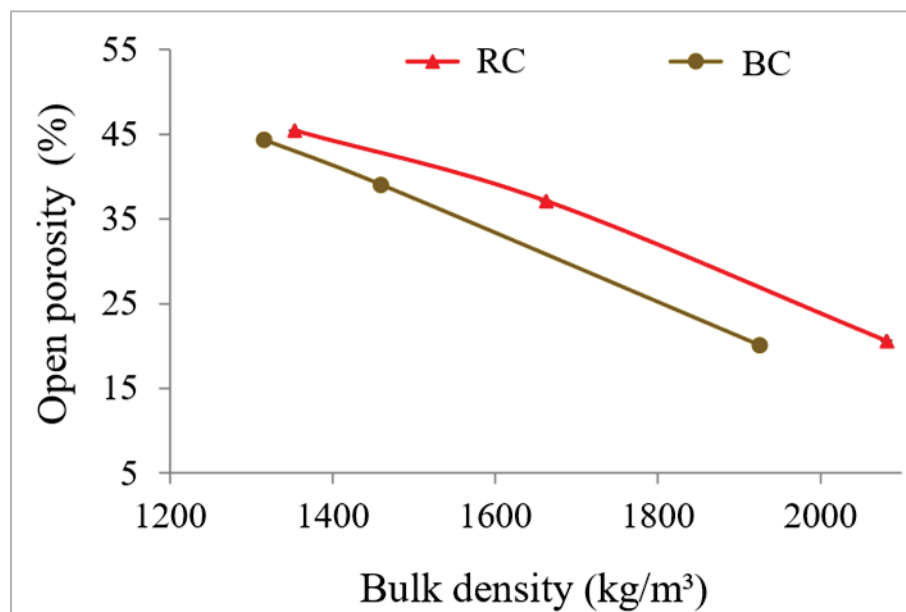


Figure 4.6 Open porosity variation versus bulk density

4.6.3 Influence of relative humidity on thermal properties

To evaluate the influence of moisture content on the thermal properties of clay and cob materials, all dry clay and cob samples were subjected to a relative humidity of 50%RH and 75%RH at 20 °C for 48 hours. The results of the measured water content are presented in Table 2 and represent the average of three samples per mixture. Figures 4.7 and 4.8 illustrate the variation of thermal property values as a function of water content obtained from measurements performed with the modified transient plane source method according to ASTM D7984 (ASTM D7984, 2021). The water content has a great impact on the thermal properties of the samples. Samples made with a 6%wt fibre content tend to absorb more

moisture than samples with 3%wt and 0%wt fibre content. This ability to absorb more water vapor may be attributed to the increased pore size caused by the presence of fibres in the clay matrix. A 3.8% water absorption led to an increase in thermal conductivity three times higher than the thermal conductivity obtained in the dry state for samples with 6%wt fibre. The thermal conductivity of the other mixtures varied between 0.75 and 1.18 W/(m.K) and between 0.52 and 0.72 W/(m.K) for a water content from 3.1% to 3.6% for the mixtures without fibre and with 3%wt fibre, respectively. These findings align with previous studies (Azil et al., 2023; Phung, Guern, Boutouil, & Louahlia, 2019; Tang, Cui, & Le, 2008). Additionally, research on earth samples with varying fibre content has shown that the thermal conductivity changes in relation to the amount of water absorbed by samples. The effect of water content on thermal conductivity were noted in studies involving clay samples with different sand compositions, as well as hemp and pith samples (Abbas, McGregor, Fabbri, Ferroukhi, & Perlot, 2022; Anglade, Aubert, Sellier, & Papon, 2022).

The specific heat of the fibre-free and fibre-reinforced red clay samples increased significantly with increasing water content, in contrast to the beige clay samples reinforced with 3%wt and 6%wt fibre. For the red clay samples, an increase of 11% was observed for mixtures without fibre, 5% for mixtures with 3%wt fibre, and 9% for mixtures with 6%wt fibre. The beige clay samples reinforced with 3%wt fibre showed a gradual decreased in their specific heat by 9%, followed by an increase. In contrast, those reinforced with 6%wt fibre initially exhibited a slight decreased in their specific heat of about by 2%, before increasing by 8% ($n=9$, $\alpha=0.05$, $p=0.26$, Table AB-1, supplementary information). The results obtained on the coefficients of thermal inertia (thermal diffusivity and effusivity) show that the values of the two coefficients increase with an increase in the water content of the material (Figure 4.8). These values are higher than the values obtained on dry samples in previous studies (Laborel-Préneron et al., 2018; Mellaikhafi et al., 2021). The values of all the thermal properties mentioned in this article increase globally with the water content, but in different ways for each type of mix, and depending on the quantity of fibres present in the mix. This is due to the presence of fibres in the samples creating larger voids in their structure. In high humidity conditions, the air within the sample voids is replaced by water vapor, increasing the thermal properties of these

materials. The higher the fibre content in the material, the greater its tendency to absorb water vapor (Table 4.2).

Tableau 4.2 Water content absorbed for a 48-hour exposure at 50%RH and 75%RH

	Reference	Test condition and absorbed water content (%)	
	Fibre (%wt)	50%HR and 23 °C	75%HR and 23 °C
Red Clay	0	1.19 ± 0.08	3.09 ± 0.08
	3	1.26 ± 0.08	3.58 ± 0.04
	6	1.31 ± 0.01	3.78 ± 0.07
Beige Clay	0	0.91 ± 0.01	2.24 ± 0.02
	3	1.00 ± 0.08	2.30 ± 0.07
	6	1.24 ± 0.10	2.69 ± 0.03

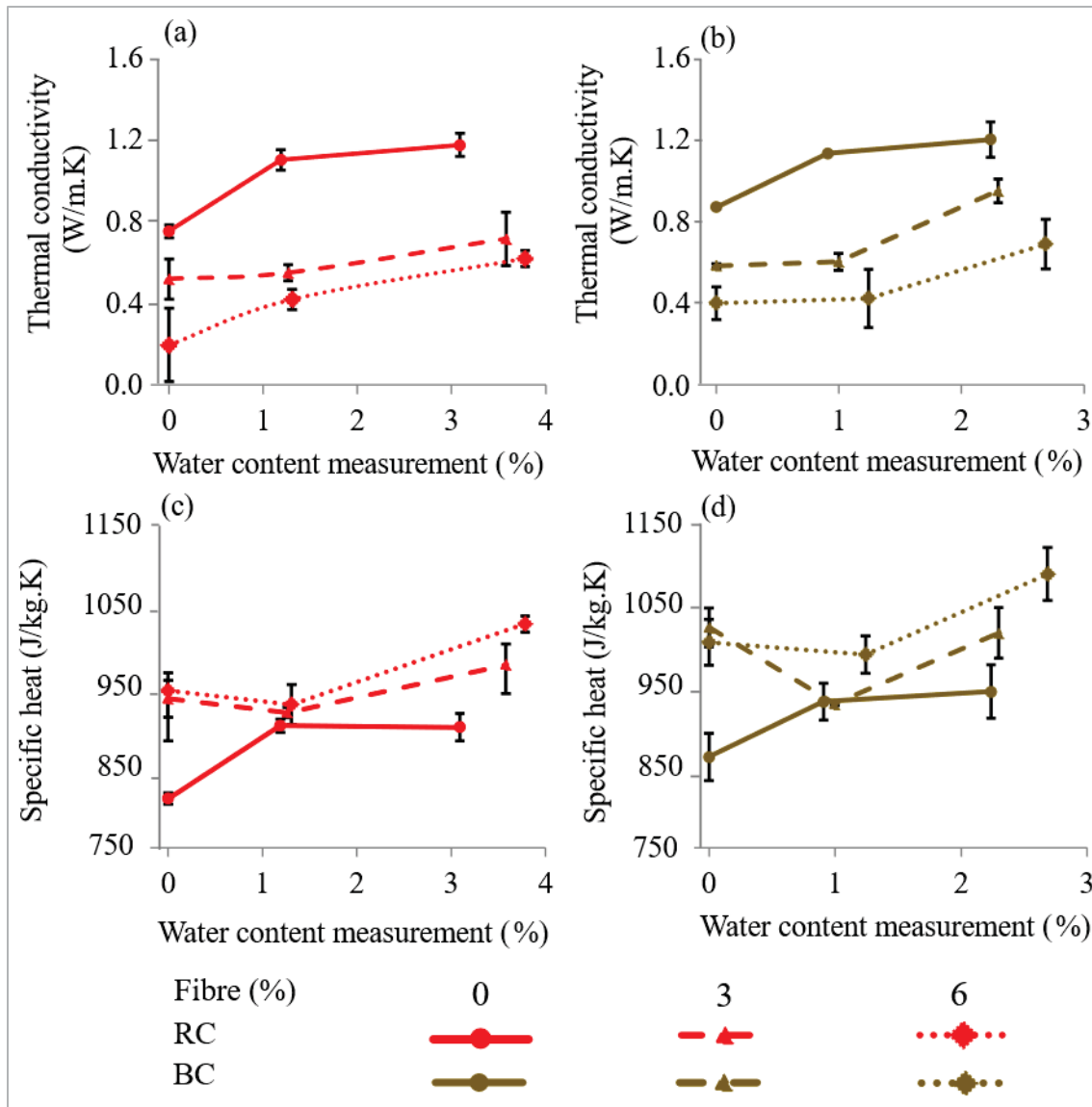


Figure 4.7 Variation of thermal conductivity and specific heat with water content of (a, c) red clay samples and (b, d) beige clay samples

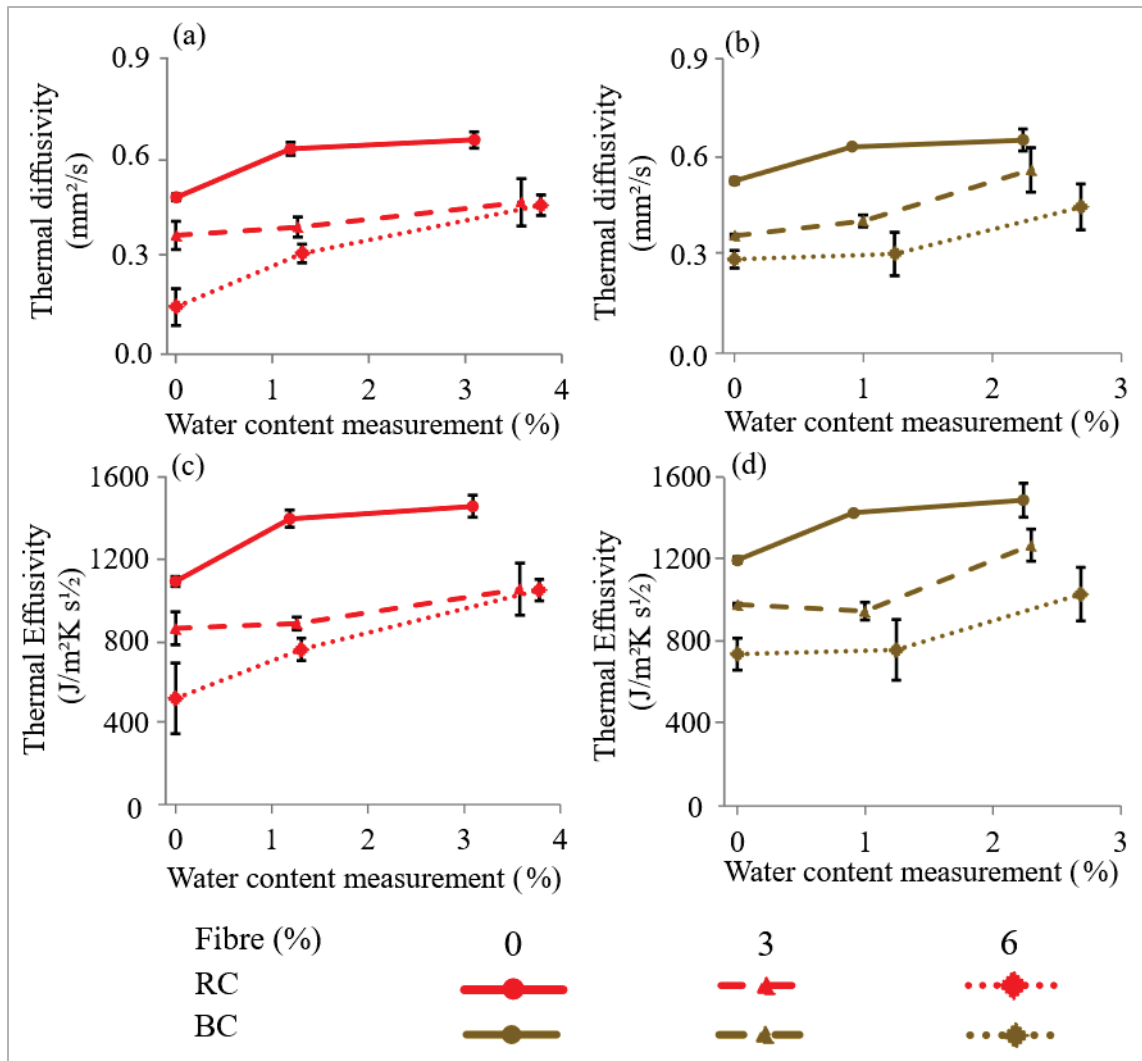


Figure 4.8 Variation of diffusivity and thermal effusivity with water content of (a, c) red clay samples and (b, d) beige clay samples (b, d)

The absorption of water by clay and cob samples leads to an increase in their thermal conductivity, which reduces their effectiveness as insulators by facilitating heat transfer through the material. Moreover, the increase in water content also affects the specific heat capacity of the samples. In the case of red clay samples, this specific heat capacity increases significantly, suggesting a better heat storage capacity. However, this can also lead to a slower response to temperature variations, impacting thermal regulation (Alassaad et al., 2023). Furthermore, the increase in thermal diffusivity and effusivity in the presence of moisture indicates that cob can adapt more quickly to temperature changes. The presence of fibres in

the material's structure increases pore size, promoting greater absorption of water vapor. This characteristic can enhance the material's ability to regulate indoor humidity, but it comes at the expense of its insulating efficiency under high humidity conditions (Alassaad et al., 2022).

4.6.4 Hydric properties of samples

To assess the water performance of the cob, red or beige clay mixes with 3%wt and 6%wt fibre were used with a control mix without fibres. Their water vapor permeability, water vapor resistance factor, moisture buffer value (MBV), and sorption/desorption curve were evaluated.

4.6.4.1 Water absorption

Earthen building materials are sensitive to water. However, contact between water and the building envelope is often unavoidable. Laboratory tests to assess the degree of vulnerability are performed either by immersion or by capillary action. In the present work, the results of a capillary test and at 75%RH exposure tests are presented. Figure 4.9 shows the curves representing the variation of the capillary water absorption coefficient and moisture absorption obtained as a function of the fibre content in the samples. The coefficient of capillary water absorption and moisture absorption increases with increasing fibre content. The increase in water and moisture absorption of the fibre-reinforced samples can be explained by the hydrophilic nature of wheat fibres, which can absorb more water. Raw plant fibre-reinforced earth materials absorb more water when exposed to moisture than materials without fibre (Khoudja et al., 2021; Laborel-Préneron et al., 2016). Capillary absorption tests conducted on samples reinforced with date palm fibres stabilized from 5 to 8% cement have shown that the water absorption coefficient increased with an increase in fibre content in the material (Taallah et al., 2014). The same was observed for samples exposed at 75%RH in this study.

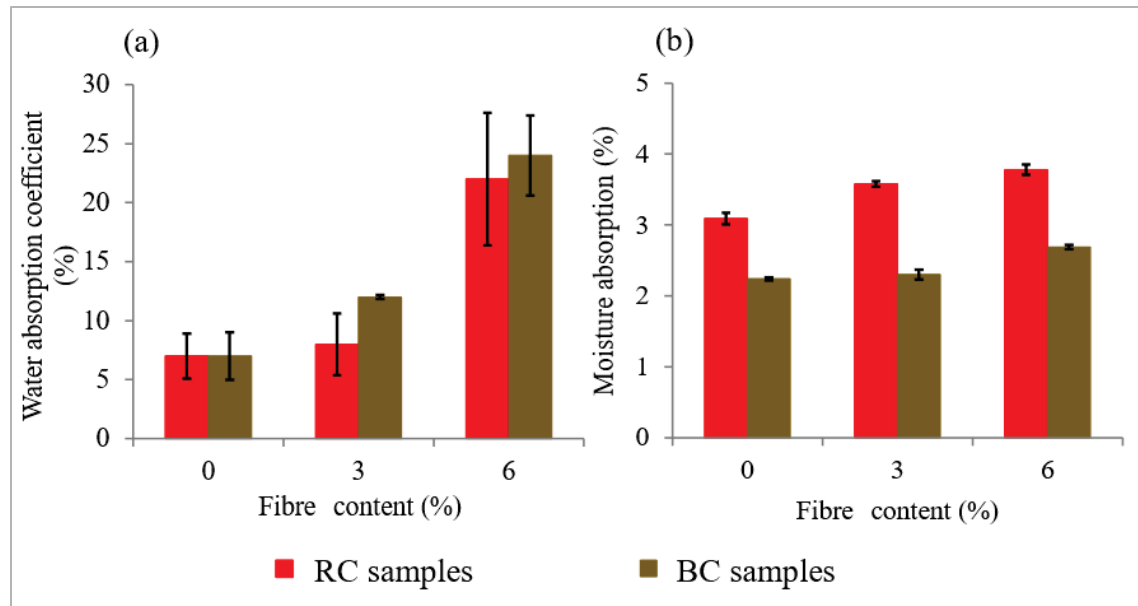


Figure 4.9 Water and moisture absorption at a temperature of 23 °C, (a) exposure to water for 24 hours and (b) exposure to 75% RH for 48 hours

4.6.4.2 Water vapor permeability and resistance factor

Table 4.3 and Figure 4.10 show the mean values and standard deviations of the water vapor permeability and water vapor resistance factor of clay samples without and with fibre. The test results indicate that the water vapor permeability and the water vapor resistance factor depend mainly on the nature of the clays (Figure 4.10). The t-tests comparing the means of the data confirmed that the differences are significant ($n = 9$, $\alpha = 0.05$, p -value = 0.03 and 0.002 (dry method) and p -value = 0.003 and 0.02 (wet method), Table AB 2 and AB 3 supplementary information). The studied samples have a water vapor permeability that allows them to be a natural moisture regulator. These properties are therefore very beneficial for wood/cob construction. The water vapor permeability (δ) and vapor diffusion resistance factor (μ) values of the clay samples are comparable to data on earth bricks obtained by other authors (Cagnon et al., 2014; Laborel-Préneron et al., 2018). The results of water vapor permeability and water vapor resistance factor obtained by the dry cup method do not show a significant influence of adding plant fibres in the production of cob for all samples ($n=6$, $\alpha = 0.05$, p -value = 0.5, Table AB-4, for supplementary information). However, with the wet cup, this difference is visible.

According to some authors, the transfer of liquid in smaller pores has a major impact on the macroscopic transport of water in materials (Bruno & Gallipoli, 2016; Fouchal, Gouny, Maillard, Ulmet, & Rossignol, 2015; O'Farrell, Wild, & Sabir, 2001). Water can be retained in small pores by capillarity, thus leading to an increase in water movement resistance through the materials. Our samples, being made using the traditional technique of cob production, can result in the creation of larger pores after drying due to the presence of fibres (fibre/clay matrix interfaces). This can explain the decrease in water permeability of the samples reinforced with fibres in our study, thus increasing resistance to vapor. The results from this study for fibre-reinforced clay samples are consistent with those reported by previous research, where samples reinforced with 3%wt and 6%wt barley straw also showed similar values (Laborel-Préneron et al., 2018). The addition of fibre leads to an increase in the water vapor diffusion resistance factor (Laborel-Préneron et al., 2018; Liuzzi et al., 2018). However, other authors have obtained water vapor permeability values that increase with the fibres increase (Palumbo, McGregor, Heath, & Walker, 2016). It should therefore be noted that the μ and δ values of composite materials are dependent on the type of fibres used in their fabrication and the method of fabrication of the composite materials.

Tableau 4.3 Average value of water vapor permeability and water vapor resistance

		Dry condition		Wet condition	
Type of clay	Fibre (%wt)	$\delta \times 10^{-11}$ (kg/s·m·Pa)	μ	$\delta \times 10^{-11}$ (kg/s·m·Pa)	μ
Red	0	1.53 ± 0.05	14.52 ± 0.59	6.41 ± 0.20	3.57 ± 0.04
	3	1.40 ± 0.05	15.11 ± 0.39	4.57 ± 0.01	4.64 ± 0.17
	6	1.65 ± 0.05	14.71 ± 0.38	4.55 ± 0.90	5.32 ± 1.20
Beige	0	1.18 ± 0.08	20.00 ± 1.35	4.75 ± 0.20	4.95 ± 0.11
	3	1.53 ± 0.20	16.08 ± 2.48	3.32 ± 0.19	7.40 ± 0.39
	6	1.27 ± 0.12	17.67 ± 0.91	3.53 ± 1.15	7.37 ± 3.36

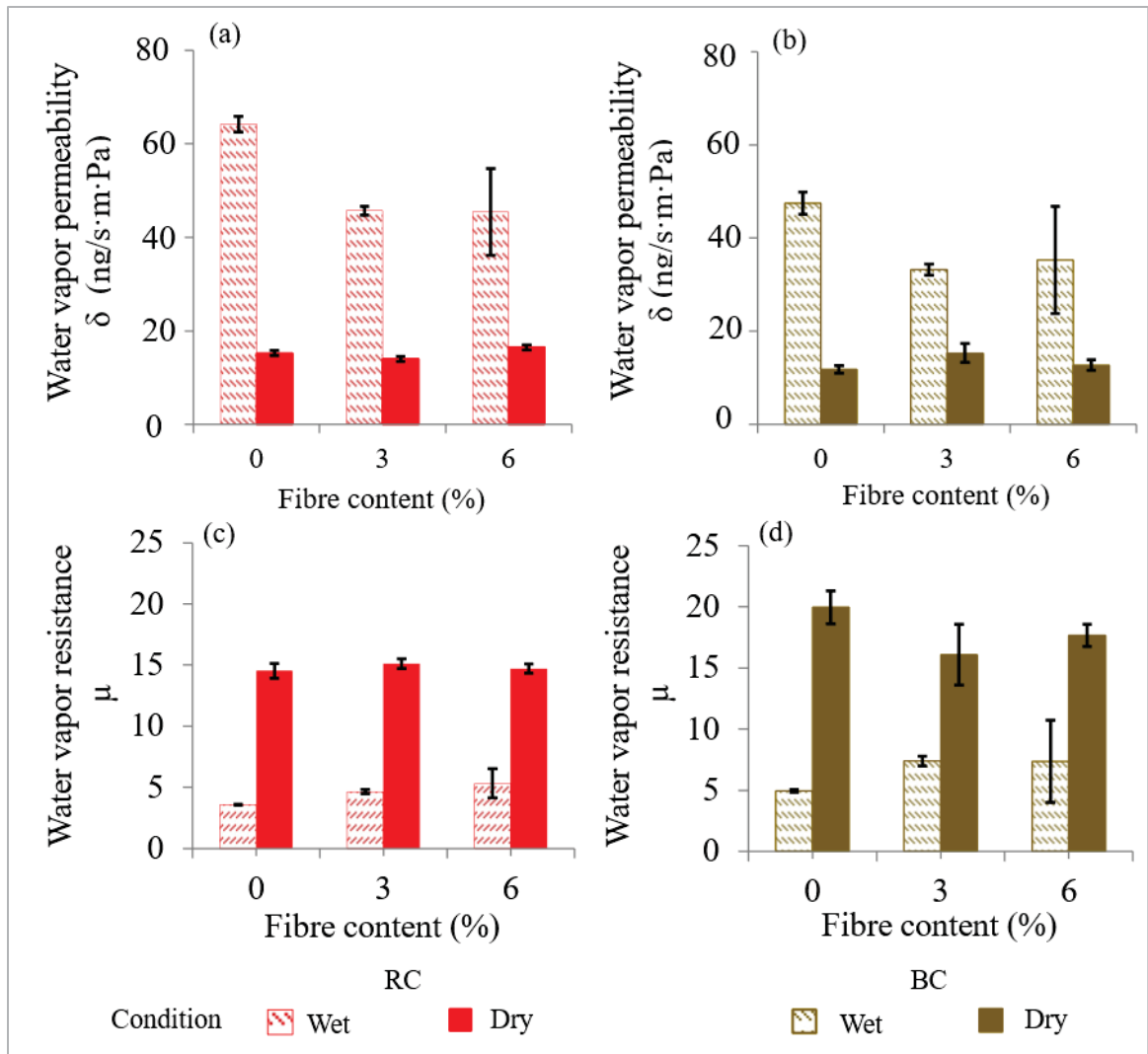


Figure 4.10 Average values of water vapor permeability and water vapor resistance of (a and c) red and (b and d) beige clay samples

4.6.4.3 Moisture buffer value

Figure 4.11 shows the average moisture buffer value (MBV) of each mixture with and without fibres. The experimental moisture buffer values (MBV_{exp}) of the samples are excellent. The MBV of the red clay samples without and with 3%wt fibre is higher than that of the beige clay. On the other hand, with 6%wt fibre in the mix, the MBV values of the beige clay samples are higher than those of the red clay. The samples formulated without fibre reinforcement have higher moisture buffer values than those reinforced with 3%wt and 6%wt fibre. The MBV

values of all samples obtained after the tests are excellent according to the NORD test criterion (value greater than $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$) (Rode et al., 2005). The average results are $6.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$ and $4.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$ for the 0%wt fibre samples (red and beige clay, respectively), $5.53 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$ and $2.78 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$ for the 3%wt fibre samples and $3.19 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$ and $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$ for the 6%wt fibre samples, respectively.

The effect of fibres on MBV in earthen materials reinforced with 3%wt and 6%wt barley straw was studied by Laborel-Préneron et al. (Laborel-Préneron et al., 2018), and a 21% decrease in MBV was observed with the addition of 6%wt barley straw. In the present study, adding 6%wt wheat fibre to red clay samples resulted in a 47% reduction in MBV value, while beige clay samples only led to a 5% reduction. This is due to the influence of the fibres on the water vapor permeability and density of the samples. These coefficients are two major factors of the MBV value of the building materials.

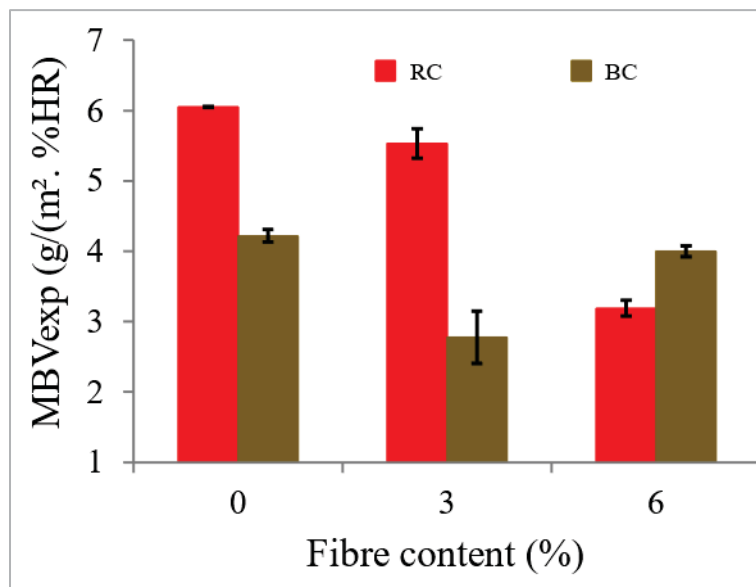


Figure 4.11 MBV moisture buffer value of cob and clay materials

4.6.4.4 Sorption/desorption isotherms

Figure 4.12 shows the sorption/desorption curves determined for the 0%wt, 3%wt, and 6%wt fibre samples and Table 4.4 shows the hydic properties determined according to the equations in Section 4.5.2.7. These properties represent the ability of materials to absorb and release moisture when a change in relative humidity occurs in their environment. The observed difference in Figure 12d can be attributed to the use of shorter fibres in the fabrication of the beige clay samples containing 3% fibres, compared to the first samples tested (results in Figures 12a, 12b, 12c, 12e, and 12f). This modification results in a more pronounced hysteresis phenomenon than in the other absorption/desorption curves. This phenomenon is often related to the geometry of the pores, where the voids are interconnected by narrower passages, due to the short length of the fibres used in the formulation of these samples. The theoretical moisture buffer values (MBV_{Theor}), moisture effusivity (b_m), and moisture diffusivity (D_w), and equivalent moisture penetration depth ($dp_{1\%}$) values were calculated considering the moisture capacity (ξ) between 33% and 75%RH.

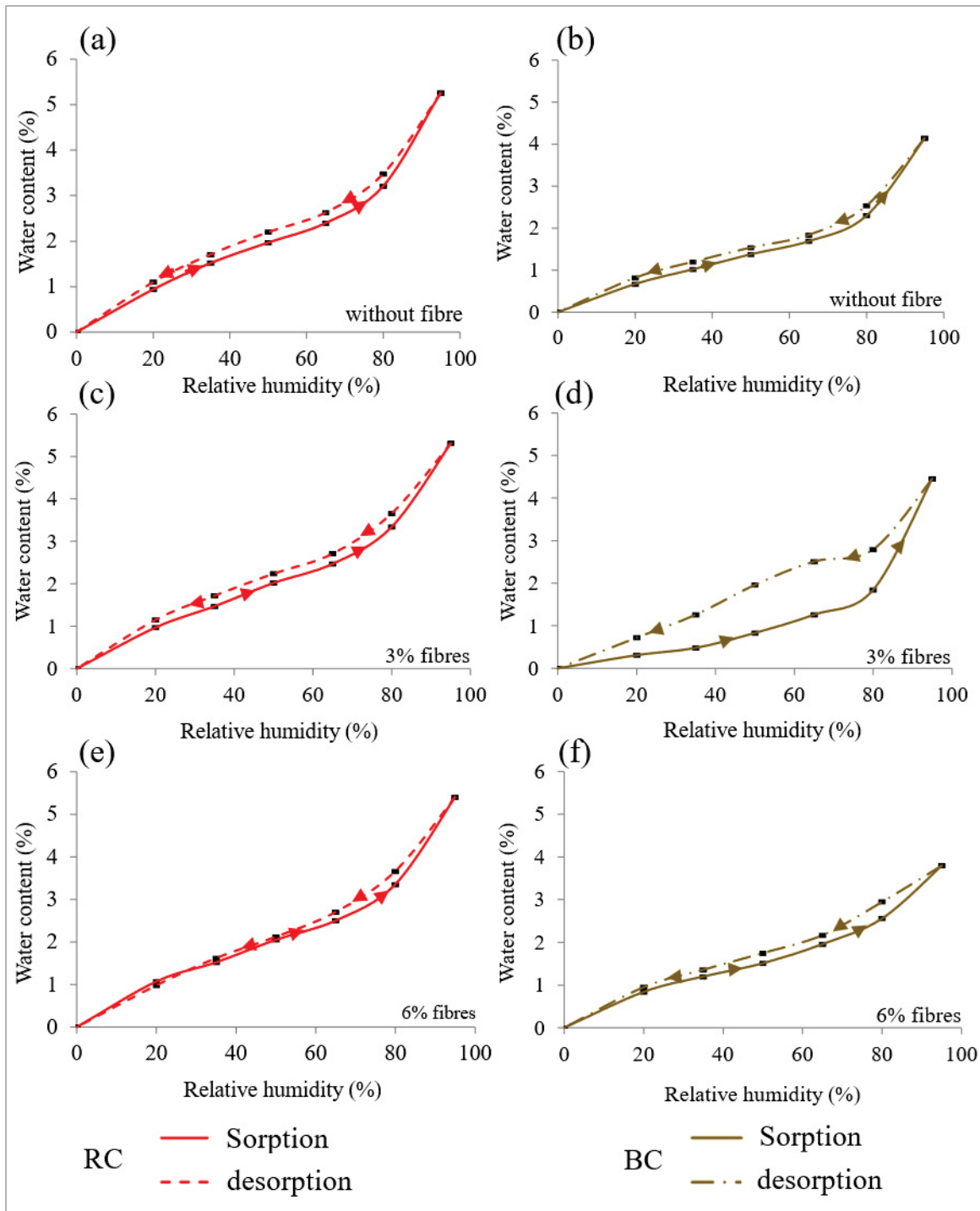


Figure 4.12 Sorption/desorption curves for (a, c, and e) red and (b, d and f) beige clay samples

Tableau 4.4 Calculated hydric properties and experimental for MBV_{exp}

Type of clay	Fibre (%wt)	ζ (kg/kg)	b_m (kg/m ² . Pa. s ^{1/2})	D_w (m ² /s)	$d_{p1\%}$ (cm)	MBV _{Theor} (g/m ² .%HR)	MBV _{exp} (g/m ² .%HR)
Red	0	0.198 ± 0.0006	9.57×10^{-07} ± 4.79×10^{-08}	4.49×10^{-09} ± 7.63×10^{-10}	2.27 ± 0.12	4.47 ± 0.17	6.05 ± 0.01
	3	0.0277 ± 0.0054	8.64×10^{-07} ± 8.69×10^{-08}	2.80×10^{-09} ± 4.75×10^{-10}	2.24 ± 0.05	4.04 ± 0.05	5.53 ± 0.21
	6	0.0306 ± 0.0010	8.37×10^{-07} ± 9.83×10^{-08}	2.95×10^{-09} ± 5.19×10^{-10}	2.17 ± 0.18	3.91 ± 0.34	3.19 ± 0.11
Beige	0	0.0145 ± 0.0005	6.93×10^{-07} ± 3.86×10^{-08}	4.70×10^{-09} ± 9.35×10^{-10}	2.47 ± 0.14	3.24 ± 0.19	4.22 ± 0.09
	3	0.0232 ± 0.0019	6.61×10^{-07} ± 3.52×10^{-08}	2.52×10^{-09} ± 1.58×10^{-10}	2.68 ± 0.10	3.09 ± 0.17	3.02 ± 0.63
	6	0.0242 ± 0.0010	6.47×10^{-07} ± 1.06×10^{-07}	2.98×10^{-09} ± 7.49×10^{-10}	2.29 ± 0.10	2.78 ± 0.37	4.00 ± 0.08

All red clay samples have higher experimental and theoretical MBV values than beige ones. The experimental MBV values are significantly higher than the theoretical MBV values obtained. The ANOVA test also showed a significant difference between the experimental and theoretical data ($n = 6$, $\alpha = 0.05$, p -value = 0.001, Table AB-5, for supplementary information). This can be explained by the fact that ideal experimental conditions are rarely met, and film resistance due to the limited air layer on the sample exchange surface can affect measurement results (Gómez et al., 2011). The buffering capacity of construction materials helps to moderate indoor humidity fluctuations and reduce relative humidity peaks inside buildings (Kreiger & Srubar III, 2019; Laborel-Préneron et al., 2018; M. Zhang, Qin, Rode, & Chen, 2017). Research has shown that the moisture buffering value is affected by the thickness of materials (Khaled, Collet, Prétot, & Bart, 2023). Understanding moisture buffering in materials is important for building design and energy efficiency considerations. The moisture diffusivity

(D_w) and moisture effusivity (bm) decrease with the fibre content, in contrast to the specific moisture capacity (ξ), which increases with increasing fibres in the mixture.

The equivalent moisture penetration depth ($dp_{1\%}$) represents the minimum thickness that allows an uncoated wall to easily benefit from the moisture buffering effect to regulate the inside humidity (Collet & Pretot, 2012). In the context of building materials, the degree of moisture penetration is an important factor to consider to prevent issues such as water damage, mold growth, and structural decay. Controlling the equivalent moisture penetration depth is crucial for maintaining the integrity and longevity of buildings (Rode et al., 2005; Woods, Winkler, & Christensen, 2013). However, the available information on this coefficient in the literature only pertains to earth plasters without fibre additives for earth-based materials, specifically, in a study cited as (Maskell, Thomson, Walker, & Lemke, 2018). In that study, the effect of adding fibres to clay samples was evaluated, and it was found that such an addition did not influence the equivalent moisture penetration depth ($dp_{1\%}$). Understanding the equivalent moisture penetration depth is crucial for selecting an appropriate wall thickness that optimizes the moisture buffering capacity of clay-based construction materials and other similar materials (Maskell et al., 2018).

Figure 4.13 shows the influence of relative humidity on the hydric properties of the samples. The specific moisture capacity, MBV, and moisture effusivity values of the samples show an increase in the 50 to 95%RH relative humidity range. However, within the same relative humidity range, the moisture diffusivity decreases. These observed trends align with previous research, indicating that an increase in fibre content in samples leads to a decrease in both moisture diffusivity and moisture effusivity (Collet & Pretot, 2012; Gómez et al., 2011; Le, 2010; Rahim et al., 2015).

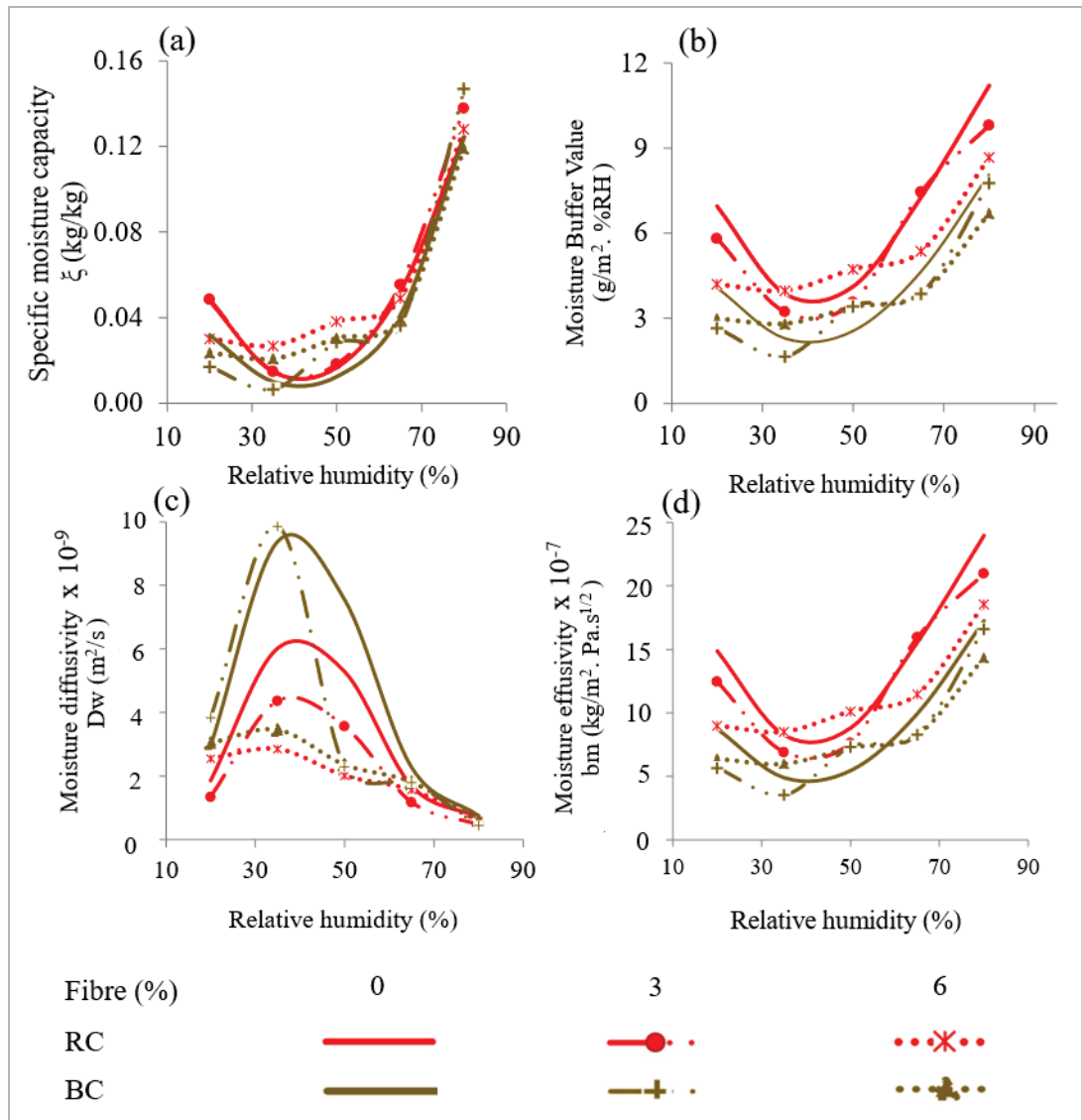


Figure 4.13 Evolution of hydric properties with an increase in relative humidity: a) specific moisture capacity, b) moisture buffer value, c) moisture diffusivity, and d) moisture effusivity

Figure 4.14 shows the evolution of the equilibrium water content as a function of relative humidity. The sorption and desorption processes were very fast for each humidity step. From 20 to 95%RH, it took 50 days to reach the end of the sorption test and less than 50 days to lose the relative humidity absorbed during the test. Equilibrium is reached when the variation in the mass of the test samples does not exceed 0.0005% for each humidity level. The attainment of equilibrium moisture content over time for samples subjected to increasing and decreasing relative humidity demonstrates that the response of the samples to a change in relative humidity

is quite rapid and that equilibrium moisture values stabilize within four to eight days. These samples are capable of releasing the absorbed moisture during the sorption tests in less than eight days for each 15% reduction in relative humidity at each interval (Figure 4.14). This shows that these samples can easily regulate indoor humidity. No mold was observed during the tests (Visual inspection at each humidity level), which indicates that cob materials can regulate moisture up to 95%RH without damage. The test results show an increase in the moisture absorbed by the samples without fibres as compared to the samples made with fibres. Its increase may be due to the fact that the small pores, with a higher specific surface area per unit volume, are favorable for water absorption (L. Wang et al., 2023).

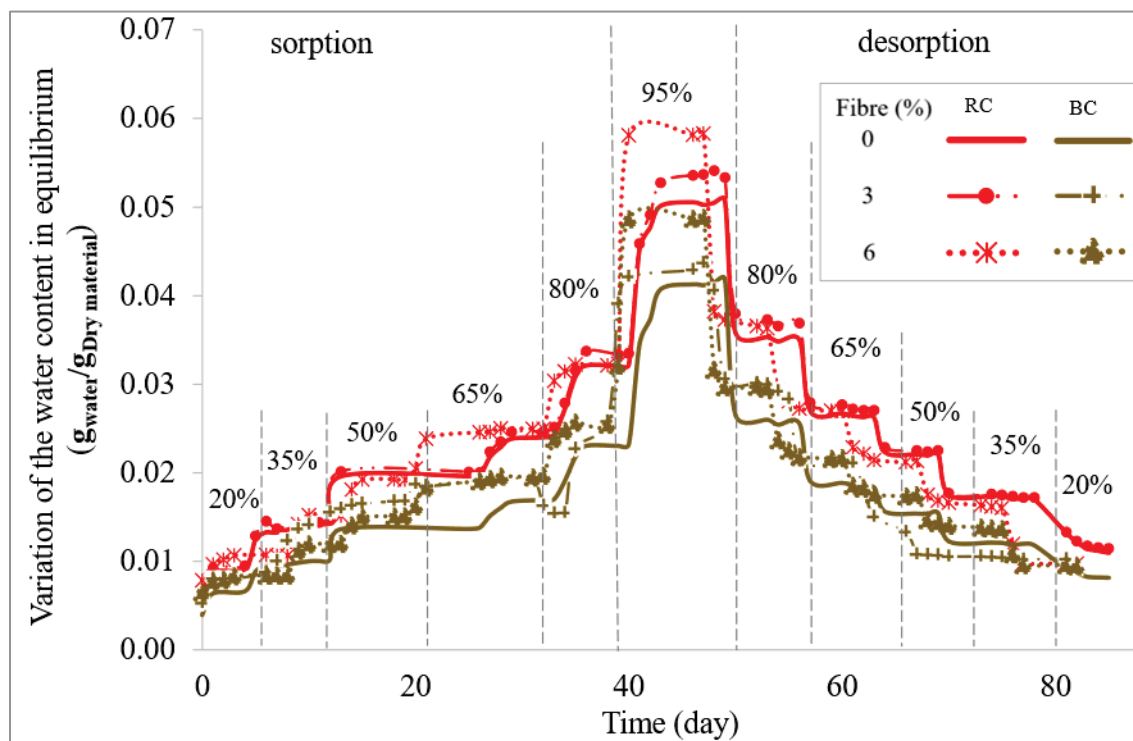


Figure 4.14 Variation of the water content at equilibrium with increasing or decreasing relative humidity

4.6.5 Cob and interactions with humidity

The correlation between the variation in thermal and hygroscopic performance of clay and cob samples is complex and is closely linked to moisture content and the presence of fibres

(Figures 4.7 and 4.8). Samples with a higher fibre content (6 % wt) show an increased capacity to absorb moisture (Table 2), which increases thermal conductivity. This effect is due to the enlargement of pores created by the fibres, allowing water vapor to replace air. When samples are exposed to a relative humidity of 50% and 75%, their capacity to absorb water increases, significantly influencing their thermal properties.

The increase in thermal conductivity due to moisture temporarily improves heat transfer through the material. This can be beneficial for thermal comfort in winter, as it allows for better heat distribution. However, this same characteristic can lead to excessive heat loss in winter and overheating in summer, thus reducing the overall energy efficiency of the building. Meanwhile, the specific heat of the samples also varies according to fibre and moisture content, with significant increases (Figures 4.7c and 4.7d). A high thermal capacity allows the material to store more heat, which can improve indoor thermal stability.

Regarding hygroscopic properties, the addition of fibres decreases water vapor permeability (Table 4.3) due to capillary retention in small pores, which increases resistance to vapor diffusion. Reduced permeability is beneficial for preventing excessive moisture penetration, but it can also limit the material's ability to breathe, which is crucial to avoid moisture accumulation and potential material degradation. The moisture buffer value (MBV) is also affected by fibre content. Red clay samples without fibres exhibit higher MBV values than reinforced ones (Figure 4.11), which aligns with previous research showing that adding fibres can reduce MBV by increasing resistance to vapor diffusion. Overall, the correlation between thermal and hygroscopic performance of the samples is strongly influenced by fibre composition and water content, highlighting the importance of these factors in the design and optimization of clay and cob-based construction materials for optimal energy efficiency and moisture regulation.

4.6.6 Outside and inside temperatures in cob wall: experimental result

This section focuses on evaluating the temperature evolution of the outside, middle, and inside surfaces of a cob wall with 3%wt fibres. The thermal and hydric properties of the wall material are detailed in sections 6.6.3 and 6.6.4 of this article. Figure 4.15 illustrates the temperature variation on the outside, middle, and inside surfaces of the cob wall during winter and summer.

The external temperatures are set at 20 °C and -5 °C for Djibouti and Johannesburg, respectively in winter, and 45 °C and 35 °C for the same cities in summer. The measurements spanned 168 hours, which is equivalent to one week.

For the City of Djibouti, the outside wall surface temperature varied from 33 °C to 43 °C in the dry season (Figure 4.15a), and between 20.3 °C and 20.4 °C in the cool season (Figure 4.15b). On the inside wall surface, the temperature varied between 21 °C and 23 °C. The maximum temperature of 23 °C was recorded at 8 p.m. on the first and third days of measurement before decreasing again (Figure 4.15a). These phenomena were also observed for the middle wall temperatures when the exterior surface temperature of the wall dropped sharply to 33 °C and 39 °C (Figure 4.15a). This phenomenon occurred due to a drop in the exterior environment temperature, set at 45 °C, caused by an air leakage issue, leading to a significant decrease in the exterior surface temperature of the wall during this period. For the City of Johannesburg, the outside wall surface temperature varied between 33.7 °C and 34 °C during the dry season (Figure 4.15c) and between -1.4 °C and -1.3 °C during the cool season (Figure 4.15d), an almost invisible, practically negligible variation. A slight temperature fluctuation was also observed on the inside surface of the wall during the dry season (from 21 °C to 21.1 °C) and during the cool season (from 19.5 °C to 19.6 °C), compared to the outside temperature set at 35 °C during the dry season and -5 °C during the cool season (Figure 4.15c and 4.15d).

In the middle of the wall, the temperature variation was almost negligible, indicating that the heat transfer through the wall was very slow, except for the temperature drop observed in Figure 4.15a. Fire resistance studies of composite earth materials have shown their ability to withstand fire and slow down heat penetration toward the unexposed face (Alabi, Babalola, Nwankwo, & Olatunji, 2014; Gonzalez-Lopez, Claramunt, Haurie, Ventura, & Ardanuy, 2021; Nguyen et al., 2016; Zhao et al., 2020). In-situ tests for cold climates have also provided reliable results for clay brick walls reinforced with plant fibres (Zhao et al., 2020). This can explain the low heat transfer towards the interior or the middle of the wall in our study.

These results show that a 15 cm thick cob wall exposed to low temperatures of -5 °C or high temperatures of +45 °C can maintain an inside temperature range of 19.5 to 23 °C for one

week. The cob materials manufactured for laboratory tests may be suitable for construction sites due to their ease of large-scale production. Furthermore, the tests walls have demonstrated good consistency between the wooden support and the cob materials made in the laboratory in terms of adhesion and non-detachment of the wooden supports and the material.

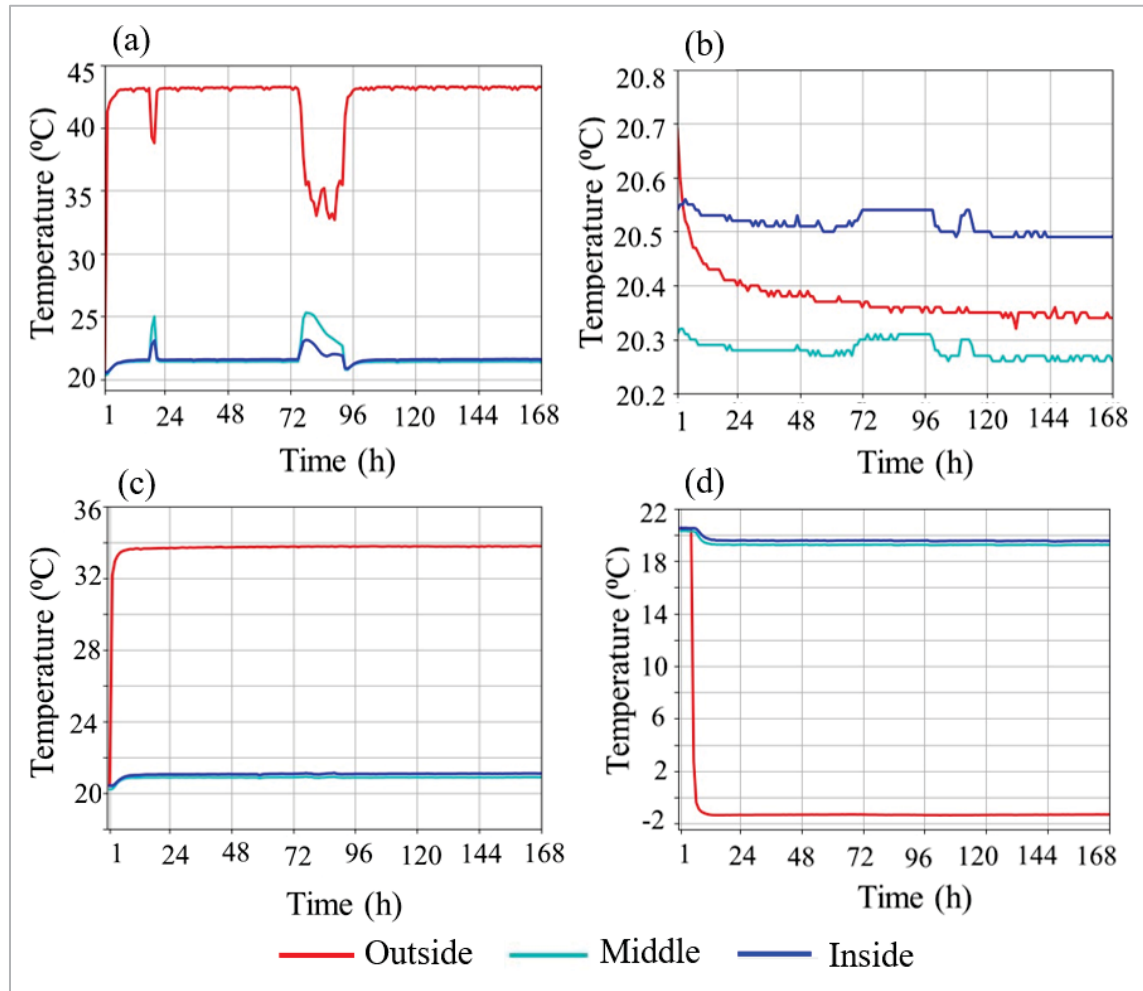


Figure 4.15 Evolution of cob walls temperatures: a) dry season and b) cool season for the City of Djibouti, and c) dry season and d) cool season for the City of Johannesburg

4.7 Conclusion

This study presents a series of experimental analyses of thermal properties as a function of moisture content and hygroscopic behaviour of samples with different relative humidity. The fibres were wetted before being used to make the samples. Clay mixture samples with 3%wt

and 6%wt fibre yielded interesting hygrothermal properties thanks to their ability to regulate high relative humidity without the risk of mold due to the presence of fibre. The effect of relative humidity on hygrothermal properties can therefore be summarized as follows.

- The thermal conductivity, specific heat, thermal diffusivity, and thermal effusivity increase with increasing water content. This phenomenon is attributable to the fact that the pores of the samples filled with air in the dry state are replaced by water vapor when exposed to increasing relative humidity.
- The moisture content of the samples reaches equilibrium around 4 to 8 days after the change in relative humidity, showing that the fibre-reinforced and fibre-free samples regulate the relative humidity well. Sorption tests showed that samples with 3% and 6% fibre can be exposed to very high relative humidity (80 to 95%) for more than two weeks without the risk of mold after a visual inspection.
- The samples studied exhibit an excellent moisture buffer value greater than 2 g/(m². %RH). This coefficient decreases for relative humidity between 20 and 50%RH and increases in relative humidity between 50 and 95%RH. The same trend was observed for the coefficients of specific moisture capacity and moisture effusivity, except that moisture diffusivity decreases with increasing relative humidity.
- Analysis of variance (ANOVA) and t-tests were used to demonstrate that the two clays have different hygrothermal behaviours. Also, the fibre content was confirmed to have a significant effect on hydric properties. However, the addition of fibres did not have an impact on the water vapor resistance factor (μ) and equivalent moisture penetration depth ($dp_{1\%}$) of all samples. The influence of surface film resistance on water vapor permeability was not considered in this study and is currently under investigation in our future work.
- The findings of the study on the 15 cm thick cob wall demonstrated the ability of cob to maintain a comfortable indoor temperature range of 19.5 to 23 °C for one week, even when exposed to extreme temperatures of -5 °C and +45 °C. These composite materials are suitable for constructing walls with a 15 cm or greater thickness. Their excellent thermal and moisture inertia make them an ideal choice for filling wood-frame

structures, offering an effective solution for sustainable and eco-friendly construction. Furthermore, these materials are cost-effective and have the potential to significantly reduce energy consumption in buildings, resulting in affordable, low-carbon footprint, and healthy structures.

The water vapor permeability determined for all samples in this study is the apparent water vapor permeability, thus it does not consider the influence of surface film resistance. It would therefore be necessary to evaluate the actual water vapor permeability of cob materials and their evolution depending on the water content to observe their reaction to external humidity and its influence on moisture buffer values. All the results presented in this article pertain to the cob formulated with wheat fibres. Therefore, it is necessary to conduct a comprehensive evaluation of cob made with other plant fibres, using the same formulation techniques, in order to expand their use in the construction field.

4.8 Acknowledgments

This work was financed by the Pôle de Recherche et d'Innovation en Matériaux avancés du Québec (PRIMA) and by NSERC-Alliance (CRSNG ALLRP 560404-20) and Mitacs (IT35572). It was also supported by the partners American Structures, Boralife, the Quebec Wood Export Bureau (QWEB), and ENERGIES 2050. The authors also thank SEREX for its participation in the hygrothermal properties measurements of the materials studied for this project and Patrick Brisebois, Ph.D., Chemistry, for reviewing and editing.

CHAPITRE 5

THE IMPACT OF VEGETABLE FIBRES ON THE SHRINKAGE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COB MATERIALS

Aguerata Kabore and Claudiane M. Ouellet-Plamondon

Department of Construction Engineering, Ecole de Technologie Supérieure, 1100 Notre-Dame Street, Montreal, QC H3C 1K3, Canada; claudiane.ouellet-plamondon@etsmtl.ca
Corresponding author: aguerata.kabore.1@ens.etsmtl.ca

Article publié dans « Materials », février 2024

5.1 Avant-propos

Les résultats sur la résistance mécanique des échantillons en argile et en torchis faisant partie de l'objectif spécifique 2 ont été présentés dans ce chapitre. Cette partie de l'étude a permis d'évaluer le taux de rétrécissement et les propriétés mécaniques des échantillons de torchis, en mettant en lumière l'impact des fibres végétales sur ces propriétés mécaniques. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de fibres améliore significativement les performances mécaniques et réduit le taux de rétrécissement des échantillons, tout en maintenant leur capacité à se déformer sans se casser. Cette étude contribuera à une meilleure compréhension des avantages du torchis et encouragera son adoption dans les pratiques de construction modernes, favorisant ainsi le développement de solutions plus respectueuses de l'environnement.

5.2 Résumé

Cette étude a examiné le taux de rétrécissement et les propriétés mécaniques des échantillons de torchis. Le torchis est un matériau de construction naturel composé d'argile, d'eau et de quantités variables de fibres végétales. Les matériaux de torchis rouge et beige de cette étude contenant 3 % et 6 % de fibres de blé ont été fabriqués à la main avec de l'argile, des fibres en vrac (fibres courtes et longues) et un rapport eau/argile de 25 % afin de rendre leur fabrication et leur utilisation sur les chantiers de construction faisables et simples. Les échantillons de

référence ont été mélangés avec de l'argile, 25 % d'eau et 0 % de fibres de blé. Les propriétés mécaniques ont été évaluées par des tests de compression et de flexion après 28 et 120 jours. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres a réduit la densité en vrac des composites de 1902 kg/m^3 à 1264 kg/m^3 . La résistance à la compression est passée de 1,8 MPa à 4,57 MPa pour les échantillons d'argile rouge et de 1,65 MPa à 4,61 MPa pour les échantillons d'argile beige à 28 jours. La résistance à la compression de chaque mélange a légèrement diminué avec l'âge pour les échantillons d'argile rouge et beige, respectivement. En revanche, la résistance à la flexion a augmenté avec l'âge pour les échantillons renforcés de 3 % et 6 % de fibres. Les résultats ont également montré que les échantillons de torchis peuvent se déformer sans se casser. L'augmentation de la teneur en fibres dans le mélange a entraîné une réduction significative du taux de rétrécissement et une augmentation du taux de perte de masse lors de l'analyse thermogravimétrique. Cette analyse a montré une perte de masse totale d'environ 5,64 %, 6,12 % et 44,87 % pour l'argile rouge, l'argile beige et les fibres, respectivement. Un rétrécissement volumique moyen de 1 % a été observé pour les échantillons avec une teneur en fibres de 6 %. Le torchis discuté dans cet article peut être utilisé comme matériau de remplissage. En grande quantité, il peut être fabriqué à la main, les pieds protégés par des bottes, ou avec l'utilisation d'un mélangeur. Les avantages environnementaux sont considérables, car les matières premières sont renouvelables et le processus de fabrication est moins énergivore.

5.3 Abstract

This study examined the shrinkage rate and mechanical properties of cob samples. Cob is a natural building material composed of clay, water, and varying amounts of plant fibres. The red and beige cob materials in this study containing 3% and 6% wheat fibres were manufactured by hand with clay, bulk fibres (short and long fibres), and a 25% water ratio (water/clay) in order to make their manufacture and use on construction sites feasible and simple. The reference samples were mixed with clay, 25% water, and 0% wheat fibre. The mechanical properties were assessed through compression and flexural tests after 28 and 120 days. The results showed that the fibre addition decreased the bulk density of the composites from 1902 kg/m^3 to 1264 kg/m^3 . The compressive strength increased from 1.8 MPa to

4.57 MPa for the red clay samples and from 1.65 MPa to 4.61 MPa for the beige clay samples at 28 days. The compressive strength of each mixture decreased slightly with age for the red and beige clay samples, respectively. Conversely, the flexural strength increased with age for the samples reinforced with 3% and 6% fibres. The results also showed that the cob samples can deform without breaking. Increasing the fibre content in the mix resulted in a significant reduction in the shrinkage rate and an increase in the mass loss rate during thermogravimetric analysis. This analysis showed a total mass loss of approximately 5.64%, 6.12%, and 44.87% for the red clay, beige clay, and fibres, respectively. An average volume shrinkage of 1% was observed for the samples with 6% fibre content. The cob discussed in this article can be used as a filling material. In large quantities, it can be made by hand, with feet protected by boots, or with the use of a mixer. The environmental benefits are considerable, as the raw materials are renewable, and the manufacturing process is less energy-intensive.

Keywords: mechanical properties; cob; ductility; volume shrinkage; thermal gravimetric analysis

5.4 Introduction

Earthen construction has recently been attracting increased attention due to its low environmental impact and recyclability. The last decade witnessed growing interest in using ecological and sustainable building materials, driven by the specific requirements for more sustainable and energy-efficient building techniques for the building and construction industry (Aymerich, Fenu, Francesconi, & Meloni, 2016). Clay-based materials bring significant reductions in environmental and climate impacts due to their low carbon footprint (Ramakrishna, Pervaiz, Tjong, Ghisellini, & Sain, 2021). This is also due to their low to near-zero toxicity, high recyclability properties, low transportation costs, and the high energy efficiency and environmental compatibility of the manufacturing processes of various earthen materials (Aymerich et al., 2016; Ruiz, Zhang, Edris, Cañas, & Garijo, 2018). Indeed, the construction of one square meter of masonry with compressed earth bricks consumes about 15 times less energy than that of an equal volume of fired bricks (Reddy, Leuzinger, & Sreeram, 2014). Similarly, a case study on three buildings a three-story adobe building, a conventional

fired clay brick building, and a concrete frame building showed that the embodied energy of the adobe building was three times less than that of the conventional building and ten times lower than that of the reinforced concrete frame building (Reddy et al., 2014).

Earth is thus being used as a building material in various forms, with recent research focusing on characterizing rammed earth, adobe, and several types of compressed earth blocks (Avila, Puertas, & Gallego, 2021; Azil et al., 2022; G Giuffrida, Caponetto, & Cuomo, 2019; Teixeira et al., 2020). However, few studies have been conducted on the characterization of cob, which is traditionally made from clay soil and bulk fibres mixed with water. Its use as an infill material for wooden structures represents a logical solution because the raw materials involved are clay soil and vegetable fibres, which are abundant and locally available. Several studies have conducted static and dynamic load tests on cob walls to assess their mechanical performance (Miccoli, Müller, & Fontana, 2014; Quagliarini & Maracchini, 2018; Rafi & Lodi, 2017; Sen & Saha, 2022) and have found that a compressive strength of 0.6 MPa and a flexural strength of less than 1 MPa are sufficient to provide a safety margin for cob buildings that are at least two stories high, in a non-seismic region (Miccoli et al., 2014; Paquet, 2020; RB299-19_IRC, 2019). In addition, cob material and cob walls exhibit good shear behaviour and a long post-peak plastic phase when subjected to flexural tests, which are important characteristics for building materials in seismic zones (Miccoli et al., 2014). Studies on various cob walls have shown that a cob comprising 1.5% straw fibre can withstand high loads with negligible deformation, meaning that buildings constructed with this material can deform without collapsing (Sangma & Tripura, 2020). Cob buildings can be found in Europe, including Germany, France, and Great Britain; in addition, some are listed as UNESCO World Heritage sites in the World Heritage Earthen Architecture inventory (Hamard et al., 2016).

Construction techniques using clay and clay reinforced with plant fibres, such as wood/clay or wood/cob construction, are currently considered sustainable construction practices. However, it is important to note that buildings with significant residual deformations compromise the viability of a durable and resilient city, as well as the lives of its occupants, as their reconstruction after an earthquake requires a lot of time and social resources (Meng, Xiong, Zhong, Duan, & Li, 2023; Wang & Zhao, 2018). Therefore, studies have been carried out that

show that wood and cob construction extend the lifespan of the building by providing good seismic resilience in its structure (Tomovska & Radivojević, 2017). The walls in a wood structure using clay reinforced with plant fibres as a wood-frame filling material are soundproof, termite-resistant, and chemical-free, and the wooden framework offers good seismic resilience in the building structure (Meng et al., 2023; Meyer, 2010b; Tomovska & Radivojević, 2017; Wang & Zhao, 2018). Regarding weather resistance, the wooden structure of cob buildings includes a system of diagonal, horizontal, and vertical joints in the corners to be earthquake-resistant (Cuitiño Rosales, Maldonado, & Esteves Miramont, 2014; Huang, Wu, Li, Sun, & Chen, 2018; Wafer, 2010b). This diagonal system has flexibility and the necessary strength to support seismic forces during an earthquake. A study conducted on a prototype cob house with a bamboo diagonal system and other studies on wooden and iron systems showed that dynamic tests of the cob model indicated the superior seismic performance of the cob structure (Bothara, Ingham, & Dizhur, 2022; Miccoli et al., 2014; Rafi, Lodi, & Qazi, 2021; Rios & O'Dwyer, 2020; Sangma & Tripura, 2021). A study on the behaviour of pultruded glass fibre-reinforced polymer beam columns for structural building design also demonstrated that these types of beams could be used as lightweight structural components in buildings located in earthquake-prone areas (Chinnasamy, Joanna, Kothanda, Gurupatham, & Roy, 2022). Due to its lightness and strength, this type of beam can be used in the design of cob-building structures. Before this project study design, an analysis of the measurements of the wooden structure was conducted so that the cob walls would meet the necessary seismic performance for a two-story construction. Despite the fact that studies have been conducted on the combined horizontal and vertical diagonal wooden frame system, a study on diagonally combined systems with a horizontal cob-filled system is necessary to determine the performance of wood/cob walls in seismic zones, given that horizontal systems are considered at risk during long-duration subduction earthquakes (Pan, Ventura, & Tannert, 2020).

To highlight the mechanical behaviour of vegetable-fibre-reinforced clay materials, several studies have also been conducted on the compressive and flexural strength of different clay mixtures with and without fibres. These studies aim at investigating the use of compressed earth blocks reinforced with plant fibres and consider factors such as fibre length and addition rates (Makomra et al., 2022; Millogo et al., 2014). Some studies have found that the addition

of fibres in compressed earth blocks helps limit crack propagation (Millogo et al., 2014). Furthermore, it has been observed that the inclusion of cannabis hibiscus fibres with a length of approximately 3 cm and an addition rate of 0.4-0.5 % improves both the compressive and flexural strengths. However, beyond these levels, the compressive strength tends to decrease (Millogo et al., 2014; Toguyeni, Lawane, Zoma, & Khamis, 2018). These works highlight the issue of finding the optimal fibre ratio to achieve good mechanical strength. However, in most fibre-reinforced earth construction sites, fibre length measurement is often overlooked, and these fibres are used in bulk for mixing without considering their specific lengths. A study using varying ratios of rice and sugarcane fibres without specifying the length of reinforcing fibres in clay earth materials showed that the increase in the fibre content in the clay earth mixture improved the compressive strength compared to without fibre-reinforced earth materials (Lertwattanakruk & Choksiriwanna, 2011). According to the study, longer and less porous fibres have a positive effect on the compressive and flexural strengths, enabling the achievement of high compressive strength, even when the mixtures have a large fibre content. In another study, lavender and barley fibres measuring approximately 1 cm in length were used as reinforced fibres in clay materials at percentages of 3% and 6%. The study found that the bricks with 6% fibre exhibited a higher compressive strength than the bricks with 3% fibre (Giroudon, Laborel-Préneron, Aubert, & Magniont, 2019). Another author observed a 10 to 20% increase in compressive strength when adding barley fibres measuring 20 mm to 40 mm in length at a percentage of 1.5% (Bouhicha, Aouissi, & Kenai, 2005). However, for the same fibre length, the compressive strength decreased with the addition of 3 to 5% barley fibre. The reported effect of the plant fibre addition on compressive strength varies from one author to another. Variations in results among different authors can be attributed to differences in the manufacturing techniques used for the test samples, as well as the types and lengths of fibres used. Notwithstanding all these studies, challenges remain when it comes to the full utilization of the potential of cob materials in modern building construction. These challenges include difficulties in reproducing these materials in a real-world setting, taking into consideration the fibre length and the diversity of fabrication techniques of the study samples. In this study, bulk wheat fibres (short fibres + long fibres) were used by adopting the traditional cob-making technique for all mixtures. The length of the fibres was not considered in order to allow the

easy reproduction of the two materials obtained in large quantities for construction at building sites. The selection of red and beige clays was based on their widespread use in earthen construction across Africa and other continents. This choice aims to ensure the replication of the materials obtained. The cob mix was manually prepared by hand, with a shovel, and by foot, with the option to use a concrete mixer for large-scale mixing. The manual method was used to ensure that reproduction on different construction sites in Africa can be realized without constraints. The wheat fibres added to the mixture in this study were chosen based on their availability. The tests focused on heavy cob mixes intended for filling the structure of timber-framed buildings, following local construction practices. However, further studies should be conducted by formulating cob mixes with different types of fibres (long + short), using the same sample formulation method to ensure that most plant fibres from various African countries and other continents can be used in the production of cob material under real conditions. The purpose of this study was to investigate the mechanical strength of specimens in cob and clay, the volumetric shrinkage during curing, and post-cracking performance when the specimens were subjected to four-point compression and bending tests at low speeds. The mechanical properties presented in this paper are the average compressive and flexural strength of three replicates of the samples made with 0%, 3%, and 6% wheat fibre (samples left in ambient air for 28 days and 120 days) and the evolution in the volume shrinkage with the drying time.

The studies conducted as part of the present work on the mechanical resistance of the cob are meant to encourage the use of cob as a more environmentally friendly alternative to modern construction materials and to include it among bio-based and geo-sourced materials. Bio-sourced materials come from plants, animals, or microorganisms (Dubois & Lebeau, 2014), while geo-sourced materials come from the Earth, such as stone, clay, sand, and other materials obtained from the Earth's crust (Přikryl, Török, Theodoridou, Gomez-Heras, & Miskovsky, 2016). Understanding how cob reacts to mechanical stresses such as compression and flexion makes it possible to integrate cob optimally in the design and construction of buildings. Mechanical resistance tests on the cob provide scientific data on the limits of the loads it can withstand while maintaining structural integrity, as well as a simpler, more reproducible method. These studies would contribute to its recognition as a legitimate construction material

that can be used in various applications, such as houses, public buildings, and ecological and sustainable structures. The results of the tests could then also serve as a source of inspiration for innovation in construction techniques and enrich engineering and architecture training programs by providing practical knowledge about traditional materials and their modern applications. Therefore, mechanical resistance tests play a key role in the development and innovation of sustainable construction practices while supporting heritage preservation and advancing scientific knowledge in the field of cob construction. This should position cob as a reliable and viable construction material for hybrid construction. The wood and cob construction would combine the advantages of modern and traditional construction methods. On the one hand, wood construction is favoured for its mechanical performance and economic efficiency; on the other hand, cob construction reinforced with plant fibres is recognized for its ecological and bioclimatic qualities, as indicated in the work of Belabid et al. (Belabid, Akhzouz, Elminor, & Elminor, 2023).

5.5 Materials and methods

5.5.1 Clay and fibres properties

The two types of clay and the wheat fibre used for the test samples came from Alberta and Quebec, respectively (C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023). The density of the two clays was determined by means of the pycnometer method. For this, a 200 g mass of each clay was taken directly from bags and dried in an oven for 24 h at 110 °C. After drying, each clay quantity collected was separated into four 50 g parts after drying, and three parts of each type of clay were used for testing (A Kaboré & Ouellet-Plamondon, 2021). Tests were carried out following the ASTM D854 guidelines (D854-14, 2014).

To determine the fibre absorption coefficient, tests were carried out following ASTM D2654 guidelines (D2654-22, 2022). The value of the water absorption coefficient, obtained after immersing the fibres in distilled water for 25 min, was used as the water-to-fibre ratio for wetting the fibres before manufacturing test samples (A Kaboré & C. Ouellet-Plamondon, 2021).

5.5.2 Mineralogical composition

The mineralogical composition of the clays was determined by X-ray diffraction (XRD), and their chemical composition was analyzed by X-ray fluorescence (XRF) on powdered samples (0–63 μm) selected directly from the clay bags. For the tests, 5 g of each sample was prepared with 25 mL of isopropanol using the XRD mill McCrone apparatus (McCrone group, Westmont, USA). The tests were performed with the Bruker D8 Advance apparatus (Bruker Corporation, Billerica, Massachusetts, USA), operating at 40 kV and 40 mA with a Cu source. The tests were performed to identify the main crystalline phases. XRD patterns were measured from 5 to 70° 2θ , with a step size of 0.020° 2θ , at a scan speed of 15 tr/min. Crystalline phases were identified by analyzing the peak positions. In X-ray diffraction (XRD), 2θ refers to the angle of diffraction. When X-rays are diffracted by a crystal lattice, the resulting diffraction pattern is observed at an angle of 2θ (Bunaciu, UdrişTioiu, & Aboul-Enein, 2015; Epp, 2016). This angle is used to determine the spacing between crystal lattice planes and is a key parameter in XRD analysis (Ameh, 2019).

5.5.3 Thermogravimetric Analysis (TGA/DTG)

A thermogravimetric analysis (TGA) was performed using a Perkin Elmer STA8000 instrument (PerkinElmer, Inc, Billerica, Massachusetts, USA). The objective was to determine the weight loss and endothermic reactions of the clay and fibres used in the fabrication of the test samples. The clay samples used for the tests had an average mass of 10 mm to 15 mg and were subjected to heating between 30 °C and 1000 °C at a heating rate of 10 °C/min under an inert gas (nitrogen) of 50 mL/min. The fibres were also subjected to this test.

5.5.4 Production of Test Samples

The procedure for mixing the clays, water, and fibres (0%, 3%, and 6% by mass of fibres) to manufacture the specimens was carried out using the cob manufacturing technique (Volhard, 2016). First, we mixed clay and 25% water (water/clay ratio) before adding moistened wheat

fibres at 205% water (water/fibre ratio). Before filling the frames, there was a resting period of 2 h to 3 h after the clay–water–fibre mixture was made. These samples were immediately demoulded and placed in an oven for 10 to 11 h at a temperature of 30 °C. After 10 to 11 h, they were removed from the oven, and drying continued in ambient air (23 °C) until the day of testing. Cylindrical specimens 150 mm in height and 76 mm in diameter were made for the compression tests, and rectangular specimens measuring 150 mm × 38 mm × 38 mm were made for the bending tests. Table 5.1 presents the proportions of the mix composition for the fabrication of the samples. Additionally, it is worth noting that all the mixtures had the same water/clay and water/fibre ratio. The steps of the procedure for mixing the components of the clay cob samples, including the duration of each step, are presented in Table 5.2. Figure 5.1 shows photographic images of (a) the compressive strength samples before surface smoothing, (b) and (c) the samples ready for testing, and (d) the flexural strength samples.

Tableau 5.1 Mix proportions (grams)

Fibre Content (%) (Fibre/Clay)	Clay Mass	Water Mass (Water/Clay = 25%)	Mass of Wheat Fibre	Mass of Water for Wheat Humidification Water/Fibre = 205%
0	5000	1250	0	0
3	4850	1212.5	150	307.5
6	4700	1175	300	615

Tableau 5.2 Sample production steps

Steps	Description	Step Duration
1	Fibre humidification	1 to 2 h
2	Mixture of clay and water	Approx. 15 min
3	Addition of fibre: mixing clay, water, and humidified fibres to obtain a homogenous mixture	Approx. 15 to 20 min
4	Total mixture rest time	2 to 3 h

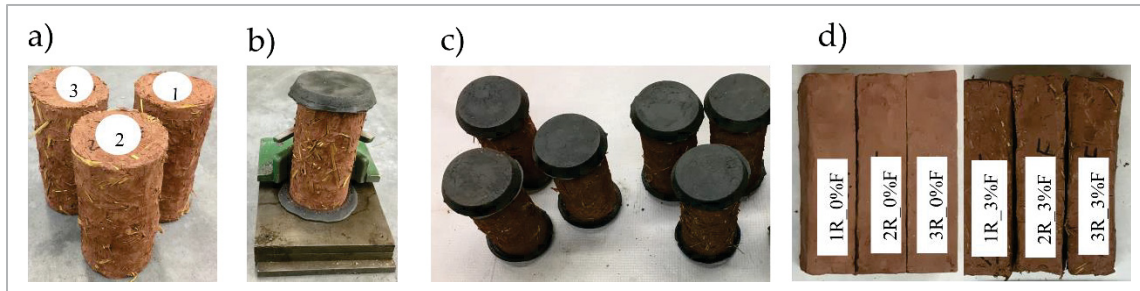


Figure 5.1 Photographic images of (a) the compressive strength samples before surface smoothing, (b,c) the samples ready for testing, and (d) the flexural strength samples

5.5.5 Volume shrinkage measurements

The volume shrinkage (R_v) caused by drying, which is the dimensional change from the wet to the dry state of the material, is calculated by Equation 5.1 as a function of the drying time, following the ASTM C157 standard guidelines (ASTM C157 / C157M-17, 2017a), where V_0 is the initial volume, and V_f is the volume after drying:

$$R_v = \frac{V_0 - V_f}{V_0} \times 10 \quad (5.1)$$

5.5.6 Mechanical Measurements

The tests were conducted on samples aged for 28 days and for 4 months, respectively, to observe the influence of aging on the mechanical properties. Compressive strength tests were performed following the ASTM C39/C39M standard (ASTM C39/C39M, 2020), with a load rate of 0.5 kN/s, using a Matest uniaxial compression tester requiring smooth surface samples. Therefore, all samples were first smoothed by placing 145 °C molten sulphur mortar on both surfaces that would be in contact with the tester (see Figure 5.1b). The compressive strength was then calculated using Equation 5.2, knowing the maximum load at the end of the test and the diameter of the sample:

$$f_{cm} = \frac{4000 \times F_{max}}{\pi \times D^2} \quad (5.2)$$

where f_{cm} is the compressive strength in MPa, D is the diameter in mm, and F_{max} is the maximum load at the break in kN.

Flexural tests were performed following the standard ASTM C78/C78M (ASTM C78/C78M, 2021) using a manual four-point flexural strength tester (ME-8236 (Ayva Educational Solutions, Oakville, Canada) of a 50 kN load cell. For bending tests, the samples did not require smooth surfaces (Figure 5.1d). The principle of the test with this apparatus is to determine the maximum load of the failure of specimens placed on two upper supports and two lower supports, with force applied to the middle of the two upper supports under a constant displacement speed of 1 mm/min on average. The distance between the two upper supports was 30 mm, and the distance between the lower supports was 90 mm. Equation 5.3 was used to calculate the flexural strength after failure:

$$f_{cf} = \frac{F_{max} \times L}{b \times d^2} \quad (5.3)$$

where f_{cf} is the flexural strength in MPa, L is the span length in mm, b is the nominal width of the samples in mm, and d is the depth (thickness in mm). An ANOVA and a t -test were conducted on the mechanical strength results to determine the significant and non-significant differences in the results based on the fibre content and the sample age.

5.6 Results

5.6.1 Physical, Mineralogical, and Chemical Characterization

The density obtained after the tests was 2790 kg/m³ for the red clay and 2722 kg/m³ for the beige clay. For the initial water content, the red clay and the beige clay had initial values of 1.68% and 1.12%, respectively. The density of the clays was used to calculate the total quantity of clays required to produce the test samples. The mineralogical characterization results of the clays by X-ray diffraction (XRD) are presented in Table 5.3 and Figure 5.2. The two clays are distinguished by their mineralogical composition, with the common dominant component being quartz, at 43%. The main minerals of the red clay are quartz, muscovite, illite, and small

quantities of kaolinite and hematite. For the beige clay, quartz, kaolinite, muscovite, and illite are the main minerals, and hematite is the only trace element. The presence of these mineralogical elements in both clays suggests felsic sources (Kagonbé, Tsozué, Nzeukou, & Ngos III, 2021). Two major quartz peaks were observed for 2θ between 20° and 30°. These high peaks indicate the presence of free silica from clay minerals (Arianpour & Arianpour, 2022). Quartz is always the most dominant element in the mineralogical composition of clays used in construction (Acevedo, Rocha, & Bertolino, 2017; Millogo et al., 2014; Tsozué, Nzeugang, Mache, Loweh, & Fagel, 2017).

Tableau 5.3 Mineralogical characteristics of red and beige clay: XRD analysis

Mineralogical Compositions (Weight %)					
Type of Clay	Kaolinite	Quartz (Silicates)	Illite	Muscovite (Mica)	Hematite
Red	8.9	42.6	21.8	24.5	2.2
Beige	25.8	42.5	14.6	16.9	0.1

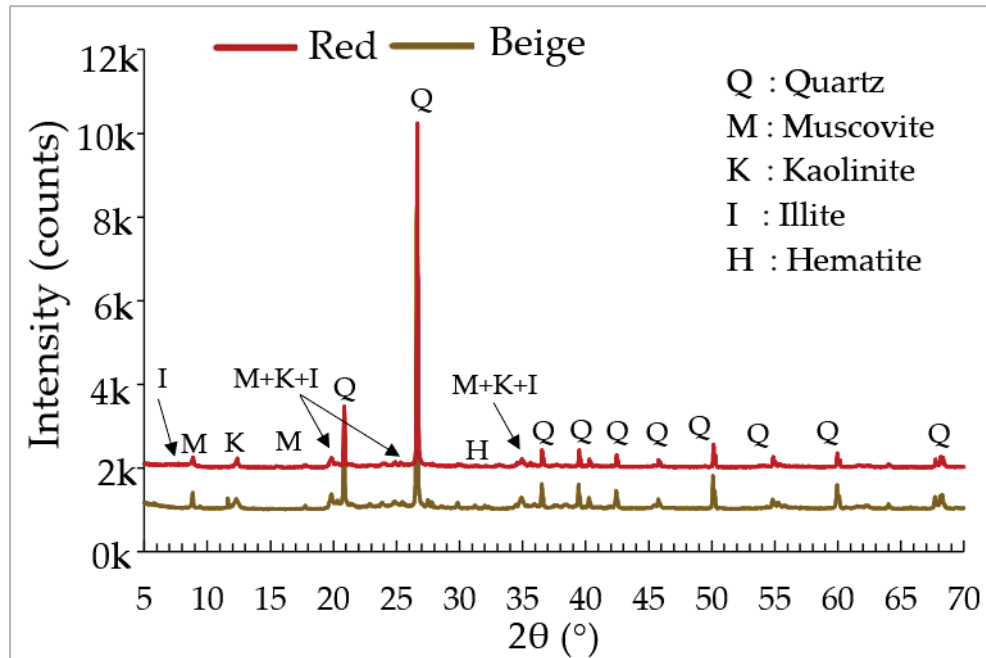


Figure 5.2 X-ray spectra of the raw clays

X-ray fluorescence analysis (XRF) showed that all the tested clays contained mainly silicon dioxide (SiO_2) and alumina (Al_2O_3), with minor impurities of Fe_2O_3 , K_2O , and MgO (Table 5.4). The high SiO_2 content in the chemical composition of the clays confirmed the high percentage of quartz revealed by XRD analysis (Fabbri et al., 2021; Tsozué et al., 2022). The presence of alumina (Al_2O_3) is related to the presence of aluminosilicates and kaolinite, while that of iron oxide (Fe_2O_3) and potassium (K_2O) indicates the presence of hematite and illite (Arianpour & Arianpour, 2022; Fabbri et al., 2021; Farouk, El-Desoky, Heikal, El-Mahallawy, & Wahid, 2020). Clays with Fe_2O_3 contents below 8% are reported as acceptable clays for the production of building materials (Arianpour & Arianpour, 2022). The two clays studied had Fe_2O_3 contents of 2.2% and 0.1%, respectively. The addition of fibres to the clay samples did not influence their chemical composition.

Tableau 5.4 Chemical characteristics of the red and beige clays: XRF analysis

Chemical Compositions (Weight %)					
	H_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O
Red	2.4	0.8	19.9	70.1	4.7
Beige	4.4	0.5	21.3	70.4	3.2

5.6.2 Thermal Thermogravimetric (TGA) and Differential Thermogravimetric Analysis (DTG)

Figures 5.3 and 5.4 present the thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermogravimetric analysis (DTG) results for the clay samples with and without wheat fibres. The addition of fibres led to an increase in the mass loss of those samples (Figure 5.3b).

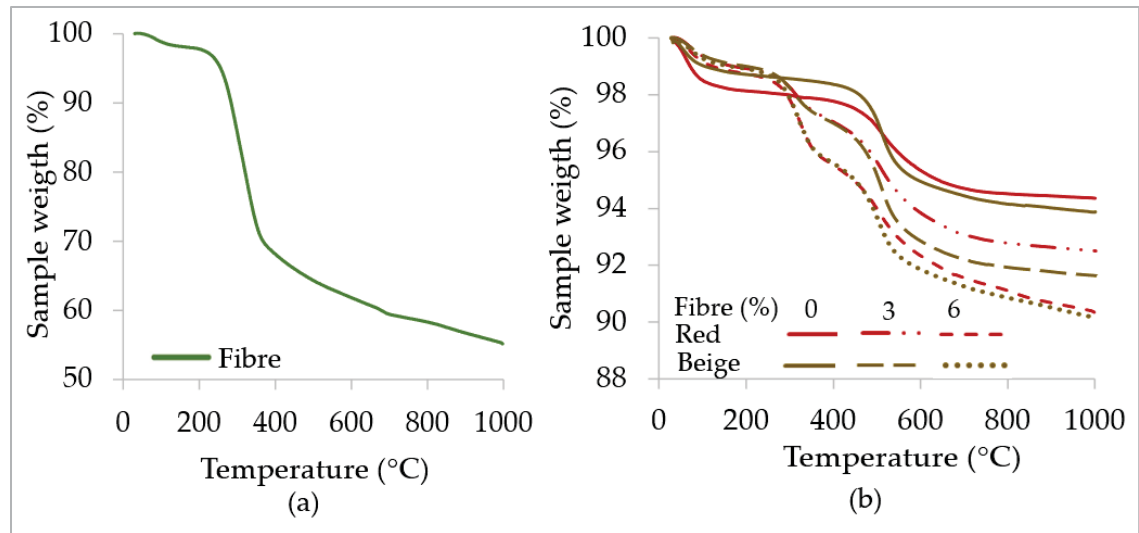


Figure 5.3 TGA curves: (a) fibre sample alone and (b) red and beige clay samples without and with fibres

The TGA-DTG curves in Figure 5.4 show the endothermic reactions, with the first occurring between 30 °C and 115 °C for the samples of both clays. This first reaction represents the evaporation of water, and the disintegration of the unburned volatiles present in the samples (Alwani, Khalil, Sulaiman, Islam, & Dungani, 2013; Mohana Krishnudu, Sreeramulu, & Reddy, 2020; Sarikanat, Seki, Sever, & Durmuşkahya, 2014; Vivek & Kanthavel, 2019). For the red and beige clay samples, mass losses of 1.60%wt and 1.02%wt were observed, respectively. The fibres had a mass loss of 2.67%wt. The second endothermic reaction occurs between 115 °C and 446 °C for the clay samples and between 221 °C and 391 °C for the wheat fibres (Figure 5.4). This second endothermic reaction showed mass losses of 1.02% and 0.84% for the red clay and beige clay, respectively, and 28.78%wt for the fibres. This second reaction characterizes the dehydroxylation of goethite for the clay samples (Ige & Danso, 2021). For the wheat fibres, this second endothermic reaction characterizes the decomposition of hemicellulose and cellulose (Alwani et al., 2013; Mayandi et al., 2015), with a significant peak at 320 °C.

The third endothermic reaction occurs between 446 °C and 782 °C for the clay samples (Figures 5.4a and 5.4b). The endothermic reactions occurring above 782 °C characterize the dehydroxylation of illite and quartz, followed by a decarbonization reaction due to the decomposition of calcite, resulting in a loss of carbon dioxide (Charai, Mezrhab, & Moga,

2022; Gandia, Gomes, Corrêa, Rodrigues, & Mendes, 2019; Ige & Danso, 2021; Millogo et al., 2014). For wheat fibres, the third endothermic reaction occurs between 391 °C and 883 °C, characterizing the degradation of lignin (Alwani et al., 2013). The maximum decomposition temperature of the wheat fibres was measured at 391 °C. Several authors have reported maximum decomposition temperatures of various plant fibres, including 344 °C for *Althaea officinalis*, 359 °C for okra fibres, 365 °C for jute fibres, 340 °C for sisal fibres, 345 °C for flax fibres, 363 °C for curaua fibres (Sarikanat et al., 2014), 384 °C for coconut coir fibres, 296 °C for banana fibres, 320 °C pineapple fibres, and 357 °C for sugarcane bagasse fibres (Alwani et al., 2013).

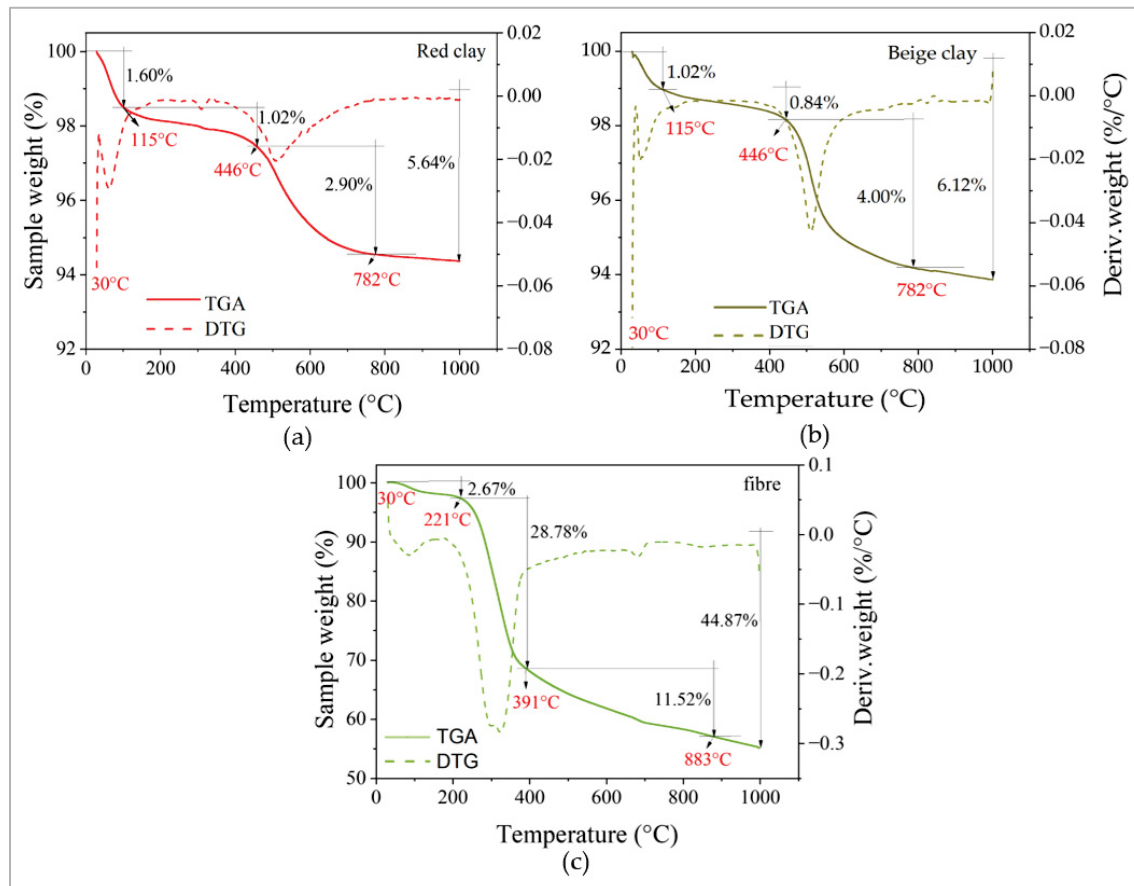


Figure 5.4 TGA/DTG curves: (a) red clay, (b) beige clay, and (c) wheat fibres

5.6.3 Shrinkage Rates of Samples

Figure 5.5 shows the shrinkage rates of the clay samples. We note that the shrinkage evolved with the drying time. As the fibre content increased, less shrinkage occurred. After 7 days of drying, an accumulated shrinkage of 13% was observed for the red clay samples without fibres and of 12% for the beige clay samples without fibres. Depending on the nature and content of the clay, the volume shrinkage during the drying of a clay material should be between 4% and 20% (Laou, 2017a). The shrinkage obtained with the samples of both types of clays was between 4% and 20%. For the samples reinforced with 3% fibre, the shrinkage rate varied between 2% and 5.3% and was a function of whether the fibres used for the mix were wet (Figure 5.5). For 6% fibre in the mix, the maximum shrinkage rate observed was 1%, irrespective of whether the fibres were wet. The results obtained in this study are consistent with previous findings on samples reinforced with 3%, 5%, and 7% of coir and straw fibres (Sangma & Tripura, 2020). An increase in the average volumetric shrinkage was observed from the fifth day for samples reinforced with unmoistened wheat fibres. This may be due to the increase in ambient temperature in the laboratory where the samples were stored for drying. It is important to note that the sample storage area is not a controlled space in order to mimic the material's replication on construction sites, which could result in fluctuations in the ambient climate, leading to slow or rapid drying. Additionally, it should be noted that the moistened and not moistened fibre samples were not produced simultaneously.

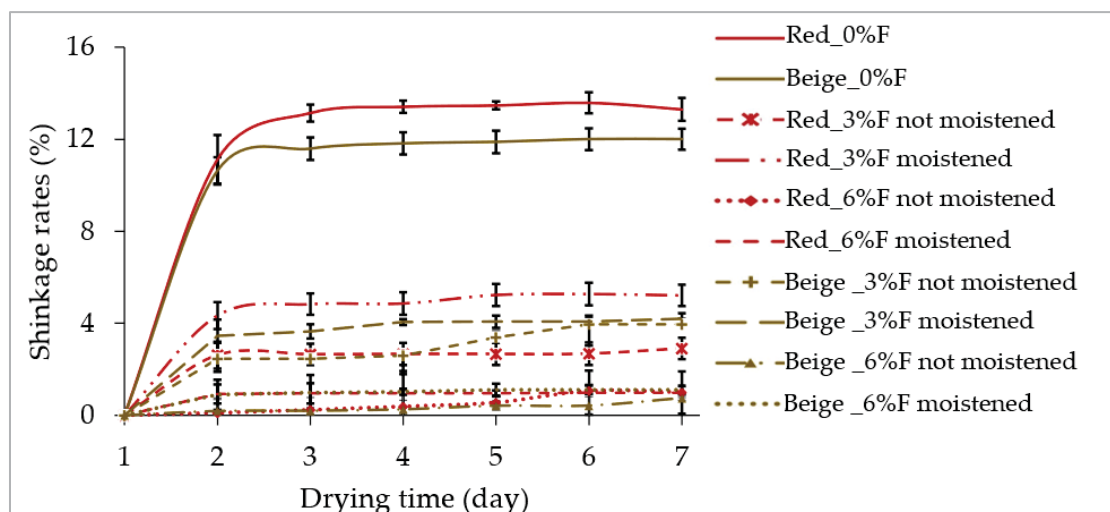


Figure 5.5 Shrinkage rates versus drying time

5.6.4 Mechanical Properties

5.6.4.1 Compressive Strength

Figure 5.6 shows the average compressive strengths of three samples per mix and the standard deviations as a function of the number of days of drying (28 days and 120 days of drying). When force was applied for compression testing, the cob material compressed before weakening, unlike the clay samples without fibrous reinforcement, which broke immediately after force was applied (Figure AC-1 in the Supplementary Materials). In terms of average values, the compressive strength of the red clay samples increased by 20% (reinforced with 3% fibre) and by 154% (reinforced with 6% fibre), and that of the beige clay increased by 28% for the reinforcement with 3% fibre and by 179% for the reinforcement with 6% fibre versus the samples without fibres, respectively (28 days). For the samples dried for 4 months, the increase in the strength was 50% and 186% for the red clay samples reinforced with 3% and 6% fibres, respectively, and the compressive strength of the beige clay samples increased by 58% and 173% for the reinforcement with 3% and 6% fibres, respectively, compared to samples without fibre (Table AC-1 in the Supplementary Materials). Comparing the results of the samples according to the two drying times shows a slight decrease for all samples, except for the red clay reinforced with 3% fibre, which increased by 3% (Table AC-2 in Supplementary Materials). The decrease in the compressive strength after 120 days of drying could be due to the fact that the samples were exposed to ambient conditions with variations in humidity and temperature, resulting in variations in compressive strength. The study of the influence of the water content on the compressive strength was not taken into account in this study and requires further investigation. For the condition of the samples after compression, no breakage of the samples with 3% and 6% fibre was observed, but a detachment of the clay continued to occur from the fibres and the compression (Figure AC-1b,c in the Supplementary Materials). This can be explained by the presence of fibres. According to previous research, a compressive strength of 0.6 MPa was identified as sufficient to ensure a safety margin for cob buildings at least two stories high (Miccoli et al., 2014; Paquet, 2020; RB299-19_IRC, 2019). In the case of this study, the cob samples attained a compressive strength between 2.15 MPa and 4.57 MPa.

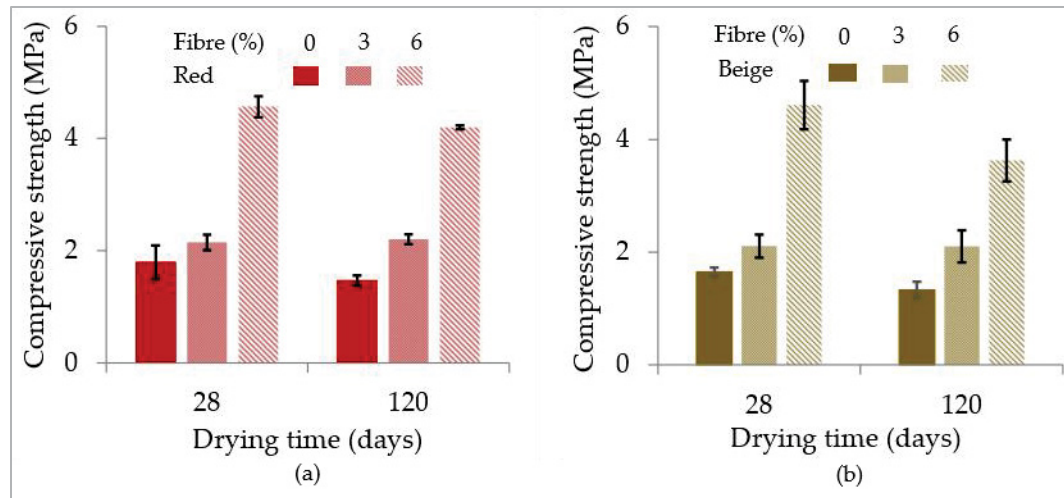


Figure 5.6 Compressive strengths as a function of drying days: (a) red clay samples and (b) beige clay samples

5.6.4.2 Flexural Strength

Figure 5.7 shows the changes in the average flexural strength with the drying days (28 days and 120 days). These results show that the flexural strength of all samples without and with fibres increased significantly with the sample age (Table AC-2 in Supplementary Materials). This finding is consistent with previous studies (Araya-Letelier, Concha-Riedel, Antico, & Sandoval, 2019; RG, Mabilia, Ahouet, Goma-Maniongui, & GF, 2011), which support the observed increase in the flexural strength of samples over time. For samples dried for 28 days, the flexural strength decreased with the increasing fibre content in the mixtures (Table AC-3 in Supplementary Materials). This decrease may be due to the higher water content in the samples dried at 28 days than those at 120 days. The higher water content in test specimens can lead to a reduction in their flexural strength (Q. Wang et al., 2023). After 120 days of drying, the flexural strength of the fibre-reinforced samples increased significantly. The flexural strength values of these samples gradually increased to match those of the samples without fibres (Table AC-4 in Supplementary Materials). According to some authors, the decrease in moisture over time in earthen materials is proportional to the increase in their mechanical strength (Araya-Letelier et al., 2019; Q.-B. Bui, Morel, Hans, & Walker, 2014). From a mechanical perspective, the results show that wheat fibres influence the flexural and

compressive strengths. These results are in agreement with results from several authors who have shown that the length of fibres influences the mechanical strength of the building materials and increases with an increase in the fibre content (Chegenizadeh & Nikraz, 2011; Kumar, Walia, & Mohan, 2006; Laibi, Poullain, Leklou, Gomina, & Sohounhloué, 2018; Lertwattanaruk & Choksiriwanna, 2011; Makomra et al., 2022).

Plant-fibre-reinforced earth materials have a very particular bending failure behaviour. The addition of loose wheat fibres in a clay earth mixture changes the behaviour of the samples without fibres from brittle to semi-ductile deformation and significantly increases the ductility of the materials (Figure AC-2 in the Supplementary Materials) (Rode et al.). As the fibre content increases, the cob materials become more ductile, characterized by plastic behaviour (Figures AC-2b,c). The results show that the forces applied to the samples with fibres during the tests first propagate into the clay matrix in the form of a crack before being damped by the fibres. This observation was also found during the compressive strength tests (Figure AC-1 in the Supplementary Materials). Therefore, the clay is used as a binder between the fibres, ensuring the flexibility of the cob materials. Several studies have also shown that earth materials that are not reinforced with fibres experience a quasi-fragile failure when they are in contact with a force. These materials belong to the family of materials with elastoplastic behaviour with brittle failure, such as compressed earth blocks, adobe, cement-stabilized earth blocks, etc. (Ouattara, Boffoue, Assande, & Kouadio, 2016). In this work, the results show that reinforcing the clay material with fibres of different lengths (short and long) improves both the mechanical strength and flexibility of the samples.

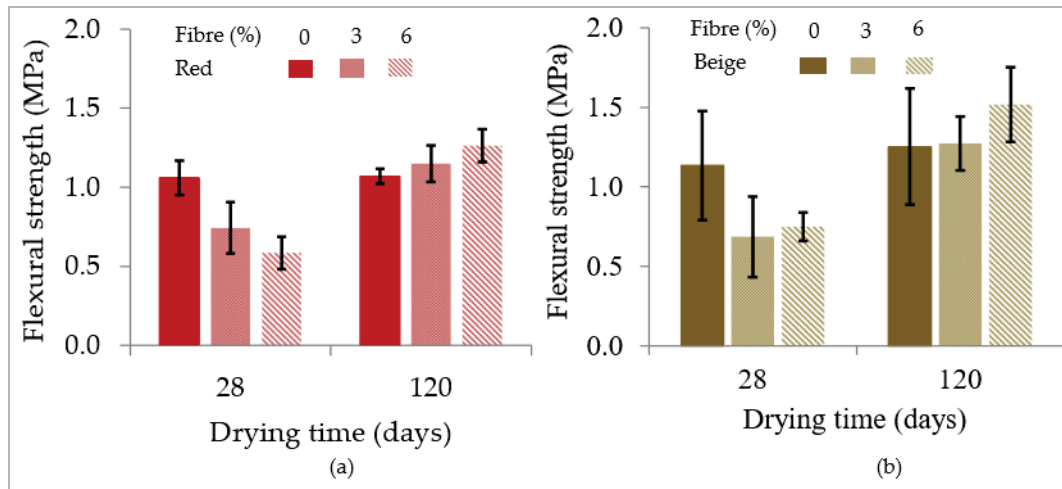


Figure 5.7 Flexural strengths as a function of the fibre content: (a) red clay samples and (b) beige clay samples

5.6.5 The Use of the Studied Cob in Construction

Cob is a material made from clay, straw, and water. It is a filler material for the wooden structure, not a load-bearing material. As the cob has a high density (1200–1700 kg/m³), it is very heavy and consistent, so it is necessary to avoid using too much water in the mix. To obtain the kind of heavy cob used in this study, mixing should be carried out with a water/clay ratio of 25% by mass while moistening the fibres with a water/fibre ratio of 205% by mass. The quantity of fibre to be used depends on the quantity of clay (either 3% or 6% by mass of clay). The manufacturing of cob is performed in four steps. For large quantities, these steps are as follows:

- To moisten the fibres, spread them out on a tarpaulin on the ground and dampen the whole (205% W/F), leaving it until the clay/water mixture is ready.
- To mix clay and water, spread the clay on a tarpaulin or in the mixer, pour the required amount of water onto the surface of the clay (25% W/C), and mix until homogeneous.
- For mixes without a mixer, use shovels to bring all the cob together and remix to obtain a homogeneous consistency.

- At the end of mixing, leave to stand for half a day, then spread the wet fibres over the surface of the clay/water mixture and remix to obtain a homogeneous mixture, a consistency that can be used to fill the wooden frame.

After mixing, it is important to obtain a density close to that obtained in the laboratory, between 1200 and 1700 kg/m³. The purpose of wetting the fibres before mixing is to optimize the amount of water to be used for cob production, the resting time before use for filling the wooden framework, and to limit the pre-cracking of the cob due to the absorption of moisture into the mix by the fibres. As the fibres are wetted before use, the final mix can be used immediately. Cob walls are designed using two materials with high heat and moisture storage capacities: wood and cob (Laou, 2017a). Before starting to lay the cob, it is important to ensure that the laths or wood framing have a moisture content that allows the cob to adhere easily to the wooden structure. This prevents the wood from drying out too quickly and absorbing moisture from the cob. The cob, a mixture of clay, fibres, and water, is laid in successive layers until the desired thickness is reached, filling the wooden frame from bottom to top. This method was used to produce the test samples in the laboratory.

A raised foundation to protect the structure against capillary rise and collapse due to the building's load distribution is recommended. The roof must be able to protect the walls against water from driving rain, and a drainage system must be established to prevent water damage.

For the finish, a plaster made of clay, lime, or clay mixed with lime is generally applied to the mud wall and can, therefore, be applied to both exterior and interior cob walls. Indeed, this article aims to evaluate the mechanical properties of cob material manufactured using the traditional method, using current characterization methods such as ASTM C39/39M (ASTM C39/C39M, 2020) and ASTM C78/78M (ASTM C78/C78M, 2021). This study aims to provide data on both the mechanical properties of cob and the volume shrinkage values. The proposed manufacturing method is highly accessible, requiring neither machinery nor fibre pretreatment.

5.7 Conclusion

A study was conducted on the mechanical behaviour of cob samples as a function of age and of the volume shrinkage of these samples as a function of fibre content. The mixtures consisted of clay, water, and 3% or 6% wheat fibre. A control mixture was made with no fibre. Tests were conducted on three samples per mixture. Based on the results obtained after the samples were tested without fibre and with 3% and 6% fibre reinforcement and on the subsequent analysis, the following conclusions were drawn:

- An analysis of the drying kinetics showed that the addition of fibres to the clay mix reduces the volume shrinkage rate of clay materials while eliminating cracking, but the extent depends wholly on how the fibres are used (dry or wet).
- To eliminate surface cracking, the fibres must be wetted with a suitable quantity of water for 10 to 24 h before mixing. Moreover, the addition of the fibres reduces the density of the cob materials, thus reducing the weight of the cob structures.
- An analysis of the results of the mechanical strength of the samples showed that the reinforcement with wheat fibres improves the mechanical properties, although the samples were manually made with bulk fibres.
- The samples reinforced with wheat fibres have a plastic behaviour enabling walls constructed with these materials to withstand environmental stresses such as earthquakes and strong winds without collapsing.
- An ANOVA and *t*-test analysis revealed significant values, showing that at 28 days of drying, the samples without fibres exhibited higher flexural strength than those with fibres. However, at 120 days of drying, the flexural strength values of the samples with fibres improved to match those of the samples without fibres, indicating a progressive enhancement in the flexural strength of the fibre-reinforced samples over time.

As a general conclusion, cob exhibits a relatively ductile behaviour as compared to the brittle behaviour of earth materials without fibre reinforcement. This behaviour is strongly influenced by the presence of fibres in the samples. The capacity of a building to deform without collapsing is essential to saving human lives and repairing structures, and as a filler material for wooden structures, cob can enhance this capacity.

Based on the results presented and the work in progress within the project, further studies are required to complete this study:

- Experimental studies on cob specimens manufactured with different types of plant fibres need to be developed using the same manufacturing method.
- There should be a study of the influence of water content on the mechanical properties and volumetric shrinkage of cob to observe the influence of varying water content on the compressive and flexural strength of cob specimens manufactured using the traditional method.
- Modelling the volume shrinkage of the cob with 3% and 6% fibres as a function of time is important, using real climatic data to observe how cob reacts when the climate varies.
- Studying the behaviour of cob walls in the face of earthquakes and high winds (vertical/horizontal/diagonal wood-frame systems filled with cob) is also important. A study on the cost savings of this type of construction compared to conventional material construction would be necessary to confirm all the benefits associated with cob construction.

5.8 Funding

This research was funded by the Pôle de Recherche et d'Innovation en Matériaux Avancés du Québec (PRIMA) and by NSERC-Alliance. It was also supported by the partners American Structures, Boralife, and the Quebec Wood Export Bureau (QWEB). Funding number: ALLRP 560404-20.

5.9 Acknowledgments

The authors thank Victor Brial for his participation in the X-ray diffraction data measurements for this project and Mathieu Bendouma for reviewing the manuscript.

CHAPITRE 6

NUMERICAL ANALYSIS OF HEAVY COB WALLS' HYGROTHERMAL BEHAVIOR

Aguerata Kabore¹, Mathieu Bendouma² and Claudiane M. Ouellet-Plamondon^{1*}

¹Department of Construction Engineering, Ecole de Technologie Supérieure, 1100 Notre-Dame Street, Montreal, QC H3C 1K3, Canada.

²Département des sols et de génie agroalimentaire, Université de Laval, 2325 Rue de l'université, Quebec City, QC G1V 0A6, Canada.

Corresponding author: claudiane.ouellet-plamondon@etsmtl.ca

Article soumis dans «Energy and Buildings», août 2024

6.1 Avant-propos

L'optimisation des performances hygrothermiques des systèmes d'enveloppe de bâtiment est un enjeu crucial dans le contexte actuel de transition énergétique et de lutte contre le changement climatique. Cette étude s'inscrit dans cette dynamique en explorant les potentialités du torchis, un matériau traditionnel composé d'argile, de fibres végétales et d'eau, connu pour sa faible empreinte carbone et sa simplicité d'application sur des structures en bois. Les résultats répondant à l'objectif spécifique 3 montrent que l'ajout de fibres végétales au torchis permet d'améliorer ses performances thermiques et de stabiliser la température intérieure des bâtiments, tout en réduisant les risques de moisissures grâce à des solutions telles que l'utilisation d'écrans pare-pluie ou de membranes barrière air/vapeur 3M™ 3015. Ces méthodes de conception ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation du torchis dans les constructions écologiques, notamment dans les régions aux climats variés.

6.2 Résumé

Le développement de systèmes d'enveloppe de bâtiment avec des matériaux à faible empreinte carbone et à des propriétés hygrothermiques améliorées est toujours en cours. Pour les matériaux géosourcés, l'un des principaux objectifs est d'atteindre une efficacité hygrothermique optimale. Le torchis, un matériau composé d'argile, de fibres végétales et

d'eau, se distingue par sa faible empreinte carbone et sa facilité d'application sur des structures de bâtiments à ossature en bois. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la performance hygrothermique de huit systèmes de murs lourds en torchis dans huit villes, dont les climats africains, européens et américains. Une caractérisation approfondie en laboratoire est réalisée pour mesurer les propriétés hygrothermiques de chaque matériau. La conductivité thermique obtenue après les mesures est de 0,75 W/m.K et 0,87 W/m.K pour les échantillons d'argile rouge et beige, respectivement, 0,52 W/m.K pour le torchis avec 3 % de fibres, et 0,2 W/m.K pour le torchis avec 6 % de fibres, et des taux de porosité de 21, 20, 37 et 45 pour les échantillons d'argile et de torchis, respectivement. La simulation hygrothermique a montré que la température intérieure des murs en torchis avec 6 % de fibres et d'épaisseur de 25 cm restait stable, indépendamment des variations climatiques extérieures. L'application d'enduit d'argile beige sur les surfaces extérieures et intérieures des murs en torchis ou des structures en bois a amélioré la performance thermique en termes de demande énergétique pour le chauffage ou le refroidissement, mais a également augmenté l'absorption d'humidité des murs. Cette humidité accrue augmente le risque de développement de moisissures au sein de la structure du mur. Lorsqu'ils sont utilisés comme matériaux de remplissage dans les structures en bois, les systèmes composites simulés présentent généralement de bonnes performances hygrothermiques. Cependant, dans les zones climatiques froides avec de fortes précipitations et des ciels très nuageux, les murs peuvent être exposés à des risques de développement de moisissures. Pour prévenir l'apparition de moisissures dans ces murs, il convient d'installer une membrane pare-pluie ou pare-air/vapeur 3M™ 3015 entre le plâtre et le torchis. Cela permet de gérer l'humidité et d'assurer un bon séchage des murs.

6.3 Abstract

The development of building envelope systems with low carbon footprint materials and improved hygrothermal properties is still in progress. For geosourced materials, one of the main objectives is to achieve optimal hygrothermal efficiency. Cob, a material made of clay, plant fibres, and water, stands out for its low carbon footprint and ease of application on timber-framed building structures. The main goal of this study is to assess the hygrothermal performance of eight heavy cob wall systems in eight cities African, European, and American

climates. An extensive laboratory characterization was carried out to measure the hygrothermal properties of each material. The thermal conductivity obtained after the measurements is 0.75 W/m.K and 0.87 W/m.K for red and beige clay samples, respectively, 0.52 W/m.K for cob with 3% fibres, and 0.2 W/m.K for the cob with 6% fibres samples, and the porosity rates are 21, 20, 37, and 45 for the clay and cob samples, respectively. The hygrothermal simulation showed that the interior temperature of the walls made of cob with 6% fibres and a thickness of 25 cm remained stable, regardless of external climate variations. Applying beige clay plasters to the exterior and interior surfaces of cob walls or timber structures improved thermal performance in terms of heating or cooling energy demand but also increased the walls' moisture absorption. This increased moisture enhances the risk of mold growth within the wall structure. When used as infill materials in timber structures, the simulated composite systems generally exhibit good hygrothermal performance. However, in cold climate zones with high precipitation and heavily clouded skies, the walls may be exposed to risks of mold development. To prevent mold in these walls, install a rain screen or a 3M™ 3015 air/vapor barrier membrane between the plaster and cob. This helps manage moisture and ensures proper wall drying.

Keywords: Hygrothermal simulations, cob walls, geosourced materials, Hygrothermal performance, Risk of mold.

6.4 Introduction

Regarding climate emergency, a global effort is aimed at reducing carbon emissions, especially in the energy and building sectors, for a greener economy by 2050 (Alioui, Kaitouni, Azalam, Bendada, & Mabrouki, 2024a; Bouckaert et al., 2021). The study of local building materials and their use in modern construction is crucial for making buildings more energy-efficient and environmentally friendly. This approach promotes a sustainable architecture that considers energy efficiency and environmental protection (Hu et al., 2023; Muñoz, Letelier, Muñoz, & Zamora, 2021; Walker, Reddy, & Mani, 2020; Xie et al., 2022). A growing awareness translates into an increased commitment to design buildings with a low carbon footprint,

stimulating numerous in-depth research on the passive cooling and heating features specific to earthen architecture (Belarbi, Ferroukhi, Issaadi, Poullain, & Bonnet, 2024; Samuel, Dharmasastha, Nagendra, & Maiya, 2017). Recent studies highlight the benefits of building with raw earth and bio-based materials, due to their abundant availability, affordable cost, non-toxicity, simple production processes, and recyclability (Alassaad et al., 2023; De Mets, Tilmans, & Loncour, 2017; Dejeant, Garnier, & Joffroy, 2021; Giada Giuffrida, Ibos, Boudenne, & Allam, 2024; Haddad et al., 2024; Hema et al., 2021). These innovative approaches explore possibilities of industrialization, prefabrication, mechanization, and digitization to enhance the reliability, performance, and efficiency of construction processes while maintaining reasonable costs (Belabid, Elminor, & Akhzouz, 2022; Bühler et al., 2023; El-Mahdy, Gabr, & Abdelmohsen, 2021; Gomaa, Schade, Bao, & Xie, 2023; Gomaa et al., 2021; Schweiker et al., 2021).

Studies conducted on a hempcrete building envelope at various thicknesses have revealed a good level of insulation with excellent thermal inertia (Asli, Brachelet, Sassine, & Antczak, 2021; Boumediene, Collet, Prétot, & Elaoud, 2022; A. Kaboré, Maref & Ouellet-Plamondon, 2024; Moujalled et al., 2018; Xu & Zeng, 2022), absorbing up to 90% of daily variations in external temperature and relative humidity (Moujalled et al., 2018). In the (Moujalled et al., 2018) study, using a wooden structure with hemp concrete led to air leakage. They recommend to apply a continuous coating on the internal walls to solve this issue. The results of these studies have shown effective regulation of humidity, keeping it above 30% during the heating period, and preventing the indoor temperature from exceeding 27 °C in summer, even when the outdoor temperature exceeds 35 °C (Kaboré Maref & Ouellet-Plamondon, 2024; Moujalled et al., 2018). Other studies have also emphasized the importance of the coating layer in humidity regulation and discussed the optimal thickness of this layer (Bart, Moissette, Ait Oumeziane, & Lanos, 2014; Benkhaled, Ouldboukhite, Bakkour, & Amziane, 2022; Bennai, Ferroukhi, Benmahiddine, Belarbi, & Nouviaire, 2022; Colinart, Lelièvre, & Glouannec, 2016; Lelievre, Colinart, & Glouannec, 2014; Reuge et al., 2020). Hempcrete, when combined with phase change materials, can effectively reduce fluctuations in indoor temperature, provided it is properly positioned in the wall (Wu et al., 2022).

Earth materials have been studied, just like hempcrete materials, and these studies have shown the benefits of using earth in eco-friendly and low-carbon footprint construction (Gao, Wu, Liu, Yao, & Jiang, 2022; Jiang, Wu, Xia, & Liang, 2020; Laaroussi, Lauriat, Garoum, Cherki, & Jannot, 2014; Laou, Ulmet, Yotte, Aubert, & Maillard, 2023; Toufigh & Samadianfard, 2022; L. Zhang, Sang, & Han, 2020). Research also explored the use of double walls made of hollow bricks enriched with bio-based earth, analyzed using EnergyPlus software, based on real building data. The results showed that this approach improved summer thermal comfort, reducing thermal dissatisfaction by 24.6% compared to conventional constructions in hot climates (Charai, Mezrhab, et al., 2022). Further simulations investigated the optimal thickness of these bio-based materials in various climates, revealing a notable reduction in heat loss and improved regulation of indoor humidity and temperature (Ahmad, Chen, Maierdan, Kazmi, & Munir, 2021; Mellaikhafi et al., 2021). These studies emphasize the importance of sustainable local materials, such as fibre-reinforced adobes, rammed earth, cob, and compressed earth blocks (CEB), for enhancing thermal comfort while reducing the environmental footprint of the construction sector. Earth materials mixed with plant fibres, in addition to having a low carbon footprint and being fully recyclable, offer an effective solution for reducing CO₂ emissions in construction by contributing to the elimination of plant fibres (Schmidt et al., 2021). Earthen walls stabilize indoor temperature and humidity through moisture absorption and desorption capacity. However, the use of waterproof coatings can limit their ability to regulate humidity, thereby increasing the risk of mold (Gao et al., 2022). Despite these advantages, few studies have focused on cob and cob walls with wooden structures in hot, humid, and rainy areas. A thorough analysis is necessary to assess the influence of different external climates on building components, and to understand the heat and moisture transfer in these types of walls. The transfer of heat and moisture through building walls is a major cause of total building energy consumption and the appearance of mold on certain parts of these elements (Toufigh & Samadianfard, 2022). This phenomenon is influenced by the heat input from solar radiation, outdoor air humidity, driving rain, and cloud cover (shading in the humid season). Studying the impact of humidity, cloud cover, and temperature on cob walls through numerical simulation is essential for understanding the long-term hygrothermal behaviour of these

structures, whether in wattle and daub alone or with a wooden structure. This would help assess how temperature variations and humidity levels influence the performance of these walls.

Several studies on intrinsic energy, also known as embodied energy, which corresponds to the energy consumed for the extraction of raw materials, production, and construction of the building (Cabeza et al., 2013), have shown that the embodied energy of stabilized earth materials increases linearly with the cement content (Reddy & Kumar, 2010). The total embodied energy of a stabilized earth wall containing 8% cement is approximately 500 MJ/m³, which represents between 15% and 25% of that of fired clay brick walls. The embodied energy of compressed earth bricks and unstabilized rammed earth varies from 0 to 50 kWh/m³, with 3.94 MJ per brick, and overall embodied carbon of 0.39 kg CO₂eq per brick, or 47.5 kg CO₂eq/m³ (Fernandes et al., 2019). Generally, the embodied carbon of earth and wood materials ranges from 0.01 to 0.025 kg CO₂eq/kg of material (Cabeza, Boquera, Chàfer, & Vérez, 2021; Mendonca & Vieira, 2022). The embodied carbon of reinforced concrete ranges from 0.19 to 0.24 kg CO₂eq/kg of concrete, and for ordinary concrete, it ranges from 0.10 to 0.16 kg CO₂eq/kg of concrete (Cabeza et al., 2021). Regarding grey energy, some studies conducted on buildings made of cement blocks and clay block masonry have shown that buildings constructed with cement blocks emitted, during their construction, 452 kg CO₂eq/m², with a grey energy of 3198 MJ/m². In contrast, residential buildings constructed with clay block masonry emitted 235 kg CO₂eq/m² and had grey energy of only 1942 MJ/m² (Saba et al., 2018). The grey energy of materials in an earth wall is about 20 times lower than that of a hollow and solid concrete block wall (Hamard et al., 2016).

Cob walls, made from a mix of clay, water, and plant fibre, are recognized for their thermal mass capacity (C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023). As with most building materials, cob is a porous material with various porosity levels. Moisture migration in these types of walls can lead to damage due to condensation (Taourte et al., 2023). Their susceptibility to moisture results in cracks and mold formation (Fang, Chen, & Wu, 2021; Kang, Jo, Yang, Wi, & Kim, 2022). Moisture migration within the walls of a building can affect not only the thermal and hydric characteristics of these walls but also energy consumption, indoor air quality, and the building's lifespan (Fang et al., 2021; Wei, Wang, & Liu, 2019). Temperature has little

influence on the thermal conductivity of materials reinforced with vegetable fibres (Tonini de Araújo, de Souza, & Gomes, 2022). Unlike temperature, relative humidity significantly impacts the thermal properties of cob material (Kabore, Aziz, & Ouellet-Plamondon, 2024).

The numerical modelling examines various factors such as moisture absorption and drying, temperature, and humidity fluctuations, potential moisture-related damages over time, energy losses or gains for indoor climate regulation, and moisture flows through the building envelope. Several simulation tools have been used to analyze thermal and moisture transfer in walls, including the Conduction Transfer Function (CTF) model (Belloum, Agoudjil, Chennouf, & Boudenne, 2022; Yu, Cui, Shao, & Han, 2019), the effective moisture penetration depth (EMPD) model (Goffart, Rabouille, & Mendes, 2017; H. Zhang, Shi, Pan, Xuan, & He, 2020), the combined heat and moisture transfer (HAMT) model (Belloum et al., 2022; Tonini de Araújo et al., 2022), COMSOL Multiphysics (Chbani Idrissi et al., 2021; Gerlich, Sulovská, & Zálešák, 2013), and WUFI® (Kabore, Maref et Ouellet-Plamondon, 2024; Park et al., 2021; Tlaji, Pennec, Ouldboukhitine, Ibrahim, & Biwole, 2022). The authors Yu et al. (Yu et al., 2019) used models based on the Conduction Transfer Function (CTF) and the coupled Heat, Air, and Mass (HAM) algorithms to analyze the impact of coupled heat and moisture transfer on the indoor environment and energy consumption of buildings in several cities, including Harbin, Shenyang, Beijing, Shanghai, and Guangzhou. Their results show that this transfer has a significant influence on the annual energy consumption for heating and cooling, as well as on the thermal and humidity conditions inside buildings. Furthermore, Rahma et al. (Belloum et al., 2022) validated the efficiency of the integrated HAMT model in EnergyPlus to predict the hygrothermal behavior of date palm concrete, a material recommended for sustainable construction in humid and semi-arid regions. In the work of Huibo et al. (H. Zhang et al., 2020), the EMPD model was used to assess the hygroscopic performance of building materials, which influence indoor humidity and affect durability as well as air quality. They proposed indices for evaluating hygroscopic performance, validated through theoretical and experimental analyses. These results underline the importance of integrating environmental factors, such as air velocity, to obtain a more accurate assessment of building materials. Mariana et al. and Goffart et al. (Goffart et al., 2017; Tonini de Araújo et al., 2022) also used these three models to check for the presence of minimum comfort parameters to better select the building envelope

materials. They adopted a statistical approach to analyze the uncertainty and sensitivity of input data on the evaluation of the hygrothermal performance of building materials. Regarding COMSOL, Gerlich et al. (Gerlich et al., 2013) presented in their work the validation of the model using measured data from a segment of a real building. On the other hand, Chabani et al. (Chbani Idrissi et al., 2021), in their research, examine the quality of the experimental results and the numerical simulation, based on the mean squared errors between the two results. These mean squared errors serve as a measure of the accuracy of a model or an estimate compared to real values.

For the simulation with WUFI Pro, several authors have used this software to evaluate the hygrothermal response of single-layer and multi-layer walls based on meteorological data. Developed by the Fraunhofer Institute for Building Physics in Germany, WUFI Pro is specifically designed to analyze heat and moisture transfer in building envelopes. Talaiji et al. (Tlaiji et al., 2022) used the wall model of Douzane et al. (Douzane, Promis, Roucoult, Le, & Langlet, 2016) to validate the WUFI Pro model to assess the hygrothermal performance of multi-layer straw walls, while Mesa (Mesa & Arengi, 2019) validated their numerical WUFI Pro model using experimental results from tests on a straw bale wall. In this article, the model was validated in the study by Kabore et al. (Kaboré, Maref & Ouellet-Plamondon, 2024) on the hygrothermal performance of hemp concrete walls, using the models of Dhakal et al. (Dhakal, Berardi, Gorgolewski, & Richman, 2017) and Lamalle (Lamalle, 2016), which also integrated experimental data to validate their model. These comparisons yielded consistent results, confirming the effectiveness of WUFI Pro as a reliable tool for evaluating the moisture dynamics within walls.

The evaluation of the hygrothermal performance of cob materials, through different wall system configurations, is a crucial step to ensure their effective and sustainable integration into modern construction as infill materials. This evaluation maximizes the benefits of cob while minimizing the risks associated with its use and promotes sustainable and responsible construction practices. Studies on biosourced and geosourced materials, such as hemp concrete and adobe bricks, clearly show that these materials can play a significant role in the transition towards more eco-friendly and high-performance buildings. By integrating these materials into

construction practices, it is possible to enhance not only the sustainability of buildings but also to contribute to the fight against climate change. To use cob in modern construction, which is also a geosourced material, it is essential to understand how this material reacts to climatic conditions. This study aims to anticipate future impacts on the performance of cob, allowing for proactive adjustments in construction techniques. Given that cob has not yet been widely studied in terms of hygrothermal performance, the results of this research will help better understand its behavior in response to external climatic conditions. This will also aid in identifying potential risks of material degradation, such as mold formation and deterioration due to excessive moisture.

The main objective of this study is to evaluate the long-term hygrothermal performance of two types of the cob produced using traditional methods, for their application in the construction of modern contemporary buildings with a wooden frame structure. In this structural case, the wood is treated with Disodium Octaborate Tetrahydrate (DOT) to protect it against termites (Patrick Brisebois, Meriam Aouinti, Maziar Jafari, Mohamed Siaj, & Claudiane Ouellet-Plamondon, 2024). For this purpose, the hygrothermal performances of twelve wall systems were numerically studied using WUFI Pro 6.7 and COMSOL 6.1, two well-known simulation engines used to assess the hygrothermal performance of building envelopes. Two mathematical models were used in this study, one for WUFI Pro 6.7 and another for COMSOL 6.1. These software programs were employed to analyze the heat and moisture transfer through eleven cob walls, including four with 3% fibres and seven with 6% fibres. The evaluation of the evolution of temperature, humidity, energy, and moisture flow of the different walls was conducted considering factors such as orientation, cloudiness, and driving rain. As a result, the twelve wall systems, consisting of three single-layer walls and nine multi-layer walls, were assessed through WUFI Pro 6.7 simulations taking into account worst-case scenarios, wall orientation, driving rain, and cloudiness. For the simulation using COMSOL 6.1, only the three single-layer wall systems were analyzed. The aim of using these two models is to evaluate the impact of driving rain, cloudiness, capillary moisture, and the orientation of the walls of considering and not considering driving rain, cloudiness, capillary moisture, and the orientation of the walls on indoor thermal comfort. Additionally, to assess the impact of considering the four elements on the risk of mold development and energy gains and losses,

and moisture of the walls to regulate the interior environment. The particular challenge in modelling cob walls lies in their heterogeneity, with significant variations in density, porosity, and thermal conductivity, requiring detailed information on material properties. As a result, the production and data measurements for clay materials, clay plaster materials, and cob materials were carried out in the laboratory (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024b; C. Ouellet-Plamondon & A. Kabore, 2023). To achieve this, tests to determine the hygrothermal properties of the two types of cob used were conducted out in two different laboratories with samples of varying sizes. This was done to validate that there were no significant differences between the results obtained in the two laboratories and to ensure that sample size would not affect the thermal properties of the cob. Subsequently, the mechanical strength and volumetric shrinkage of the two types of cob were evaluated to ensure that these materials could be used in the construction of two-story or taller timber-framed buildings. The results are presented in our article (A. Kabore & C. Ouellet-Plamondon, 2024a). Additionally, a thorough assessment of the influence of moisture on the hygrothermal properties of cob was also conducted prior to the numerical simulation, and these results are presented in the article by Kabore et al. (Kabore, Laghdir, & Ouellet-Plamondon, 2024).

6.5 Materials and methods

6.5.1 Research methodology

In this study, WUFI Pro 6.7 software was used to analyze the heat and moisture flows necessary for interior climate regulation in a single layer and multi-layer one-dimensional walls. Both factors can impact interior thermal comfort and wall material durability either negatively or positively. The software considers parameters such as cloudiness rate, driving rain, wall's orientation for the worst possible case, and capillary rise in the wall's structure. It becomes necessary to evaluate the effects of these parameters on the evolution of the interior temperature, humidity, and the risk of mold growth in cob walls. On one hand, the model designed with WUFI Pro 6.7 software uses the coupled heat and mass transfer equation developed by Künzel (H. M. Künzel, 1995; H. M. Künzel & Germany, 2012a). On the other hand, the model designed

with COMSOL 6.1 used the coupled heat and mass transfer equation, as employed in the works of Lelièvre (Lelièvre, 2015). Its objective is to evaluate the impact of the absence of cloudiness rates and driving rain on the evolution of temperature and humidity through cob walls. Simulations with COMSOL 6.1 were carried out on single-layer walls, because the use of this software aims to assess the thermal performance of the material in wall form, taking into account only the effect of humidity. The numerical simulation does not take into account the protection of the walls by the roof, as the studied walls are susceptible to driving rain. The modelling is a hygrothermal modelling of the building's walls and not of the entire building.

6.5.2 Wall systems for simulation

The performance of eleven types of cob walls and one clay wall are studied through the hygrothermal simulations using COMSOL 6.1 for the first three single-layer wall systems and with WUFI Pro 6.7 for all walls. An illustration of the different wall systems is presented in Tables 1 and 2. The hygrothermal properties of the wall materials are shown in Table 6.3, and the values of the effective thermal resistance (R) and the thermal transmission coefficients (U) of the walls are presented in Tables 6.4 and 6.5.

Tableau 6.1 Wall systems configuration, a) single-layer walls, b, c, d and e) multi-layer walls


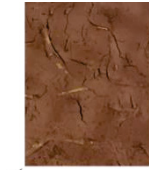

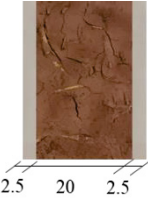
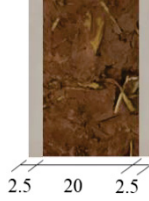

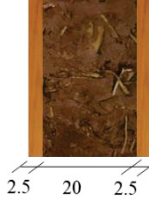
	Type I	Type II	Type III
a)	 25 cm	 25 cm	 25 cm
Wall material	Red clay	Cob with 3% fibre	Cob with 6% fibre
	Type IV	Type V	
b)	 2.5 20 2.5	 2.5 20 2.5	
Exterior side	2.5 cm thick beige clay plaster	2.5 cm thick beige clay plaster	
	20 cm thick cob with 3% fibre	20 cm thick cob with 6% fibre	
Interior side	2.5 cm thick beige clay plaster	2.5 cm thick beige clay plaster	
	Type VI	Type VII	
c)	 2.5 20 2.5	 2.5 20 2.5	
Exterior side	2.5 cm thick spruce wood	2.5 cm thick spruce wood	
	20 cm thick cob with 3% fibre	20 cm thick cob with 6% fibre	
Interior side	2.5 cm thick spruce wood	2.5 cm thick spruce wood	

Tableau 6.2 Wall systems configuration, a) single-layer walls, b,c, d and e)
Multi-layer walls (suite)





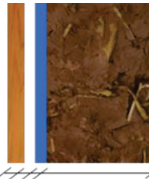
	Type VIII	Type IX		Type X	Type XI	Type XII
d)						
Exterior side	1 cm thick beige clay plaster 1.5 cm thick spruce wood 20 cm thick cob with 3% fibre 1.5 cm thick spruce wood	1 cm thick beige clay plaster 1.5 cm thick spruce wood 20 cm thick cob with 6% fibre 1.5 cm thick spruce wood		2.5 cm beige clay 0.1 cm 3M™3015 air/vapor barrier 20 cm cob with 6% fibre	2.5 cm spruce wood 0.1 cm 3M™3015 air/vapor barrier 20 cm cob with 6% fibre	2 cm spruce wood 1 cm air gap 0.1 cm 3M™3015 air/vapor barrier 20 cm cob with 6% fibre
Interior side	1 cm thick beige clay plaster	1 cm thick beige clay plaster		2.5 cm beige clay	2.5 cm spruce wood	2 cm spruce wood

Tableau 6.3 Hygrothermal properties of wall materials
Tiré de Ouellet-Plamondon, C. & Kabore, A. (2023)

Materials	Red clay	Beige clay	Cob with 3% fibres	Cob with 6% fibres	Spruce wood
Density (kg/m ³)	2016	1956	1654	1412	400
Thermal conductivity (W/m.K)	0.75	0.87	0.52	0.20	0.087
Specific heat (J/kg.K)	901	930	917	944	1880
Water vapour resistance (dry)	14.52	20	15.11	14.71	552
Water vapour resistance (wet)	3.57	4.95	4.64	5.32	-
Porosity	20.63	20.12	37.14	45.43	0.9
Water content at 80% RH (%)	3.22	2.32	3.57	3.63	55.8
Free water saturation (%)	159.91	141.73	132.37	119.32	845

Tableau 6.4 Thermal resistance (R) and thermal transmittance (U) value for each wall

Walls	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI	Type VII	Type VIII	Type IX
R-Value (m ² .K)/W	0.26	0.38	0.98	0.44	1.04	0.96	1.56	0.75	1.35
U-Value W/(m ² .K)	2.23	1.76	0.86	1.60	0.82	0.87	0.57	1.07	0.65

Tableau 6.5 Thermal resistance (R) and thermal transmittance (U) value for each wall with 3M™ 3015 air/vapor barrier membrane

Walls	Type X	Type XI	Type XII
R-Value (m ² .K)/W	1.04	1.55	1.58
U-Value W/(m ² .K)	0.82	0.58	0.57

6.6 Mathematical models

6.6.1 Energy and mass balance for WUFI Pro and COMSOL Multiphysics software simulation

The building envelope made of cob, wood/cob, whether it is reinforced with few or many fibres, consists of porous materials. The envelope, that separates two environments (exterior and interior), is the site of heat and moisture transfers. The modes of transfer in these types of envelopes are thus the transfer of heat, liquid-phase water, and/or vapour-phase water (H. M. Künzle & Germany, 2012b). Therefore, to realistically predict the hygrothermal behaviour of porous envelopes, it is necessary to consider the coupling of energy and mass transfers, as well as external climate events. The impact of energy and mass transfers in the envelopes is explained by the imbalance of heat flow, which results in a temperature variation across the envelope between the moment t and the moment $t + dt$, where dt is the time variation. Similarly, an imbalance of moisture flows (vapour in the liquid state) results in a variation (storage or release) of moisture across the envelope. An imbalance of vapour flows can lead to the adsorption or desorption of water (vapour condensation or water evaporation), involving latent heat (L_v), which is added to the thermal balance of the heat equation (Equations 6.2 and 6.8). To analyze the hygrothermal performance of the cob formulations designed for the study project, a coupled modelling of heat and moisture transfer was implemented, and the influence of extreme temperature and humidity on the walls was evaluated. Figure 6.1 shows the phenomena that occur in a wall and on the surfaces of a wall.

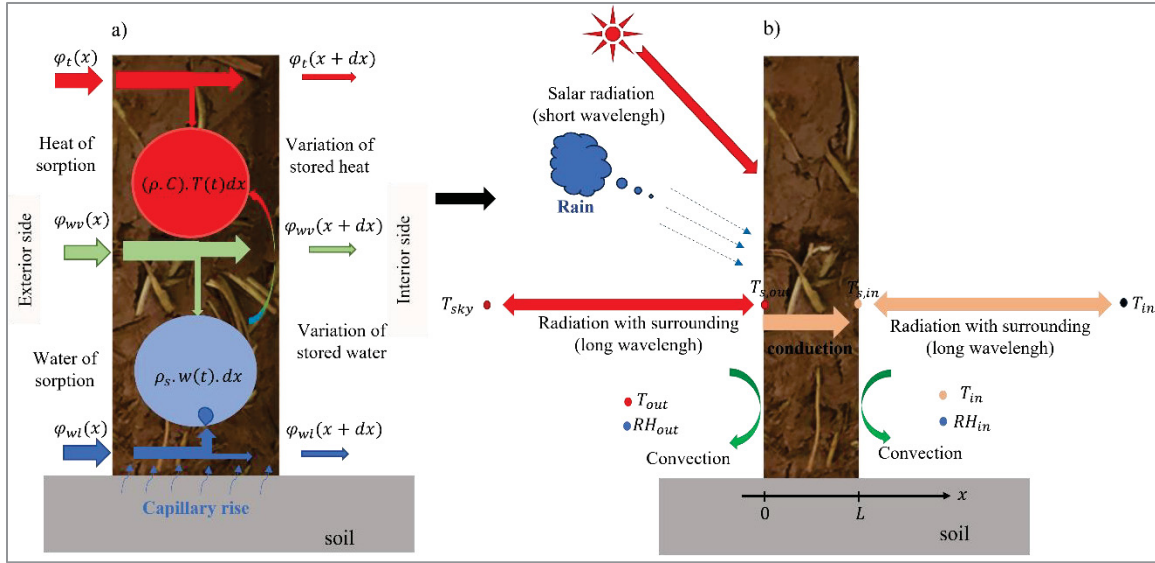


Figure 6.1 Interactions between the external and internal environment and a hygroscopic wall, a) heat and moisture storage in the wall, b) heat or moisture exchange between external and internal surfaces

The numerical simulation with COMSOL 6.1 was carried out in a transient regime. The coupled mass and energy transfer equation is defined by Equation 6.1 and Equation 6.2 (Lelièvre, 2015).

$$\rho_s \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = -\nabla \cdot (- (D_v^{HR} + D_l^{HR}) \nabla HR - D_v^T \nabla T) \quad (6.1)$$

$$C_{mat} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) - \rho_s \cdot c_{pl} \cdot T \cdot \frac{d(Wm)}{dt} + \left(D_v^{HR} \frac{d(HR_x)}{dx} + D_v^T \frac{d(T_x)}{dx} \right) \cdot Lv \quad (6.2)$$

With ρ_s is the dry mass density of the material in kg/m^3 , C_{mat} is the thermal capacity of the material in J/kg.K , λ is the thermal conductivity in W/m.K , L_v is the constant latent heat of vaporization which is simplified to 2500 kJ/kg , C_{pl} is the thermal capacity of liquid water equal to 4186 J/kg.K . The diffusion coefficients of water vapour D_v^{HR} , liquid water migration D_l^{HR} , water vapour thermodiffusion D_v^T , and saturation vapour pressure P_v^{sat} , are expressed by Equations 6.3, 6.4, 6.5, and 6.6 (Bendouma, 2018a).

$$D_v^{HR} = D_v \frac{M_v \cdot P_{vsat}(T)}{R \cdot T} \quad (6.3)$$

$$D_l^{HR} = \left(\frac{d_{wm}}{dHR} \right) \cdot \exp \left(p_1 - \frac{p_2}{Wm} \right) \quad (6.4)$$

$$D_v^T = \frac{D_v \cdot M_v}{R \cdot T} HR \left(\frac{d(P_{vsat}(T))}{dT} - \frac{P_{vsat}(T)}{T} \right) \quad (6.5)$$

$$P_{vsat}(T) = P_{atm} \exp \left(\frac{13.7 - 5120}{T} \right) \quad (6.6)$$

With D_v is the water vapour diffusion coefficient, M_v is the molar mass of water in kg/mol, R ideal gas constant in J/mol K, T is the temperature in K, Wm is the water content of the material in kg/kg, P_{atm} is atmospheric pressure in Pa, $p_1 = -13.5$ and $p_2 = -0.015$ are adjustable parameters in Equation 6.4.

The software COMSOL 6.1 has already been used to solve the highly coupled hygrothermal transfer equations of porous materials (Bendouma, 2018a; Kittiworrawatt & Devahastin, 2009; Lelièvre, 2015; Wei et al., 2019). The sorption curve of each material was adjusted using the GAB model to determine the model coefficients for numerical simulations on COMSOL 6.1 using Equation 6.7. The GAB model (Guggenheim-Anderson-de Boer) is widely used to describe water adsorption in porous materials, thanks to its ability to account for the interactions between water molecules and porous surfaces (Roos, 2024; R. Yang et al., 2021). The model accurately represents adsorption isotherms, even in complex structures, thereby allowing the validation of experimental adsorption data (R. Yang et al., 2021). Table 6.5 presents the GAB model coefficients for each material, and Figure 6.2 shows the evolution of measured and evaluated, through GAB model, water content of the different materials.

$$w_m = \frac{(W_{GAB} \cdot C_{GAB} \cdot K_{GAB} \cdot HR)}{((1 - K_{GAB} \cdot HR)(1 - K_{GAB} \cdot HR + C_{GAB} \cdot K_{GAB} \cdot HR))} \quad (6.7)$$

Where w_m is moisture content absorbed by the material, in kg of water per kg of dry matter, W_{GAB} is maximum amount of water the material can absorb, C_{GAB} is affinity of the material

surface for water, K_{GAB} is isotherm shape correction coefficient, which adjusts the curvature of the isotherm and HR is the relative humidity.

Tableau 6.6 GAB coefficients for the COMSOL 6.1 simulation

Type of material	W_{gab}	C_{gab}	K_{gab}
Clay	0.011	50	0.83
Cob3%f	0.012	35	0.82
Cob6% f	0.013	16	0.081

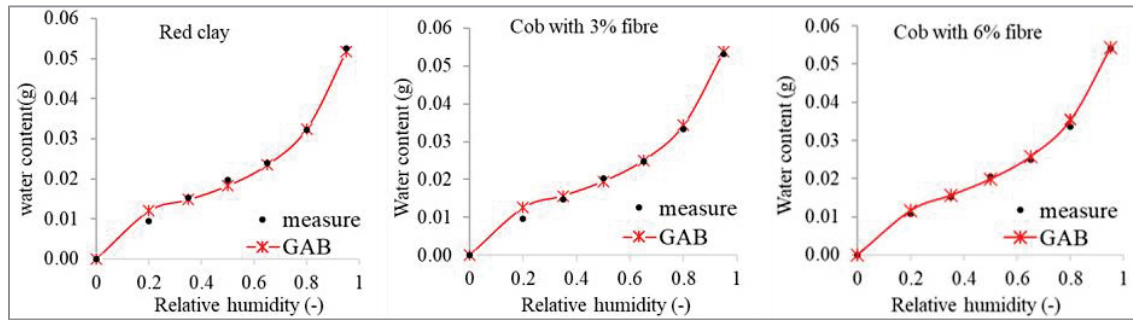


Figure 6.2 Water adsorption isotherms for clay and cob materials

These conservation equations for mass and heat used for the simulation with the WUFI PRO 6.7 are presented by Equations 6.8 and 6.9 are developed in the articles by Künzel (H. M. Künzel, 1995; H. M. Künzel & Germany, 2012a).

$$\frac{\partial w}{\partial H_R} \cdot \frac{\partial H_R}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla H_R + \delta_P \nabla \cdot (H_R P_{sat})) \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L_v \nabla \cdot (\delta_P \cdot \nabla (H_R P_{sat})) \quad (6.9)$$

6.6.2 Boundary conditions

The energy and mass balance of the exterior surface at $x=0$ is determined by Equations 6.10 and 6.11 using meteorological data such as the exterior temperature (T_{out}), the solar radiation (E_s) determined by Equation 6.15, the exterior humidity (HR_{out}), and the exterior atmospheric pressure. The energy and mass balance of the interior surface at $x = L$ is derived from the

interior temperature, interior humidity, and interior atmospheric pressure and expressed by Equations 6.12 and 6.13.

$$\begin{aligned} \varphi_{T(x=0)} = & hcv_{out} \cdot (T_{out} - T_{x=0}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_{sky}^4 - T_{x=0}^4) \\ & + \alpha \cdot E_s + L_v \varphi_{M(x=0)} \end{aligned} \quad (6.10)$$

$$\varphi_{M(x=0)} = h_{Mout} \frac{M_V}{R} \left(\frac{HR_{out} P_{vsat}(T_{out})}{T_{out}} - \frac{HR_{x=0} P_{vsat}(T)}{T} \right) \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{T(x=L)} = & hcv_{in} \cdot (T_{in} - T_{x=L}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_{in}^4 - T_{x=L}^4) \\ & + L_v \varphi_{M(x=L)} \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\varphi_{M(x=L)} = h_{Mins} \frac{M_V}{R} \left(\frac{HR_{x=L} P_{vsat}(T_{x=L})}{T_{x=L}} - \frac{HR_{ins} P_{vsat}(T_{ins})}{T_{ins}} \right) \quad (6.13)$$

Where hcv_{out} and hcv_{in} are the coefficients of external and internal convection respectively determined by Equations 6.16 and 6.17, relationships suggested by ASHRAE, and the fictive sky temperature (T_{sky}) determined by Equation 6.18 (Evangelisti, Guattari, & Asdrubali, 2019). The mass exchange coefficient h_M is derived from the Lewis relation given by Equation 6.14 (Bendouma, 2018a). σ is the Stefan-Boltzmann constant, F is the shape factor, α the short-wave absorptivity of the material, ε is the long-wave emissivity, and P_{vsat} is the saturation vapour pressure.

$$h_M = \frac{h_{cv}}{\rho C_p Le^{2/3}} \quad (6.14)$$

$$E_s = \frac{1+\cos(\Sigma)}{2} \cdot E_{diffH} + \frac{\cos(\theta)}{\sin(\beta)} \cdot E_{dirH} + \omega \cdot \frac{E_{meas}(1-\cos(\Sigma))}{2} \quad (6.15)$$

$$hcv_{out} = 1.53 V_w + 1.43 \quad (6.16)$$

$$hcv_{in} = 1.5 (T_{x=L} - T_{in})^{\frac{1}{3}} \quad (6.17)$$

$$T_{sky} = T_{out} - 9 \quad (6.18)$$

Where E_{meas} is the sum of horizontal direct irradiation (E_{dirH}) and horizontal diffuse irradiation (E_{diffH}) (meteorological data), $\Sigma = \pi/2$ for vertical walls, θ is the angle of incidence (meteorological data), $\beta = 90^\circ$ for vertical walls, and ω is the ground reflectivity equal to 0.2 in this study (Ibrahim, Bianco, Ibrahim, & Wurtz, 2018), and V_w is the wind speed (meteorological data).

6.6.3 Simulation assumptions

This study focuses on the numerical modelling of the hygrothermal behaviour of nine wall systems. The COMSOL 6.1 model, developed for the simulation of single-layer walls, was used for the numerical simulation of walls of Type I, Type II, and Type III. The assumptions made to carry out the simulation are presented as follows:

1. The gaseous phase consisting of water vapor and air obeys the ideal gas law. The different solid-liquid-vapor phases are in thermodynamic equilibrium, and the fluids absorbed in the porous medium are incompressible and continuous.
2. Solar flows, ambient temperature, and humidity are time-dependent. Climate data from January 01, 2022, to January 01, 2023, were used.
3. The interior temperature was set to 24 ± 2 °C for cities with hot and arid climates, and to 21.9 ± 2 °C for cities with cold and humid climates, with interior humidity at $50 \pm 10\%$, in accordance with ANSI/ASHRAE Standard 55 (ANSI/ASHRAE 55, 2004).
4. The initial relative temperature and humidity of the walls are uniform and set at 20 °C and 50%.
5. The short-wave absorptivity (α) of the materials is set at 0.7 for cob and clay walls, in accordance with the literature (Collet, Serres, Miriel, & Bart, 2006; Toure, Dieye, Gueye, Faye, & Sambou, 2020).
6. For long-wave radiative exchanges, the shape factors are expressed by $F = \frac{(1+\cos(\beta))}{2}$ with $\beta = \frac{\pi}{2}$ for vertical walls (Nelson, 2020) (our case study), and the interior radiation temperature equal the interior temperature.

7. The long-wave emissivity (ϵ) of the materials is set at 0.9, a value obtained in WUFI Pro 6.7.

For the WUFI Pro 6.7 simulations, the nine wall systems were simulated with the following assumptions:

1. The assumptions 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7 applied for the COMSOL 6.1 simulation were applied.
2. The short-wave absorptivity (α) takes into account the material of the outer surface of multilayer walls.
3. The orientation of the walls is chosen for the worst case of driving rain. The amount of rain hitting the wall is calculated according to ASHRAE Standard 160 based on wind speed and direction, with the wall's exposure factor to rain (FE) equal to 1.4 and the rain deposition factor on the wall (FD) equal to 0.5.
4. For the simulation period presented in point 1, climate data from 3 years were used for the WUFI Pro 6.7 simulations, from January 01, 2020, to January 01, 2023, and the results of January 01, 2022, to January 01, 2023, were analyzed.
5. The average annual cloudiness index applied to the outdoor environment for each city was taken into account, and this data is presented in the section 6.6.4 in Table 6.5.

In this study, the validation of the WUFI Pro model was conducted using data from Dhakal et al (Dhakal et al., 2017) and Lamalle (Lamalle, 2016). The details and results are presented in the referenced works (Kaboré, Maref et Ouellet-Plamondon, 2024). Dhakal et al. (Dhakal et al., 2017) analyzed the impact of mix proportions on the properties of hemp concrete and the hygrothermal performance of two hemp concrete walls, each 33.5 cm thick, designed for construction in Ontario, Canada. Meanwhile, Lamalle (Lamalle, 2016) examined five wall configurations to evaluate the hygrothermal performance of wood concrete for the city of Liège. Among these configurations, a 26 cm thick wood concrete wall was used to validate our model. The results of the numerical simulations performed with our model align perfectly with the findings of both authors, thus confirming the reliability and accuracy of our approach.

For the COMSOL model, two studies using the same model for the numerical simulation of insulated walls, validated by experimental data, allowed the model to be considered reliable. The results of the simulations were compared to the experimental results, which aligned with these experimental findings (Bendouma, 2018a; Colinart, Bendouma, & Glouannec, 2019). The COMSOL model was used in this study to evaluate the thermal performance of the rammed earth material in wall form, without considering cloud cover and heavy rain, and was used for the simulation only with three single-layer walls presented in section 2.2. For a simulation with multilayer walls, although the results presented in the authors' works (Bendouma, 2018a; Colinart, Bendouma, et al., 2019) pertain to multilayer walls, validation of the model with experimental data from cob walls would be necessary.

6.6.4 Climate data

The climatic data of the cities of Djibouti, Johannesburg, Cairo, Abidjan, Montreal, Paris, Rennes, and Reno were used to evaluate the hygrothermal performance of different cob walls. In total, the climatic data of eight cities consisting of cities with hot and arid climates, cold and humid climates, and temperate climates were used. The purpose of using variable climatic data is to analyze the capacity of cob walls to regulate interior temperature in climates with high temperatures and the damage that can be caused by exterior climates with very high humidity to cob walls. The external climatic parameters were obtained from (Weather API, 2012-2024). Figures AD-1 to AD-8 presented in Appendix, page 258 illustrates the hourly meteorological data parameters from January 1, 2022, to January 1, 2023, of the cities. Table 6.6 summarizes the maximum and minimum values of some climatic parameters of each city. To facilitate the analysis of the results, the cities were grouped into two zones. The hot and temperate climate zone represents the cities of Djibouti, Johannesburg, Cairo, and Abidjan, while the cold climate zone represents the cities of Montreal, Paris, Rennes, and Reno (Table 6.6).

Tableau 6.7 Summary of the hourly meteorological data (Weather API, 2012-2024)

Climate zone	City	Temperature		Relative Humidity		Global radiation	Nebulosity	Amount of rainwater	
		°C		%		W/m ²	-	l/(m ² ·h)	
		min	max	min	max	max	Average	min	max
Hot-temperate-climate zone	Djibouti	23	40	30	90	1050	0.31	0	2
	Johannesburg	0	42	10	80	1100	0.11	0	0.1
	Cairo	5	43	5	95	1050	0.18	0	2.5
	Abidjan	24	30	50	90	950	0.71	0	25
Cold-temperate-climate zone	Montreal	-26	36	20	100	950	0.64	0	3
	Paris	-6	40	20	100	950	0.4	0	8
	Rennes	-7	38	17	100	900	0.39	0	6
	Reno	-20	36	7	100	950	0.45	0	12.5

6.7 Results

To identify the best construction approach for each of the eight chosen locations, we evaluated eleven different cob wall configurations as outlined in Table 6.1. These walls were oriented to face the worst-case scenario for each locality, where precipitation is most intense. The results obtained from WUFI Pro 6.7 and COMSOL 6.1 data include temperatures, relative humidity, as well as heat and moisture flows, depending on the time and thickness of the material studied. The analysis of the walls' hygrothermal behaviour is based on hygrothermal criteria, with a critical humidity threshold set at 80% at every point in the wall. The goal of these simulations is to identify risks of condensation, mold growth, and thermal comfort issues for each climatic zone, and to offer recommendations for a better-adapted design.

6.7.1 Evaluation of temperature and humidity of the wall Type I to Type III

The evolution of temperature, independent of cloudiness and precipitation rates, was analyzed using COMSOL 6.1, while the impact of these two factors was studied with WUFI Pro 6.7. The average annual cloudiness rate for each city was calculated by WUFI Pro 6.7 using hourly climate data from each city, and this coefficient was associated with precipitation. Examining Figures 6.3, the effect of cloudiness and heavy rain on the evolution of the interior temperature of clay and cob walls with a thickness of 25 cm is visible. Moreover, the temperature of the

interior surface of the clay wall (Wall type I), not exposed to rain and cloudiness, reacts more to external climate variations, followed by the cob wall with 3% fibres (Wall type II) and the one with 6% fibres (Wall type III), respectively. The exposure of the three walls to heavy rain and cloudiness influences the evolution of the interior temperature for walls simulated with climate data from each city.

For walls simulated with climate data from the hot zone, the maximum temperatures for Wall type I, not exposed to rain and cloudiness, varied between 28.5 °C and 31 °C, and between 26.5 °C and 28.8 °C in case of exposure (Figure 3a to Figure 3d). The minimum temperature ranged between 22 °C and 27 °C, and between 19 °C and 25 °C in the presence of rain and cloudiness. The cob wall with 6% fibres (Type III) showed stable interior temperatures for all cities in the hot zone, except for Abidjan, where the temperature decreased from April to September. Regarding interior thermal comfort, clay walls do not provide the best thermal comfort in summer. When cloudiness and precipitation are considered, the temperatures of the interior surface always remain above 25 °C for the eight cities. However, the cob wall with 3% fibres shows temperatures slightly above 27 °C for most of the summer months, and the temperature of the interior surface of the cob wall with 6% fibres is close to the comfort temperature range set at 24 °C in summer throughout the year.

The maximum temperature for the wall type I, not exposed to rain and cloudiness, varied between 28 °C and 30 °C, while in the presence of these elements, it ranged between 24 °C and 25 °C, for cities in the cold zone (from Figure 3e to Figure 3h). The minimum temperature was 17 °C for the four cities, and in case of exposure to rain and cloudiness, it was between 13 °C and 15 °C. There is no heating in the modeling, which mean that additional heating would be required. Temperatures above 25 °C were observed from the beginning of May to the end of September for clay walls. The cob wall with 3% fibres (Type II) also recorded interior temperatures above 25 °C between May and September, except for the city of Reno. The cob wall with 6% fibres (Type II) had stable interior temperatures with a maximum of 25 °C for all cities in the cold zone.

Considering the rate of cloudiness and precipitation, leads to lower temperature of the interior walls surface compared to a simulation where these parameters are not considered. This

demonstrates the importance of inclusion these parameters to accurately predict the thermal behaviour of construction materials. Nonetheless, whether the cob wall contains 6% fibres or not, and whether it is exposed to heavy rain or not, it remains an acceptable option for the construction of bioclimatic buildings.

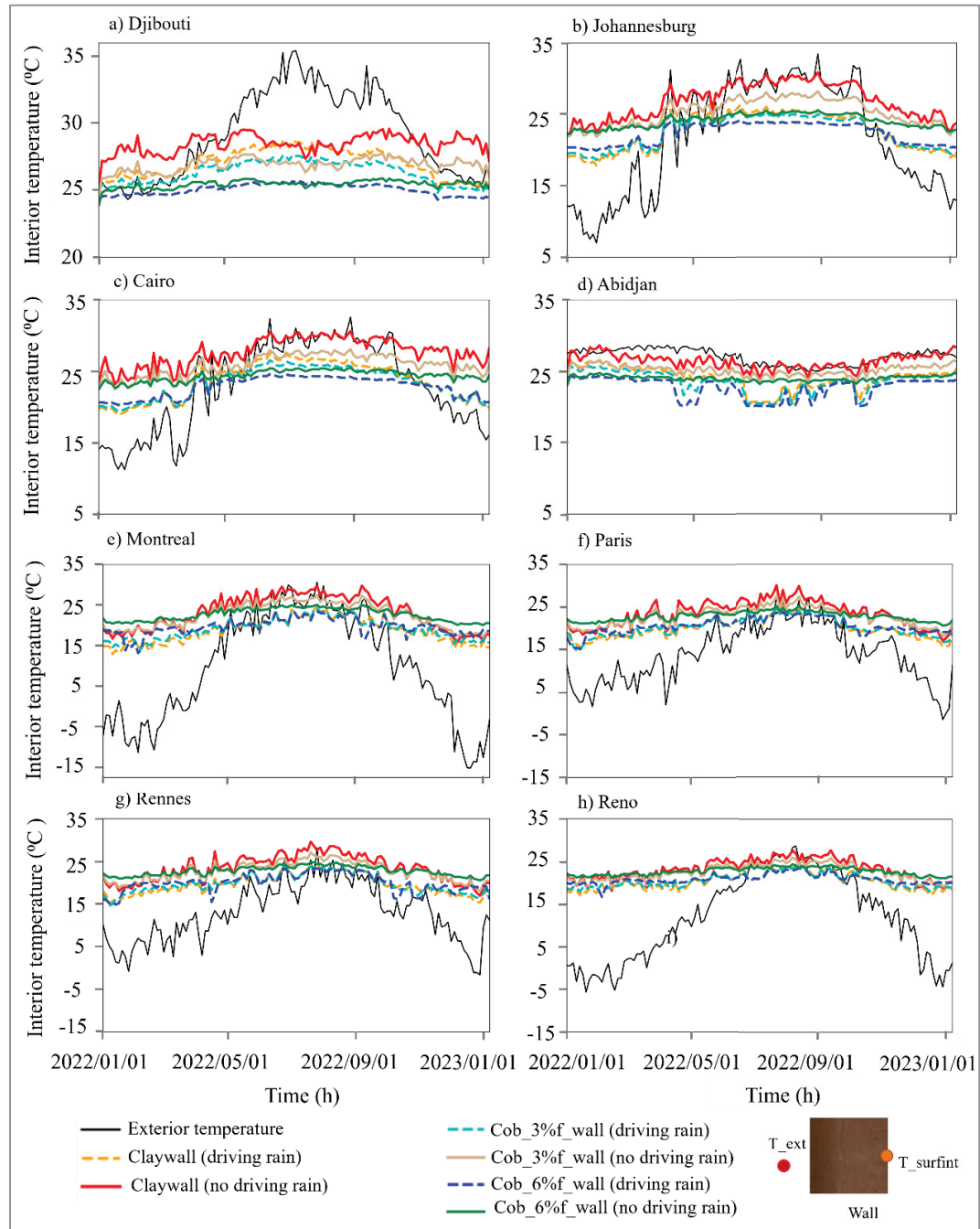


Figure 6.3 Influence of driving rain on the daily interior surface temperature of uncoated clay and cob walls for the eight cities studied

The humidity profile at a depth of 12.5 cm in the walls (marked by the blue dot), when subjected to the climates of each city, with or without exposure to driving rain and cloudiness, is presented in Figure 6.4. As the exterior climate varies over time in both simulation cases (WUFI Pro 6.7 and COMSOL 6.1), humidity fluctuations are more pronounced for walls that are either exposed or not exposed to hourly cloudiness and precipitation, at a depth of 12.5 cm from the walls. A relative humidity greater than 80% is observed at this depth in clay and cob walls with 3% fibres, exposed to driving rain throughout the year for the cities of Abidjan, Montreal, Paris, and Rennes (Figures 6.4d, 6.4e, 6.4f, and 6.4g). For the cob wall with 6% fibres, a fluctuation of relative humidity throughout the wall was observed, and it always remains above 80% throughout the year. For walls simulated with the climate data of Djibouti, Johannesburg, and Cairo, the humidity at 12.5 cm depth remains below 80% throughout the year (Figures 6.4a, 6.4b, and 6.4c), except for the city of Reno where the humidity fluctuates but remains below 80% for most days of the year (Figure 6.4h). According to Künzel et al. (H. Künzel, Holm, Zirkelbach, & Karagiozis, 2005), the risk of mold formation significantly increases when relative humidity exceeds 80% for more than two weeks. Excluding driving rain and cloudiness from the simulations, the humidity profile at 12.5 cm depth is below 70%. Figure 6.5 illustrates the evolution of humidity through the walls, simulated with the climate data of Montreal and Rennes. Between 5 cm and 20 cm in depth, the humidity varies between 60% and 50% and remains constant between 10 cm and 15 cm for the clay wall. For cob walls, between 5 cm and 20 cm in depth, the humidity maintains between 70% and 50% and remains constant between 10 cm and 15 cm in depth in both cities. On the exterior surface of the walls, at 0 cm, a humidity of around 90% is observed, thus a risk of water vapour condensation on the exterior surface of the walls.

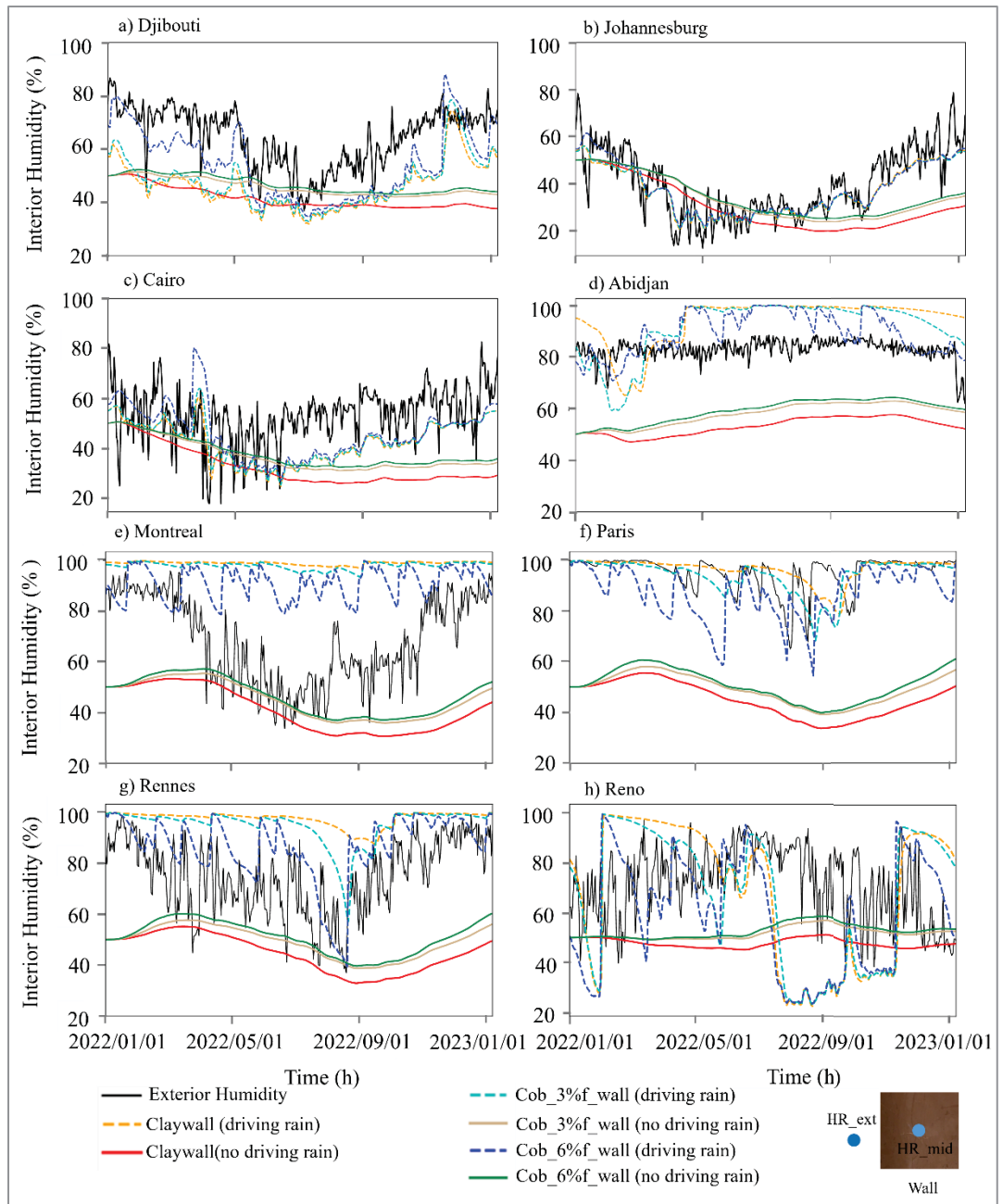


Figure 6.4 Influence of driving rain on the humidity at 12.5 cm of uncoated clay and cob walls for the eight cities studied

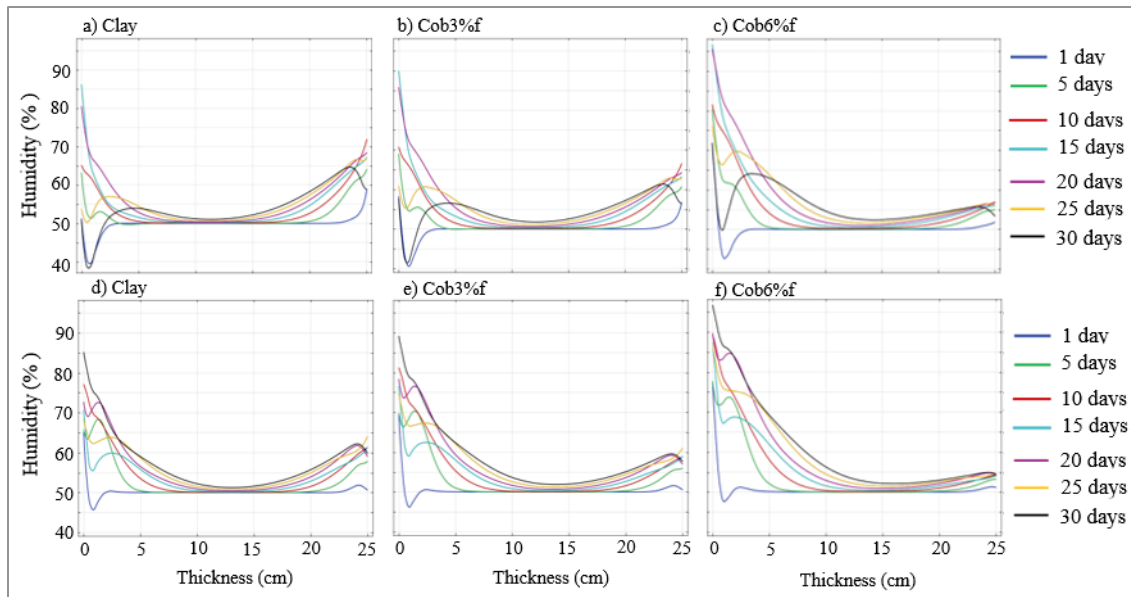


Figure 6.5 Evolution of humidity through the walls: a to c) Montreal and d to f) Rennes cities

6.7.2 Evaluation of humidity of the wall Type IV to Type IX

After observing the influence of considering driving rain and cloudiness rates on the moisture profile at a depth of 12.5 cm of clay and cob walls under different climatic conditions (Figures 6.4 and 6.5), the evaluation subsequently focused on multilayer cob walls. The average moisture for two consecutive months, from February 1st to April 1st (two-month average), was evaluated in order to identify the risk of mold in these walls (Figure 6.6). Six multilayer walls were simulated with the climatic data of each city, and the configuration of these wall systems is presented in Tables 6.1 and 6.2, section 6.5.2. The simulation results indicated that the multilayer configurations type IV and V showed daily and two-month average humidity levels above 80% for the cities of Paris, Rennes, and Reno. Moreover, in addition to configurations IV and V, the multilayer configurations VIII and IX also showed humidity rates above 80% throughout the thickness of the cob walls for Montreal City. All walls displayed humidity rates above 80% throughout the thickness of the cob walls when simulated with the climatic data of Abidjan city. This issue of lack of drying of the wall components for the Abidjan city can be mainly attributed to the high cloudiness rate of 0.71 with a maximum rain amount of about 25 litres/m²/h and a very high precipitation duration

compared to the other cities (Figure AD-8 in the supplementary document). In contrast, the humidity variation in all configurations remains below 70% for the cities of Djibouti, Johannesburg, and Cairo.

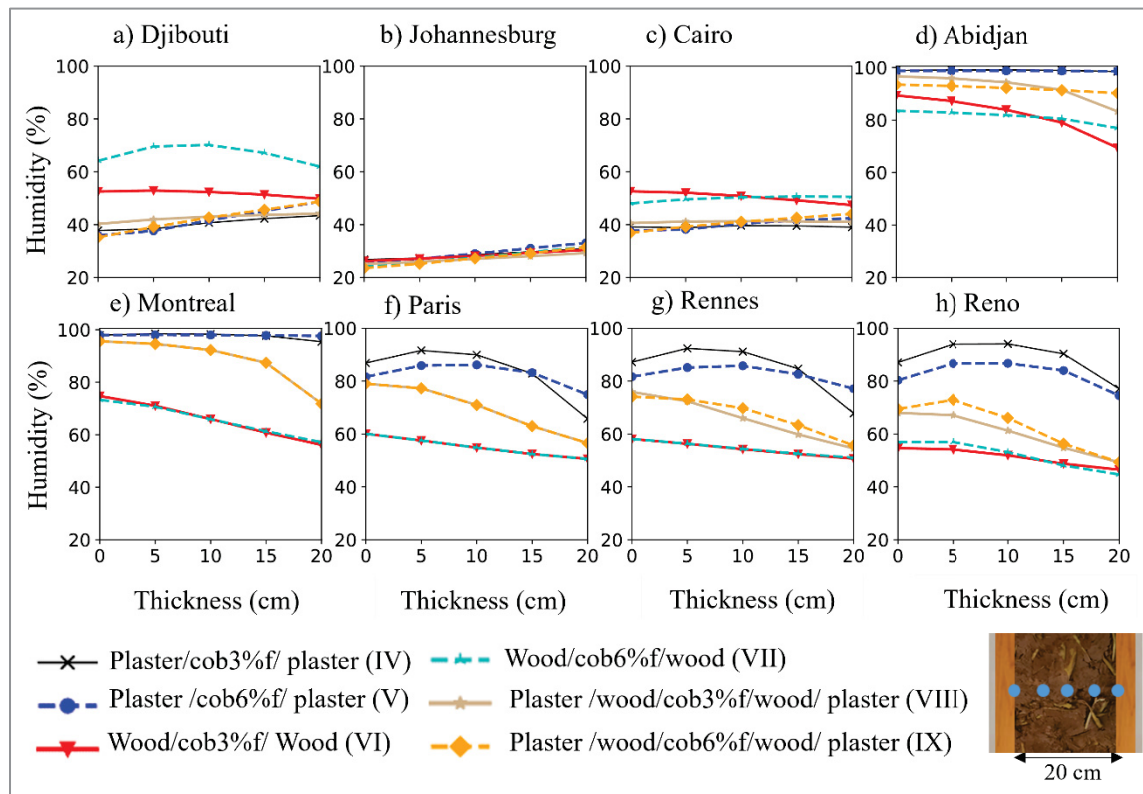


Figure 6.6 Average humidity over two months (February, March) at each blue point indicated on the wall (for all walls, humidity is assessed at the same positions), for the eight cities studied

6.7.3 Interior heat and humidity flow

Figure 6.7 illustrates the heat flow profile on the inner surface of cob walls, while Figure 6.8 shows the seasonal average of this flow. A positive flow indicates a heat gain, which shows that heat moves from the wall surface to the interior environment, while a negative flow indicates a heat loss, with heat moving from the interior to the wall surface. In hot zones, Djibouti displayed a positive thermal flow throughout the year (Figures 6.7a and 6.8a). The interior surfaces of walls, simulated with climate data of the Johannesburg and Cairo cities, showed a loss of heat flow in winter and autumn, and a gain in summer (Figures 6.7b to 6.7c

and 6.8b to 6.8c). In Abidjan, a decrease of thermal flow is observed in summer for type IV and V walls, and a gain in winter and autumn (Figures 6.7d and 6.8d). This decrease can be attributed to driving rain, temperature drops, and the lack of clear sky to allow the walls to dry normally after a rainstorm. This leads to a loss of heat from the walls to allow them to dry or balance the interior environment's temperature.

The results reveal predominantly negative thermal flow throughout the year, except for a few days in summer, in cities of cold zones (Figures 6.7e to 6.7h and 6.8e to 6.8h). Type IV and V walls recorded a heat loss ranging between 0 and 70 W/m². Heat losses increase when the temperature drops, and humidity rises. However, examining the simulation results, a wall with a timber-frame structure allows for a reduction in heat losses, leading to a decrease in energy consumption for heating. The use of cob materials for the structure of timber-frame buildings significantly reduced the heat losses from the interior surface of the walls. Moreover, heat flow is stable with the amount of fibres present in the cob.

In terms of seasonal average, the wall type IV, made of a plaster/cob containing 3% fibres/plaster, showed the most significant thermal losses, with values of about 40 W/m² in Montreal, 23.8 W/m² in Paris, 25 W/m² in Rennes, and 16 W/m² in Reno (Figures 6.8e to 6.8 g). Type VII wall showed low thermal losses for all cities in the cold zone. The addition of a clay plaster led to an increase in heat losses. For cities in the hot zone, Johannesburg and Cairo recorded thermal losses of about 10 W/m² and 6 W/m² in winter, while in Abidjan, the loss was about 13 W/m² for the wall of type V (plaster/cob with 6% fibres/plaster). Conversely, in Djibouti, a positive thermal flow was observed throughout the year for all simulated walls.

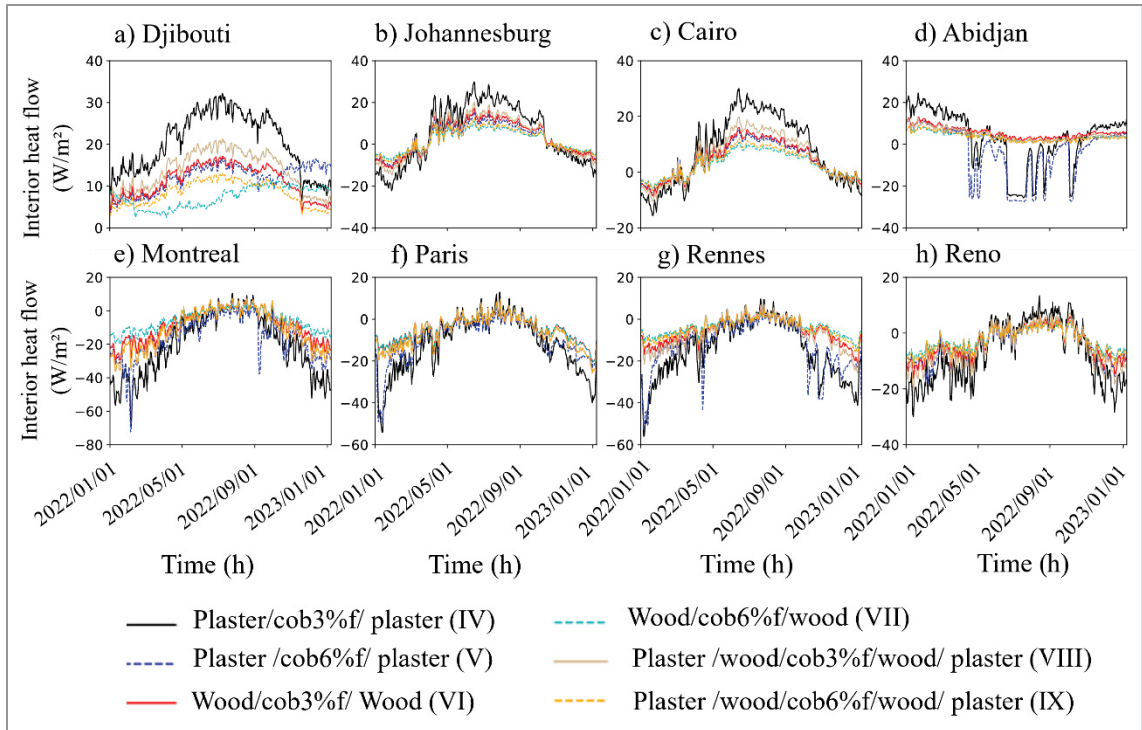


Figure 6.7 Heat flow profile of the interior wall surfaces for the eight cities studied

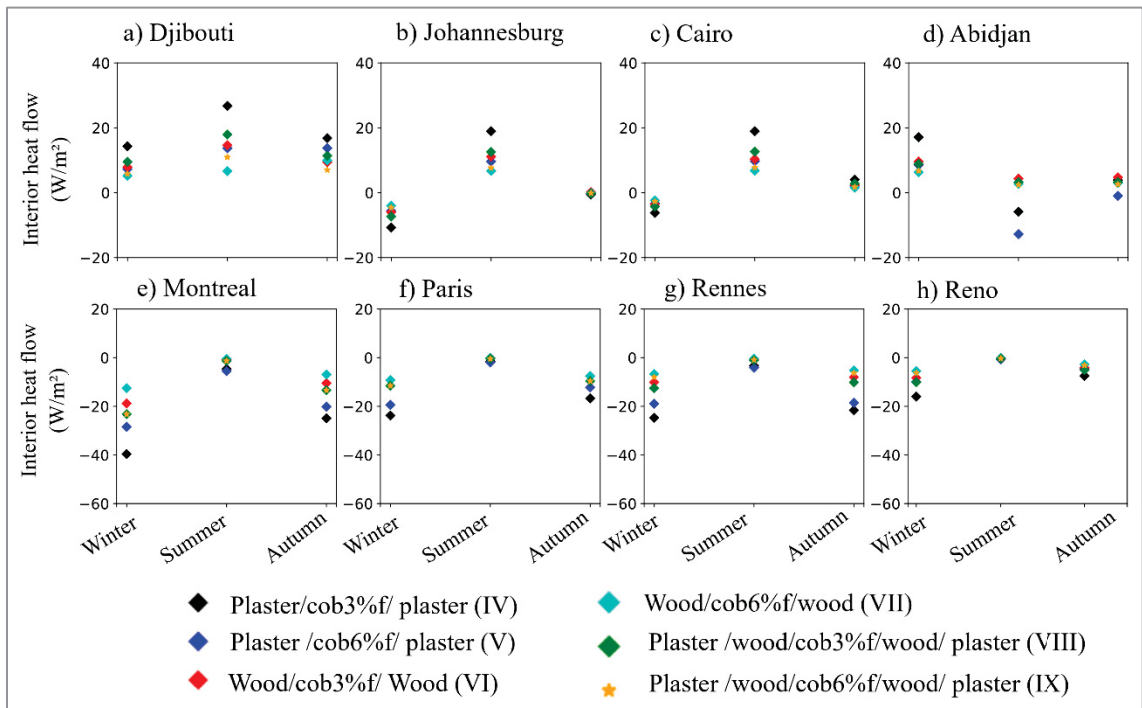


Figure 6.8 Seasonal average heat flow of the interior wall surfaces for the eight cities studied

As for heat flow, a negative moisture flow indicates the absorption of moisture by the interior surface of the wall, while a positive flow represents the release of moisture from this surface to the outside or inside the building. A positive moisture flow also indicates an increase in moisture within the walls. A significant increase in moisture flow in the walls can harm their durability and the building's thermal comfort. This can damage the wall materials, promote mold growth, reduce energy efficiency, and compromise the occupants' well-being. Figure 6.9 illustrates the moisture flow profile on the interior surface of cob walls, while Figure 6.10 shows the seasonal average of this flow.

For walls of type IV and V simulated with data from cold zone cities and the city of Abidjan, moisture flow showed considerable variability. For the rest of the cities in the hot zone, the maximum moisture flow for walls of types VI and VII was relatively low. The different local climatic conditions influence the water behaviour of the walls and the management of moisture. On a seasonal average, the moisture flow of type IV and V walls varied significantly for all simulations conducted with data from each city. The moisture flows are positive for all types of walls examined, with a tendency of moisture flow approaching zero for walls of type VI to IX. It is crucial to note that incorporating fibres into the cob significantly increases the moisture absorption capacity, thus playing a vital role in regulating interior humidity and, by extension, in the comfort and health of the occupants.

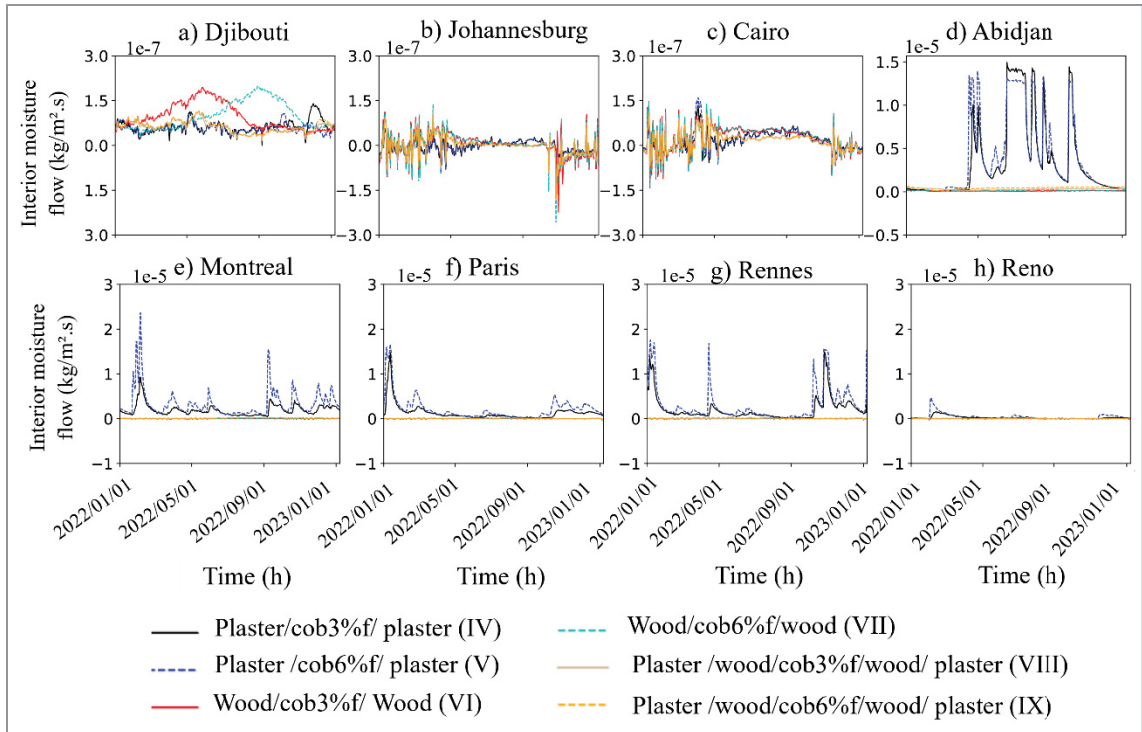


Figure 6.9 Moisture flow profile of the interior wall surface for the eight cities studied

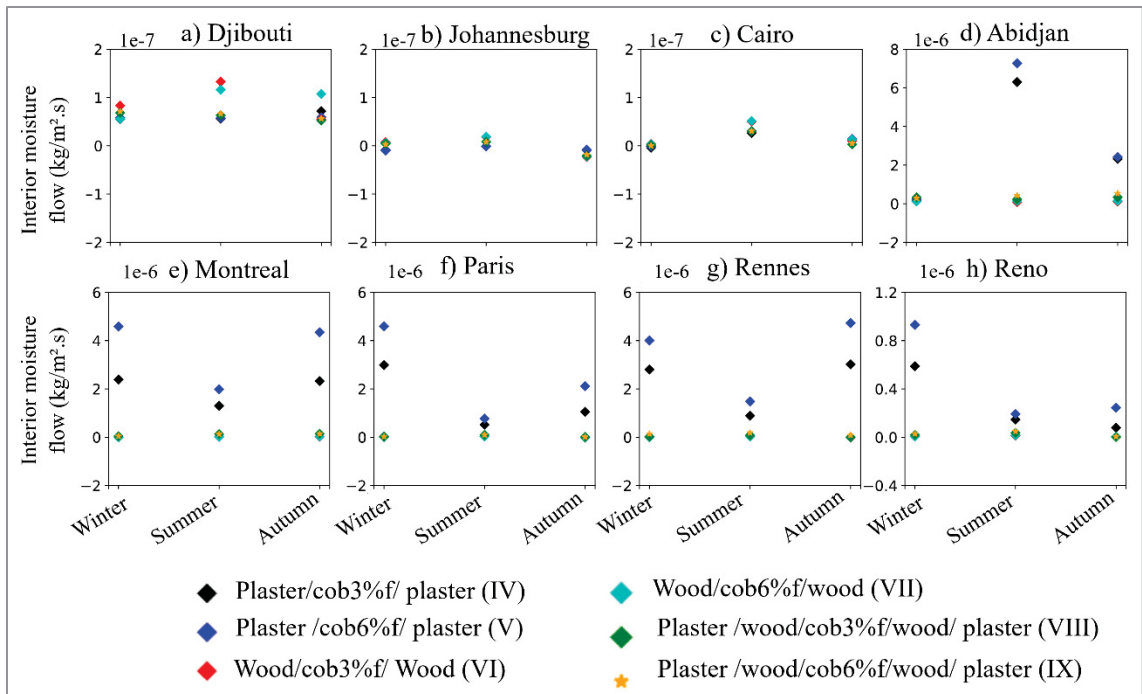


Figure 6.10 Seasonal average moisture flow of the interior wall surfaces for the eight cities studied

6.8 Discussion

The humidity values, as well as the heat and moisture flow in the walls, are critical parameters for assessing hygrothermal behaviour. These are influenced by varying climatic conditions and the properties of the materials used, such as clay, cob, and other wall components. To assess the hygrothermal performance of these materials against different external climates, hygrothermal simulations were conducted using COMSOL 6.1 and WUFI Pro 6.7 for nine walls, including eight cob walls and one clay wall. Of the eight cob walls, six are multilayered and two are single-layered. The single-layer clay wall serves as a reference for the two single-layer cob walls. These simulations provided insights into temperature, humidity variations, and heat and moisture flow over time, based on the climatic data specific to each city used for the simulation. The climatic data, encompassing both cold and warm climate countries, offer an idea of the hygrothermal performance of cob materials in different climatic zones. For instance, various authors have found good consistency between the results of numerical simulations and on-site measured data for walls constructed with earth materials (Guizzardi, Derome, & Carmeliet, 2016; Hamid & Wallentén, 2017), geosourced materials (Alioui, Kaitouni, Azalam, Bendada, & Mabrouki, 2024b), and biosourced materials (Bastien, Winther-Gaasvig, Zhang Andersson, Xiao, & Ge, 2023; Boumediene et al., 2022; Defo, Lacasse, & Laouadi, 2022; Dubois, Evrard, & Lebeau, 2014; Moujalled et al., 2018).

6.8.1 Thermal performance of the walls

In terms of thermal performance, earth construction materials are recognized for their ability to regulate temperature and humidity (Giada et al., 2019; Lalicata, Bruno, & Gallipoli, 2023; Wakil, El Mghari, Kaitouni, & El Amraoui, 2024). According to all simulations conducted with COMSOL 6.1 and WUFI Pro 6.7, compiling climatic data, the temperature of the interior surface of clay walls varied between 12 °C (in the coldest city) and 29.6 °C (in the hottest city), this is for exterior temperatures from -15 °C to 43 °C (see Figures 6.3, 6.11, and 6.12).

Multi-layer walls, simulated with the climatic data of the hot zone and with little cloud cover (see Table 6.3 and Figures 6.11a, 6.11b, and 6.11c), showed temperatures of the interior

surface of the walls varying between 24 °C and 26 °C for Djibouti, and between 19.5 °C and 21 °C for Johannesburg and Cairo in winter. During summer and autumn, these temperatures ranged from 24.3 °C to 26.6 °C for Djibouti and from 21 °C to 26 °C for Johannesburg and Cairo.

Regarding cob walls, although type II to V, VIII, and IX are not suitable for very cold climates or those with significant precipitation and dense cloud cover, their ability to regulate interior temperature remains satisfactory (see Figures 6.11d and 6.12). The use of a wooden structure or a vapour/air barrier for the design of cob buildings would improve thermal performance, with an increase in the minimum temperature of the interior surface of single-layer walls from 14 °C to 17 °C, an increase of 3 °C. Moreover, multi-layer walls made of cob with 6% fibres (types V, VII, IX to XII) offer better interior comfort, with interior temperatures ranging from 17 °C to 20 °C in winter, 20 °C to 25 °C in summer, and 21 °C to 15 °C in autumn, facing average daily exterior temperatures oscillating between -15 °C and 35 °C. Walls types VI, VII, XI and XII, combining wood and cob, showed average daily interior temperatures ranging from 18 °C to 25 °C. It is recommended to keep the temperature of the interior surface of the walls in cold areas above 12.6 °C (Ahmad et al., 2021), and this criterion has been met by the cob walls with a minimum temperature of 14 °C.

The design of cob walls proves advantageous in hot climates, as it helps reduce the need for air conditioning. However, in cold climates, using cob requires special attention, particularly because of the serious problems that wall drying during construction can pose. These problems are related to humidity and very low temperatures, which lead to delays in the drying of the walls and cause an accumulation of moisture in the walls. For a construction made of earth or cob, it is necessary to prioritize multi-layer walls by adding additional layers to the wall and, beforehand, to use prefabricated and dry earth or cob materials to reduce drying time on the construction site. Construction should also be planned for warmer and drier seasons to avoid risks related to humidity and freezing.

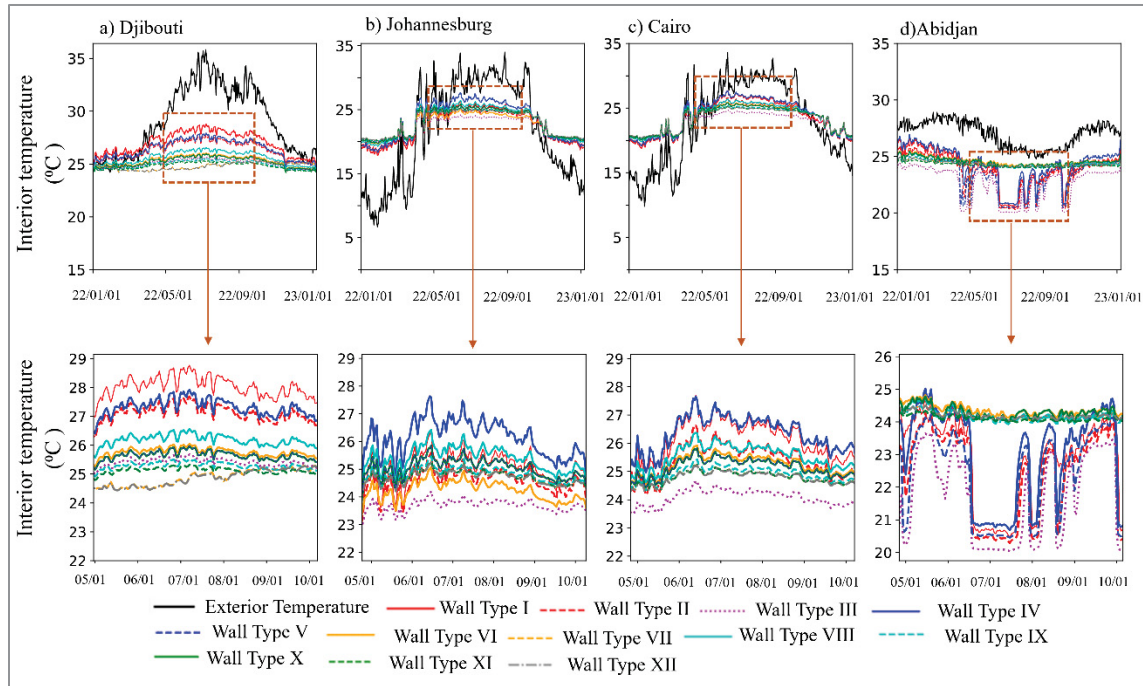


Figure 6.11 Daily interior wall surface temperature in hot period

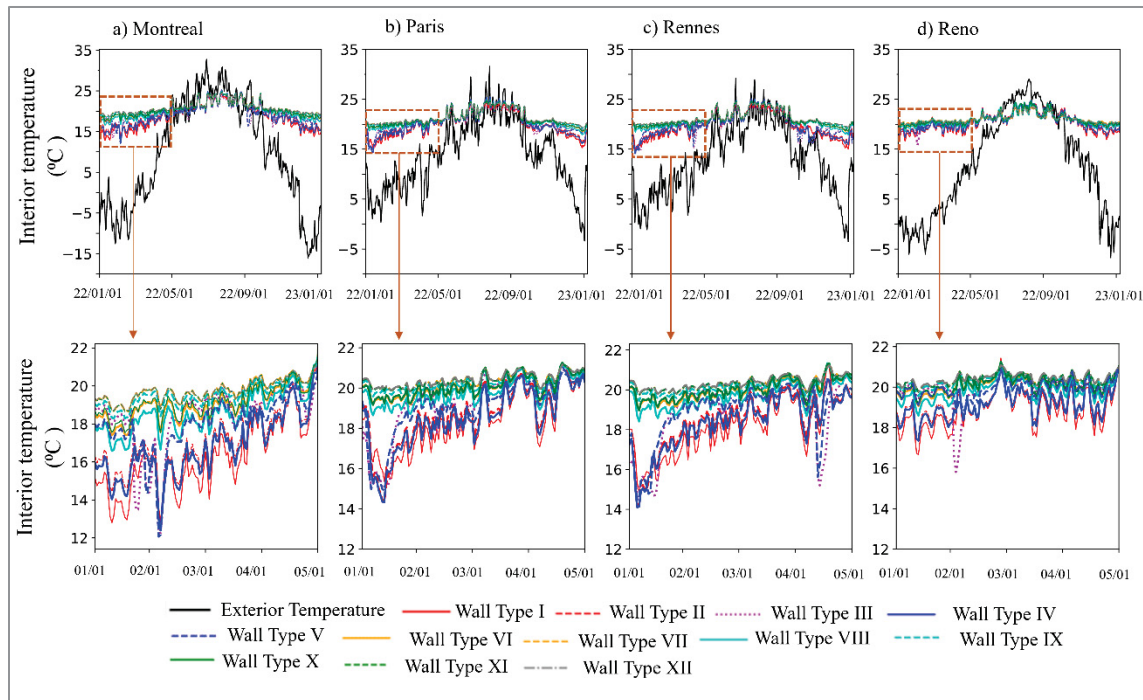


Figure 6.12 Daily interior wall surface temperature in cold period

6.8.2 Evaluation of mold growth in the walls

To assess the risk of mold development in different types of simulated walls, the WUFI Pro 6.7 software uses the LIM (Lowest Isopleth for Mold) model. A moisture isopleth for building materials is a line drawn on a diagram connecting points of constant moisture throughout a material. This graphical representation allows visualization of how moisture distributes within the material under different environmental conditions. Analyzing moisture isopleths is essential for understanding the hygroscopic behavior of materials, assessing risks of mold, or degradation, and optimizing the thermal and sustainable performance of constructions. In practice, this helps engineers and architects design more resilient structures and prevent moisture-related issues. This model defines two categories of substrates, taking into account relative humidity, temperature, and the effect of construction materials. The LIM I category pertains to biodegradable materials used in construction, such as wallpaper and materials for permanent elasticity joints. The LIM II category, on the other hand, applies to porous construction materials. The analysis of the materials of the simulated walls in this study is based on the LIM II curve. Events below the LIM II curve indicate no risk of mold in the walls, while events above this curve signal a risk of mold development. Data from an experimental study obtained for rock wool walls of buildings were compared with the results provided by WUFI Pro to evaluate the risk of mold in the insulation (Apine, Birjukovs, & Jakovics, 2019). The simulation results and those obtained in situ were in agreement. Thus, the mold risk analyses presented in this section can be used realistically.

When analyzing the results of the simulated walls with various climate data, a significant impact of the finishing layers on the hygrothermal performance of the walls was observed, also reported by other authors (J Maia et al., 2021; Joana Maia, Ramos, & Veiga, 2018). When the layer of clay plaster is applied to both sides of the walls, the greater the wall's moisture absorption. Given the severity of the climate, using materials such as clay or cob for construction especially in cold climate zones might not be suitable if the walls do not have adequate protection against driving rain, rainwater runoff, and capillary rise. The evolution of average humidity over two months through the walls, illustrated by Figure 6.6, shows that the wood/cob/wood wall systems (Type VI and VII walls) are adapted to the climates of Montreal,

Paris, Rennes, and Reno. However, applying clay plaster to the exterior and interior sides of these walls (Type VIII and IX walls) presented a risk of water vapour condensation within the cob material, potentially leading to the rotting of fibres due to a humidity level exceeding 80% throughout the material's thickness for the city of Montreal. Therefore, wall systems configured with cob material with 6% fibres and 3M™ 3015 air/vapor barrier membrane for northern regions (Type X to Type XII walls), have been evaluated for high-risk cities observed in this study, Montreal and Abidjan cities. The 3M™ 3015 air and vapor barrier membrane is an air, moisture, and waterproof, weatherproof membrane with an aggressive, high-adhesion acrylic adhesive. It has been used in these wall systems because it adheres to damp surfaces.

All wall systems were suited to the climates of Djibouti, Johannesburg, and Cairo, with humidity levels below 80% throughout the thickness of the cob throughout the year, except for the results obtained with the climate data of Abidjan (Figures 6.4d and 6.6d). The humid tropical climate of Abidjan, characterized by a high cloudiness rate and a maximum driving rain of 25 l/(m².h), increases the moisture absorption in the walls. For the walls to be adapted to such a climate, the foundations must be designed with a low water absorption coefficient to limit the capillary rise and be covered by a steeply pitched roof to reduce rainwater runoff on the wall surfaces. To thoroughly evaluate the risk of mold growth in cob walls, key parameters (isopleths) considering relative humidity and temperature, generated by WUFI Pro, as well as climates presenting a high risk to cob walls, such as those of Abidjan and Montreal (evolution of humidity in the walls presented by Figure 6.6d and 6.6e), were used.

The isopleths for walls of type IV, V, VIII, and IX showed that the hygrothermal conditions in the city of Montreal were conducive to mold growth, with numerous events located above the LIM II curve (Figure 6.13a, 6.13b, 6.13e, and 6.13f). A low concentration of temperature/relative humidity events above the LIM II curve is observed for the exterior surface of the cob in contact with wood for walls of types VI and VII (Figure 13c and 13d), indicating a low risk of mold development for these two types of walls. For wood and cob walls, when a clay plaster is applied to both exterior and interior sides, a high risk of mold is observed on the exterior surface and in the middle of the two walls, while the risk is low for the interior surface of the wall of type IX. A high concentration of temperature/relative

humidity events above the LIM II curve was noted for all walls simulated with the climate data of Abidjan (Figure 6.14).

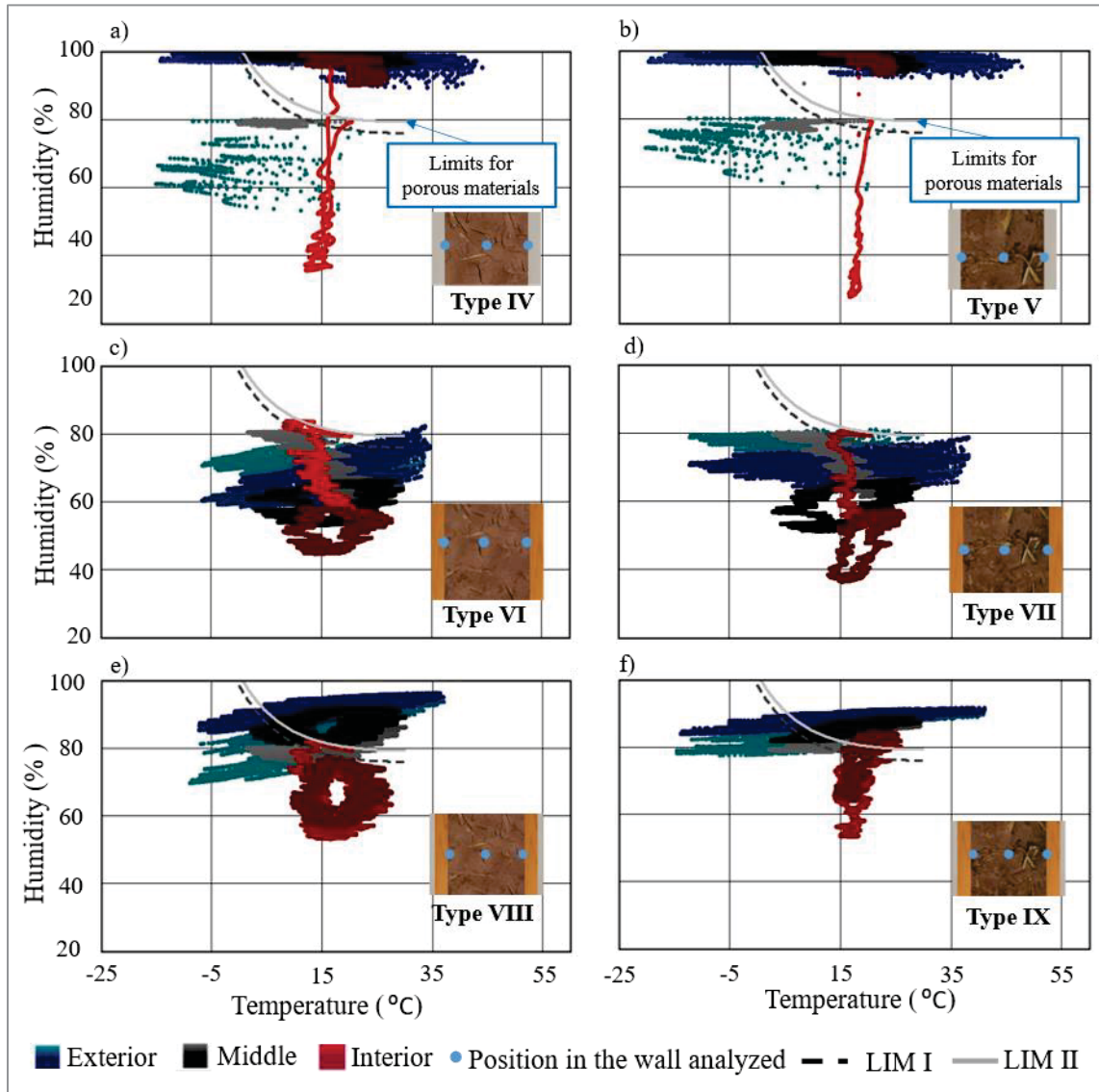


Figure 6.13 Walls isopleth, exterior, middle and interior sides of cob simulated with Montreal climate data

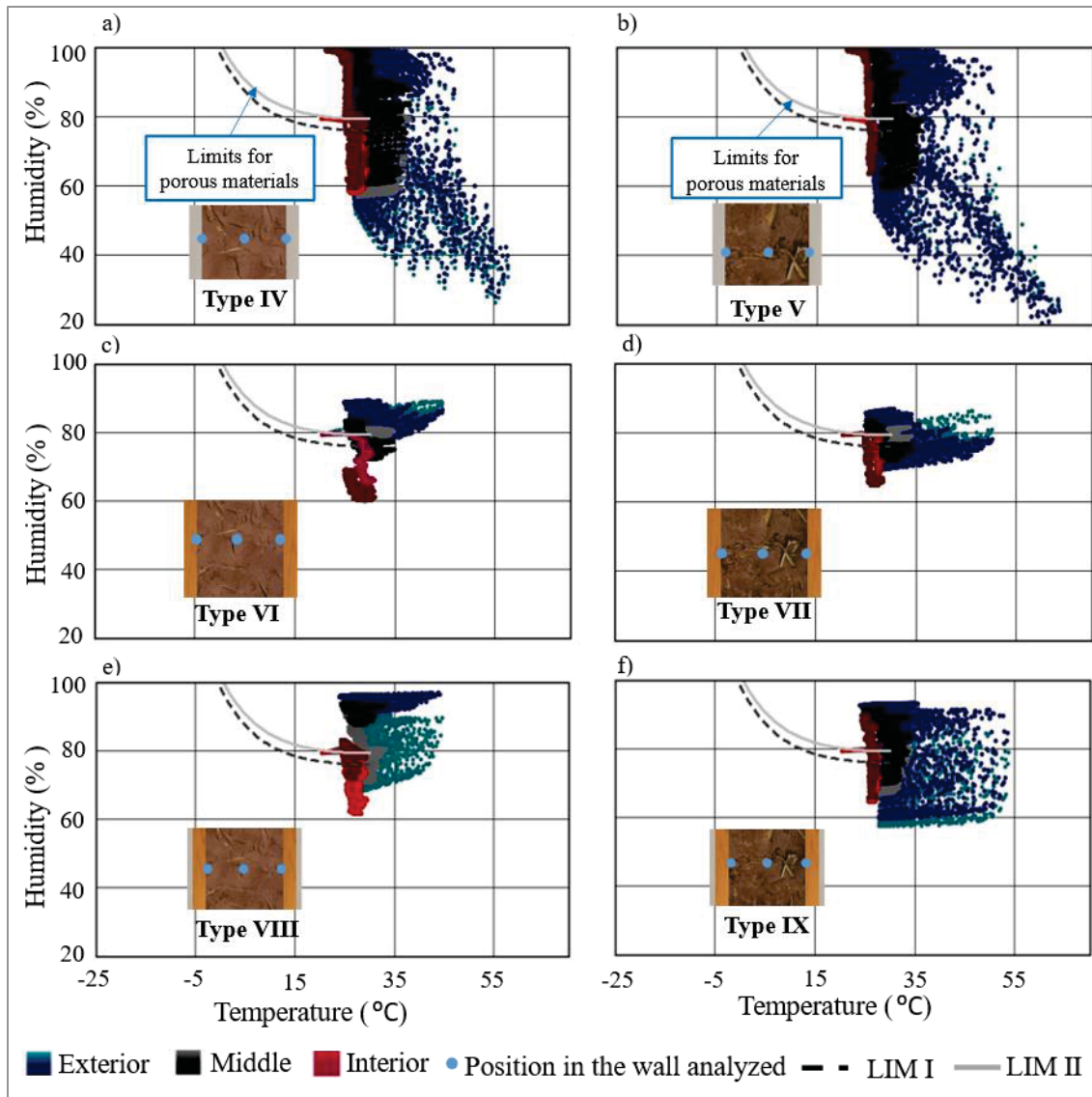


Figure 6.14 Walls isopleth, exterior, middle, and interior sides of cob simulated with Abidjan climate data

According to Ghadie et al. (Tlajji et al., 2022), the use of a material that delays the transmission of water vapour placed just on the exterior side of the cob material could be an effective strategy to avoid the risk of mold development. They also observed that adding a rain screen on the exterior of the wall could reduce the infiltration of rainwater and humidity, thereby protecting the wall materials against the accumulation of water vapour (Tlajji et al., 2022). Consequently, wall systems with air/vapour barrier were modeled using the climate data of Abidjan and Montreal, two cities with high cloudiness rates. The air/vapour barrier was placed on the exterior side of the cob material. The isopleths generated for the exterior surface, the

middle, and the interior surface of the cob indicate a significant reduction in the risk of mold development, even in the worst-case scenario of wall orientation (Figure 6.15). There is almost no concentration of temperature/relative humidity events above the LIM II curve for these walls simulated with the climate data of Abidjan and Montreal. This is visible when comparing Figure 6.13a and Figure 6.14a versus Figures 6.15a to 6.15f. This means that there is no risk of mold development in the cob material, indicating that this type of design is suitable for cold climates and heavy rainfall.

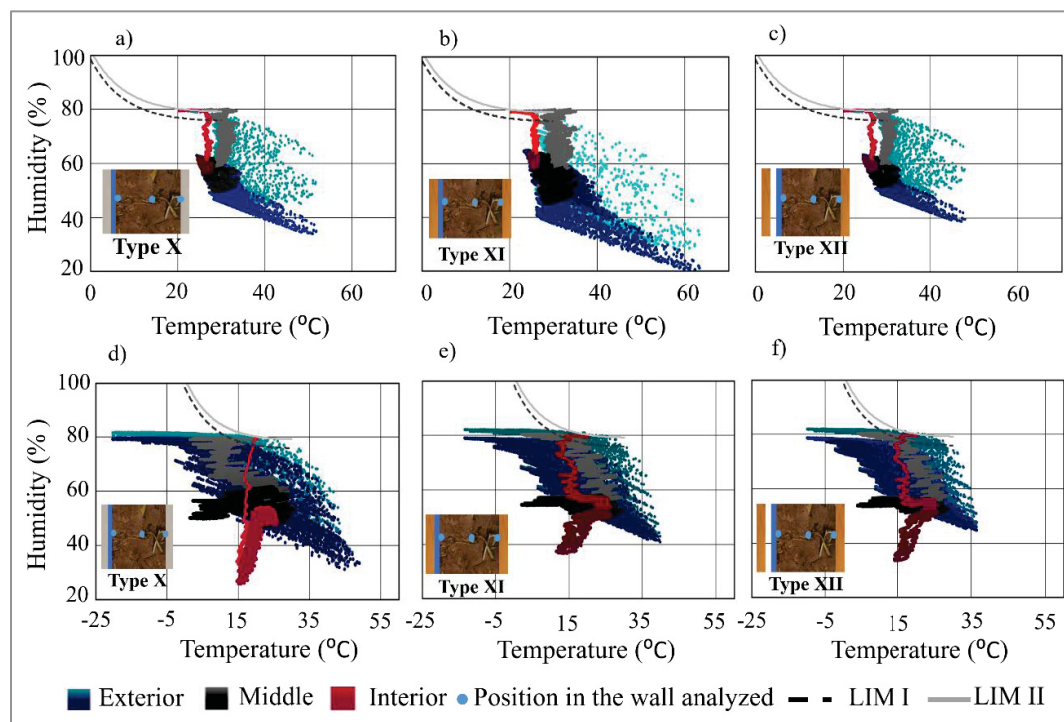


Figure 6.15 Isoleth for the Type X to XII walls with air/vapour barrier on the cob: a, b, c) Abidjan and d, e, f) Montreal

Tables 6.8 and 6.9 presented summarize the hygrothermal conditions for three years of all walls simulated with different climate data (See APPENDIX D for humidity variation in walls X to XII, table 6.9). It is important to note that the results used for the mold growth risk analysis considering scenarios of heavy driving rain, representing the worst case of wall orientation. The results indicate that wall types IV to XII present no risk of mold development in the cities of Djibouti, Johannesburg, and Cairo. However, for Djibouti, wall types I and II show a low risk of mold, both on the exterior surface and within the wall, while for Johannesburg and Cairo, the risk is limited to the exterior surface. Regarding Abidjan, only walls equipped with

3M™ 3015 vapor/air barrier membranes are free from mold risks. For the cities of Montreal, Paris, Rennes, and Reno, in addition to walls with 3M™ 3015 vapor/air barrier membranes, wall types VI and VII do not present any mold risk. These findings highlight the importance of selecting construction materials and techniques that are suited to the specific climatic conditions of each region to prevent mold growth and ensure the durability of structures.

Tableau 6.8 Summarizes the hygrothermal conditions for 3 years of all simulated walls with various climate data (++++Very high risk, +++ high risk, ++ low risk, + very low risk, ✓ no risk)

Cities/Walls	side	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI	Type VII	Type VIII	Type IX
Montreal	Exterior	++++	++++	++++	++++	++++	+	+	+++	+++
	Middle	++++	++++	++++	+++++	++++	✓	✓	+++	+++
	Interior	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	✓	++
Paris	Exterior	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	++	++
	Middle	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	++	++
	Interior	++	++++	++++	+++	++++	✓	✓	✓	+
Rennes	Exterior	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	+++	+++
	Middle	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	++	++
	Interior	+++	+++	+++	+++	++++	✓	✓	✓	✓
Reno	Exterior	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	+	+
	Middle	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	✓	✓
	Interior	+++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	✓	✓
Djibouti	Exterior	+	+	++	+	✓	✓	✓	✓	✓
	Middle	+	+	+	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Interior	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Johannesburg	Exterior	+	+	+	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Middle	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Interior	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cairo	Exterior	+	+	++	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Middle	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Interior	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Abidjan	Exterior	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
	Middle	++++	++++	++++	++++	++++	+++	++++	++++	++++
	Interior	++++	++++	++++	++++	++++	✓	✓	+++	++++

Tableau 6.9 Summarizes the hygrothermal conditions for 3 years for walls with air/vapour barriers simulated with severe climate data

Cities/Walls	side	Type X	Type XI	Type XII
Montreal	Exterior	✓	✓	✓
	Middle	✓	✓	✓
	Interior	✓	✓	✓
Abidjan	Exterior	✓	✓	✓
	Middle	✓	✓	✓
	Interior	✓	✓	✓

6.9 Conclusion

Eco-friendly building design strategies, including traditional approaches, can significantly reduce the environmental impact of buildings while maintaining thermal comfort. This study explored the use of materials such as clay and cob for constructing single and multilayer walls to analyze their hygrothermal performance, heat and moisture losses or gains, and the risk of mold development. The conclusions drawn from the simulation results are as follows:

- By analyzing the evaluation of humidity variation across the walls, based on simulation data covering the period from February 1 to March 31, and the assessments of the risk of mold appearance for wall configurations IV to XII over three years of simulation, we find that the higher the cloudiness index, the more the walls tend to accumulate moisture, which increases the risk of mold development.
- All wall configurations demonstrated good hydric performance in the cities of Djibouti, Johannesburg, and Cairo. For the cities of Montreal, Paris, Rennes, and Reno, the configurations using exclusively wood as a structure shows superior hydric performance compared to other configurations. In contrast, for the city of Abidjan, the configurations that meet the humidity performance standards correspond to wall types X to XII.
- Single-layer cob walls, especially those containing 6% fibres, provide more favourable interior temperatures for both cold and hot climate zones. For exterior temperatures ranging from $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $43\text{ }^{\circ}\text{C}$, the variation in interior surface temperatures was $12\text{ }^{\circ}\text{C}$

to 29.6 °C for clay walls, 15 °C to 27 °C for cob walls with 3% fibres, and 19 °C to 25.5 °C for cob walls with 6% fibres. Considering cloud cover and driving rain results in a significant reduction in the maximum interior temperature of the simulated walls. Moreover, applying a clay finish and using a wooden structure for cob walls enhance interior thermal comfort, thus reducing the heating demand to maintain interior temperatures above 21.9 °C in winter, and the cooling demand for interior temperatures below 26 °C in summer. The temperatures of cob walls with 6% fibres are more stable, regardless of the boundary conditions used for the simulation.

- Regarding moisture management in walls, clay plaster significantly impacts the hygrothermal behaviour of simulated cob walls. Applying finishes, whether on a cob or wooden structure, causes a significant increase in wall moisture. This increase can lead to a heightened risk of mold formation, especially in walls exposed to cold climate conditions or heavy rainfall. Walls simulated with the climatic data of cities in the cold and damp zones were particularly vulnerable, except for types VI, VII, and Types X to XII, which did not present a risk of mold.
- The use of an air/vapour barrier or rain screen on the exterior side of the cob material eliminates the risk of mold development.
- For hot and low precipitation climatic zones, the use of clay finishes proves to be beneficial for good temperature and humidity regulation.

In conclusion, cob materials are a viable alternative for current construction and can be used as an infill material for wood-frame structures, provided that the wall design is adapted to specific climatic zones. Cob walls not only reduce interior thermal discomfort but also heat and moisture losses through the walls. The results presented in this article are the results of the evaluation of the hygrothermal performance of standard walls, which are promising.

Based on the results presented in this article, further studies are necessary to complete this research:

- Conduct numerical modeling at the building scale: Perform numerical modeling of entire cob buildings to evaluate their hygrothermal performance; Carry out experimental measurements at the building scale: Implement experimental

measurements over a period of one year or more to confirm the hygrothermal benefits of wood/cob structures;

- Evaluate the impact of roofs: Analyze the hygrothermal behavior of cob buildings with roofs of different slopes by conducting in situ measurements to observe the influence of heavy rain on cob walls associated with a wooden structure.

6.10 Acknowledgments

The author wants to thank the Pole de Recherche et d'Innovation en Materiaux avancés du Quebec (PRIMA Quebec (PRIMAR20-13-008)), the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Alliance program (CRSNG ALLRP 560404-2020), Mitacs (IT35572), Quebec Wood Export Bureau (QWEB), AmeriCan Structures, Technologies Boralife inc., and ENERGIES 2050 to support this study.

CHAPITRE 7

AUTRES RÉSULTATS SUR LA CARACTÉRISATION

Ce chapitre présente les résultats sur la composition minéralogique et chimique, la microstructure et l'analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) des matériaux en torchis, dans le but d'observer l'influence des fibres sur les matériaux en argile. Les résultats des tests de risque de moisissure sont également présentés dans ce chapitre. Quelques résultats préliminaires de la résistance au feu des échantillons ont été brièvement présentés. Pour les torchis stabilisés, seules les propriétés thermiques, mécaniques et la porosité ont été étudiées et le torchis a été formulé avec 2 %, 4 % et 6 % de ciment.

7.1 Autres résultats sur la caractérisation des torchis non stabilisés

7.1.1 Composition minéralogique et chimique

Les résultats de la caractérisation minéralogique et chimique des torchis avec 3 % et 6 % de fibres sont présentés dans les tableaux 7.1 et 7.2. Les tests ont été réalisés dans les laboratoires de l'Université McGill, en utilisant la méthode de diffraction des rayons X (DRX) et le spectromètre de fluorescence à rayons X (XRF), ainsi qu'à l'ÉTS avec le microscope électronique à balayage (MEB), respectivement. Les compositions chimiques des argiles sans fibres et avec 3 % et 6 % de fibres sont presque identiques. L'ajout de fibres aux échantillons d'argile n'a pas d'influence significative sur leur composition minéralogique et chimique. Tous les échantillons testés contiennent principalement du dioxyde de silicium (SiO_2) et de l'alumine (Al_2O_3) avec des impuretés mineures de Fe_2O_3 , K_2O et MgO . La teneur élevée en SiO_2 dans la composition chimique des argiles confirme le pourcentage élevé de quartz (Fabbri et al., 2021; Tsozué et al., 2022). Les résultats obtenus par le MEB ont confirmé que le quartz est le composant principal des deux argiles, comme l'illustre le pic élevé de Si présenté dans la Figure-A I-1 de l'ANNEXE I. La présence d'alumine (Al_2O_3) est liée à la présence d'aluminosilicates et de kaolinite, tandis que l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et le potassium (K_2O) sont liés à la présence d'hématite et d'illite (Arianpour & Arianpour, 2022; Fabbri et al., 2021;

Farouk et al., 2020). L'élément principal de la composition chimique des fibres est le dioxyde de silicium (SiO_2), qui représente 73,50 % de la masse. On trouve également 14,26 % de feldspath (KAlSi_3O_8), une faible proportion d'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) représentant 8,74 %, et seulement 3,50 % de chlorure de potassium (KCl).

Tableau 7.1 Compositions minéralogiques échantillons (% en poids)

Type de matériau	Type d'argile	Kaolinite	Quartz (Silicates)	Illite	Muscovite (Mica)	Hematite
Matériau en argile	Rouge	8,9	42,6	21,8	24,5	2,2
	Beige	25,8	42,5	14,6	16,9	0,1
Matériau en torchis	Argile rouge avec 3 % de fibre	9,7	42,8	23,6	22,1	1,8
	Argile rouge avec 6 % de fibre	9,4	41,8	21,7	25,0	2,1
	Argile beige avec 3 % de fibre	26,3	42,0	13,3	18,2	0,2
	Argile beige avec 6 % de fibre	24,9	42,9	14,6	17,4	0,2

Tableau 7.2 Compositions chimiques des échantillons (% en poids)

Type de matériau	Type d'argile	H_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	KAlSi_3O_8	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	KCl
Fibre	-	-	-	-	73,50	-	-	14,26	8,74	3,5
Matériau en argile	Red	2,4	0,8	19,9	70,1	4,7	2,2	-	-	-
	Beige	4,4	0,5	21,3	70,4	3,2	0,1	-	-	-
Matériau en torchis	Argile rouge avec 3 % de fibre	2,4	0,9	19,8	70,5	4,6	1,8	-	-	-
	Argile rouge avec 6 % de fibre	2,5	0,8	20,1	69,7	4,8	2,1	-	-	-
	Argile beige avec 3 % de fibre	4,5	0,5	20,6	69,9	3,2	0,3	-	-	-
	Argile beige avec 6 % de fibre	4,3	0,5	21,2	70,6	3,3	0,2	-	-	-

7.1.2 Microstructure des échantillons

Les résultats concernant l'augmentation des pores dans les différents échantillons renforcés de fibres sont cohérents avec les images obtenues par le microscope à balayage laser Olympus LEXT OLS4100-3D présentées dans les Figures 7.1 b), 7.1 c), 7.1 e), 7.2 d), 7.3 a) et 7.3 b). Les échantillons d'argile renforcés avec les fibres ont montré une augmentation de la porosité ouverte pour les deux types d'argile par rapport aux échantillons sans fibre. L'augmentation de la porosité évolue avec la diminution de la densité et s'explique par l'augmentation de la quantité de grands vides créés par la présence des fibres. Les Figures 7.1a) et 7.2a) montrent que les échantillons sans fibre sont denses et presque homogènes, avec quelques vides visibles à la surface par rapport aux échantillons renforcés de fibres. Comme on peut le voir dans les Figures 7.1 à 7.3, les fibres de blé créent plus de vides dans les mélanges, en plus du canal central (vide au centre de chaque fibre).

La Figure 7.3 montre les images de la section transversale des échantillons d'argile avec les fibres. Ces images montrent l'interface fibre-matrice des échantillons avec un canal central de fibres et de nombreux petits vides, ce qui augmente la valeur de la porosité ouverte présentée dans la Figure 4.5 au chapitre 4. L'examen de la surface des échantillons renforcés avec 3 % et 6 % de fibres montre la présence de plus de vides remplis d'air et de vides créés par l'interface fibre/argile (Figures 7.1 b), 7.1c et 7.1e, Figures 7.2b et 7.2d, et Figures 7.3b et 7.3d) par rapport aux échantillons sans fibre (Figures 7.1a et 7.2a). Les Figures 7.1 d), 7.2 b) et 7.2c) montrent des surfaces adhérentes entre les fibres et la matrice d'argile ainsi que des fragments de fibres adhérant à la matrice d'argile. Les mêmes remarques ont été observées dans les travaux de Libo et al., Kriker et al., et Idder et al. (Fabbri et al., 2021; Tsozué et al., 2022).

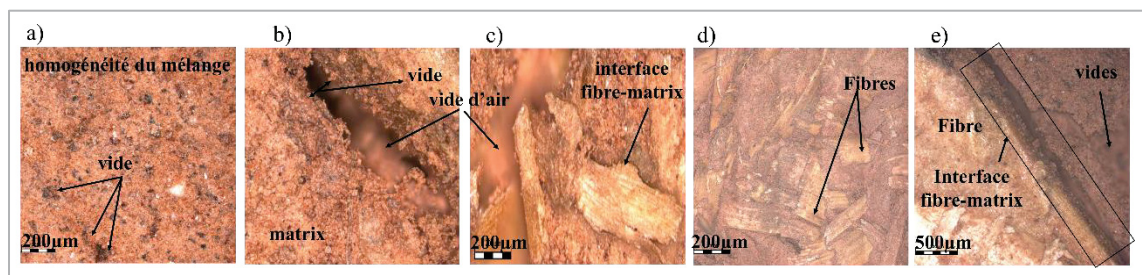


Figure 7.1 Microstructure de surfaces des échantillons d'argile rouge : (a) échantillon sans fibre, (b) échantillon avec 3 % de fibres, (c) et (d) échantillon avec 6 % de fibres

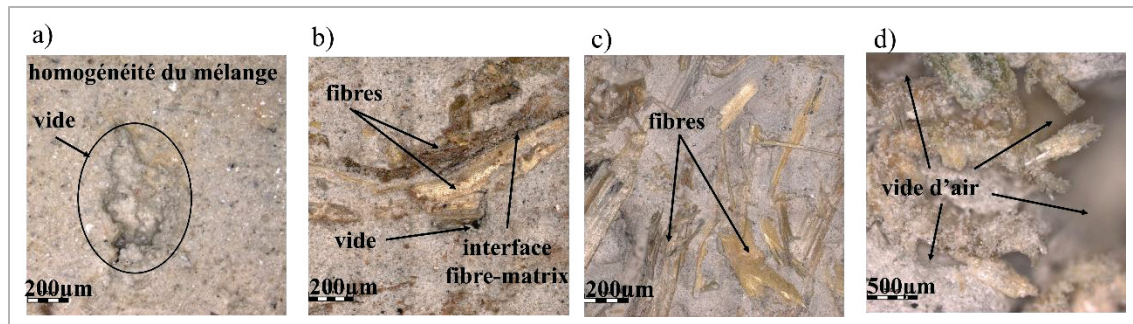


Figure 7.2 Microstructure de surfaces des échantillons d'argile beige : (a) échantillon sans fibre, (b) échantillon avec 3 % de fibres, (c) et (d) échantillon avec 6 % de fibres

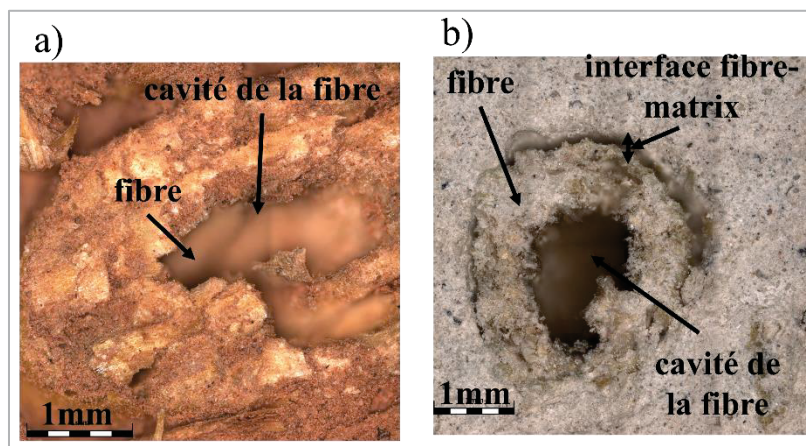


Figure 7.3 Microstructure des sections transversales d'échantillons renforcés de fibres : a) échantillon d'argile rouge et b) échantillon d'argile beige

7.1.3 Analyses thermiques

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique (ATG) et de l'analyse thermogravimétrique différentielle (ATGD) pour les échantillons renforcés avec 3 % et 6 % de fibres sont présentés dans la Figure 7.4. L'ajout des fibres aux matériaux d'argile entraîne une perte de masse significative. Cette perte de masse augmente avec la teneur en fibres, plus il y a de fibres dans le mélange d'argile, plus la perte de masse de l'échantillon est importante. Les échantillons renforcés avec 3 % et 6 % de fibres ont présenté une perte de masse totale de 7,50 % et 9,65 % pour l'argile beige, et de 8,37 % et 9,89 % pour l'argile rouge, observée entre 30 °C et 1000 °C respectivement.

Les courbes ATG/ATGD de la Figure 7.4 témoignent de la présence de réactions endothermiques, avec une première réaction se produisant entre 30 °C et 138 °C pour les échantillons renforcés avec 3 % et 6 % de fibres. Cette première réaction correspond à l'évaporation de l'eau et à la désintégration des volatiles non brûlés présents dans les échantillons (Alwani et al., 2013; Mohana Krishnudu et al., 2020; Sarikanat et al., 2014; Vivek & Kanthavel, 2019). Durant cette réaction, une perte de masse de 0,87 % et 0,81 % en poids est observée pour les échantillons d'argile rouge et beige avec 3 % de fibres respectivement, et de 1,06 % et 0,91 % en poids pour les échantillons d'argile rouge et beige avec 6 % de fibres. La deuxième réaction endothermique représente la déshydroxylation de la goethite de l'argile qui se produit entre 138 °C et 402 °C pour les échantillons d'argile avec 3 % et 6 % de fibres respectivement. Cette deuxième réaction montre une perte de masse de 2,10 % et 2,20 % en poids pour les échantillons d'argile rouge et beige avec 3 % de fibres respectivement, de 3,43 % et 3,52 % en poids pour les échantillons d'argile rouge et beige avec 6 % de fibres respectivement. En plus de la déshydroxylation de la goethite présente dans l'argile (Ige & Danso, 2021), il y a eu la dégradation des fibres présentes dans le mélange. Cela a entraîné une augmentation de la perte de masse, marquée par un pic significatif dans cette plage de température, en raison de la décomposition de l'hémicellulose et de la cellulose des fibres, qui se produit à 320 °C (Alwani et al., 2013; Mayandi et al., 2015). La troisième réaction endothermique caractérise la dégradation de la lignine contenue dans les fibres et se produit entre 402 °C et 768 °C pour les échantillons avec 3 % et 6 % de fibres respectivement. Enfin, la quatrième réaction endothermique se produisant au-dessus de 768 °C caractérise la déshydroxylation de l'illite et du quartz, suivie d'une réaction de décarbonatation due à la décomposition de la calcite, entraînant une perte de dioxyde de carbone (Charai, Mezrhab, et al., 2022; Gandia et al., 2019; Ige & Danso, 2021; Millogo et al., 2014).

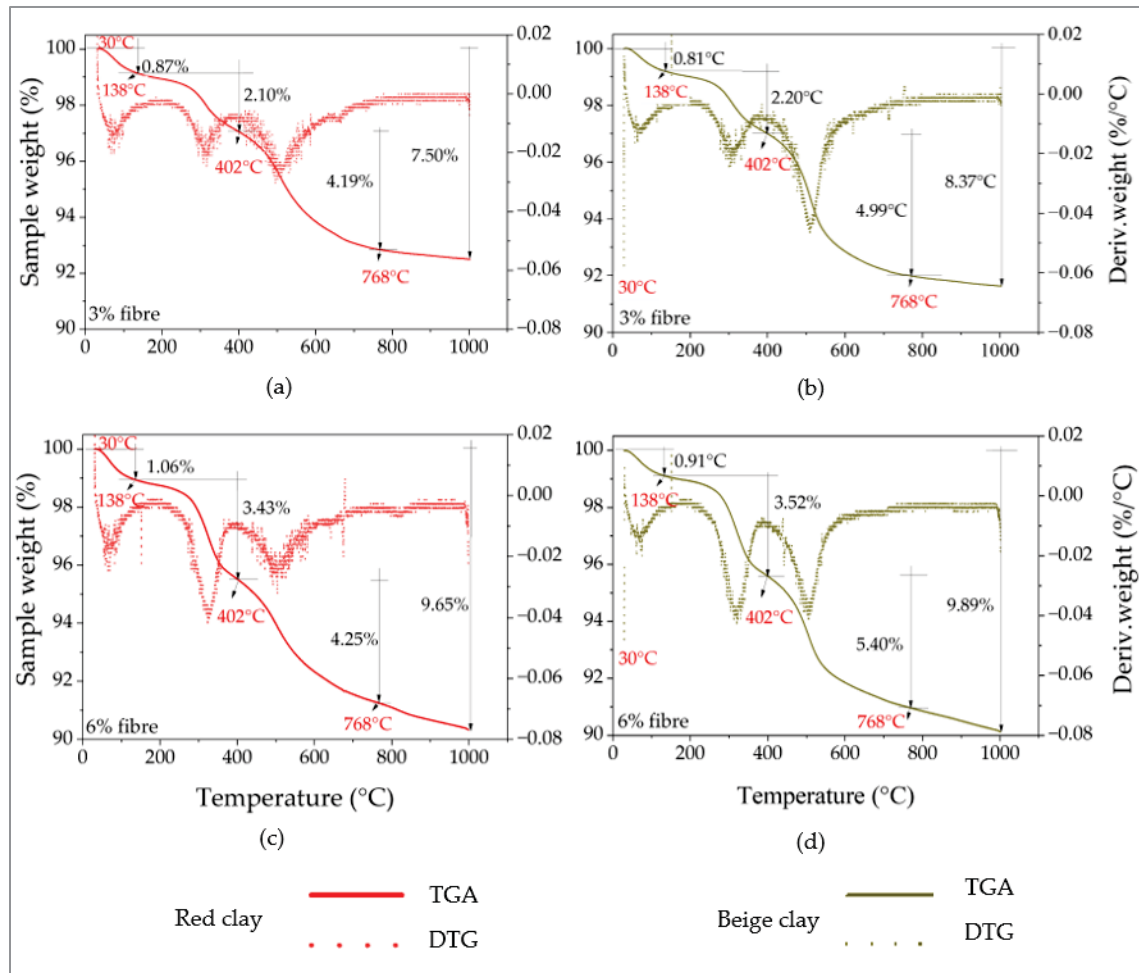


Figure 7.4 Courbes ATGD de l'échantillon d'argile (a) et (b) avec 3 % de fibres, (c) et (d) avec 6 % de fibres

7.1.4 Résistance mécanique : contraintes/deformations

7.1.4.1 Résistance en compression

Les Figures 7.5 et 7.6 montrent des images des échantillons d'argile rouge et beige avec 0 %, 3 % et 6 % de fibres après les tests de compression et l'évolution de la force de charge en fonction du temps. Plus la teneur en fibres dans le mélange est élevée, plus le taux de charge maximale à atteindre avant la rupture est important. Ces résultats montrent que l'incorporation de fibres dans le matériau argileux empêche la propagation des fissures et qu'à l'application de la force, le matériau en torchis se comprime avant de s'affaiblir sans se briser complètement (Figures 7.5 b, c, e et f), contrairement aux échantillons d'argile sans fibres (figures 7.5a et d).

L'augmentation de la capacité de charge est due à l'adhérence entre les fibres de blé et la matrice d'argile, qui résiste à une défaillance précoce (Raavi & Tripura, 2023).

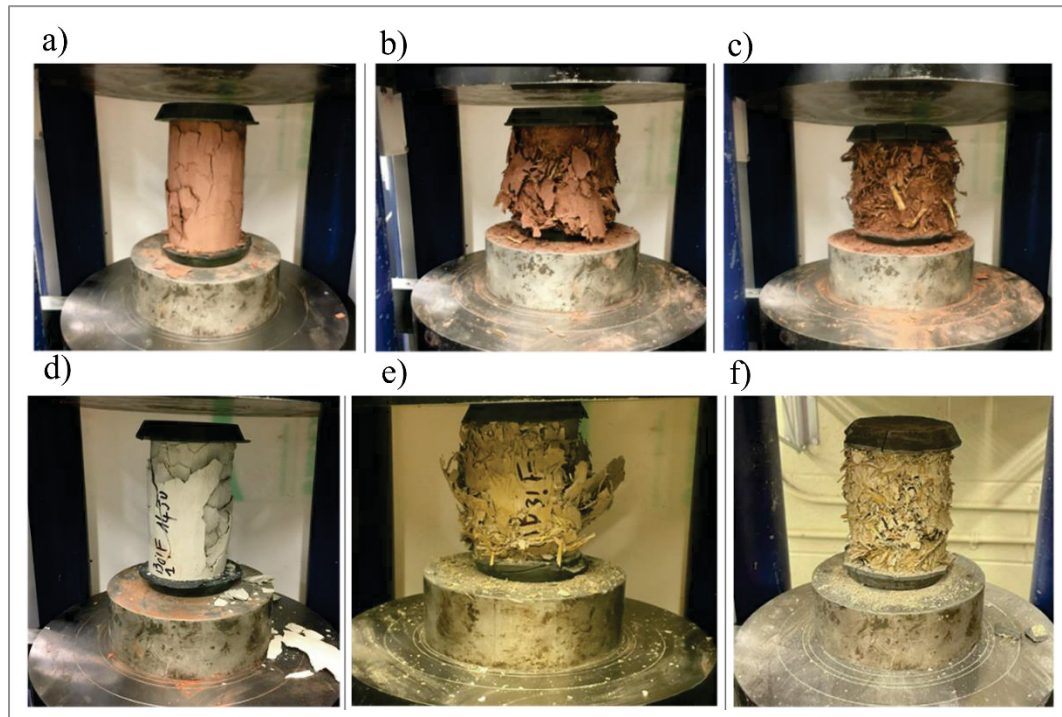


Figure 7.5 Échantillons d'argile rouge et beige sans fibres (a et d), avec 3 % (b et e) et 6 % (c et f) de fibres après les essais en compression

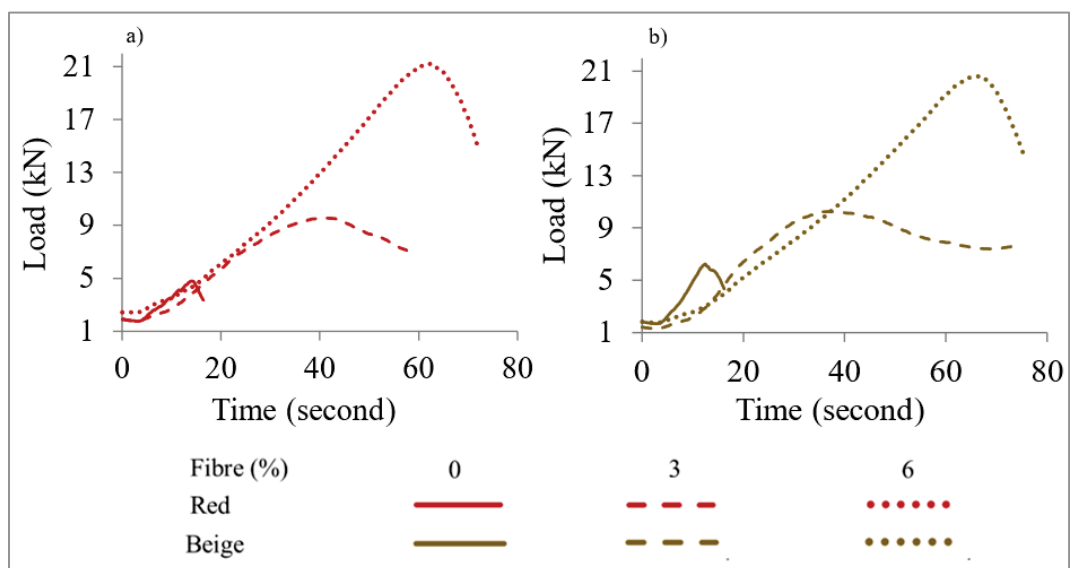


Figure 7.6 Évolution de la force de charge en fonction du temps des échantillons d'argile rouge (a) et beige (b)

7.1.4.2 Résistance en flexion

Les matériaux en terre renforcés par des fibres végétales présentent un comportement de rupture en flexion très particulier. Les Figures 7.7 et 7.8 montrent les photographies des échantillons après les tests de flexion et les résultats contrainte/déformation. Ces figures montrent que l'ajout de fibres de blé en vrac dans le mélange d'argile modifie le comportement des échantillons sans fibres, passant d'une déformation fragile à une déformation semi-ductile, et augmente significativement la ductilité des matériaux.

Les courbes contrainte/déformation peuvent être subdivisées en deux parties distinctes. Pour les échantillons sans fibres, le comportement se présente sous forme de ligne droite suivie de ruptures brusques, caractérisant le domaine élastique des matériaux (Figures 7.7a, d et 7.8a, b). Pour les échantillons avec une teneur en fibres de 3 % et 6 %, après la plage élastique, la plage plastique apparaît, caractérisée par un comportement plastique (partie 2, Figure 7.8) sans rupture finale. Au fur et à mesure que la teneur en fibres augmente, les matériaux en argile deviennent plus ductiles. Les résultats montrent que les forces appliquées aux échantillons en torchis pendant les tests se propagent d'abord dans la matrice d'argile sous forme de fissures avant d'être amorties par les fibres (Figure 7.7 b, c, e et f). Cette observation a également été constatée lors des tests de résistance en compression. Le chargement progressif de la force sur les échantillons entraîne des dommages à la matrice argileuse qui progressent jusqu'à une force maximale avant que celle-ci ne diminue. L'argile est donc utilisée comme liant entre les fibres, assurant la flexibilité des matériaux en torchis.

Plusieurs études ont également montré que les matériaux en terre non renforcés par des fibres présentent une rupture quasi-fragile lorsqu'ils sont soumis à une force. Ces matériaux appartiennent à la famille des matériaux à comportement élasto-plastique avec rupture fragile, tels que les blocs de terre comprimée, l'adobe, les blocs de terre stabilisée au ciment, etc. (Ouattara et al., 2016). Dans ce travail, les résultats ont montré que le renforcement du matériau argileux avec des fibres de différentes longueurs (courtes et longues) améliore à la fois la résistance mécanique et la flexibilité des échantillons.

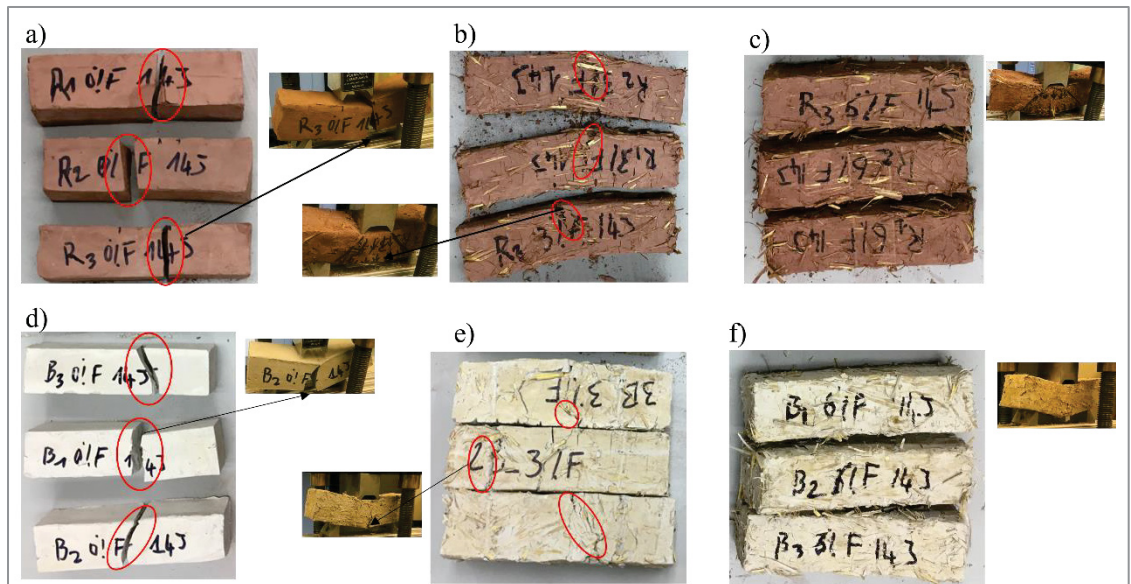


Figure 7.7 Rupture brusque des échantillons d'argile rouge et beige sans fibre (a et d), déformation plastique pour ceux avec 3 % de fibre (b et e), et 6 % de fibre (c et f)

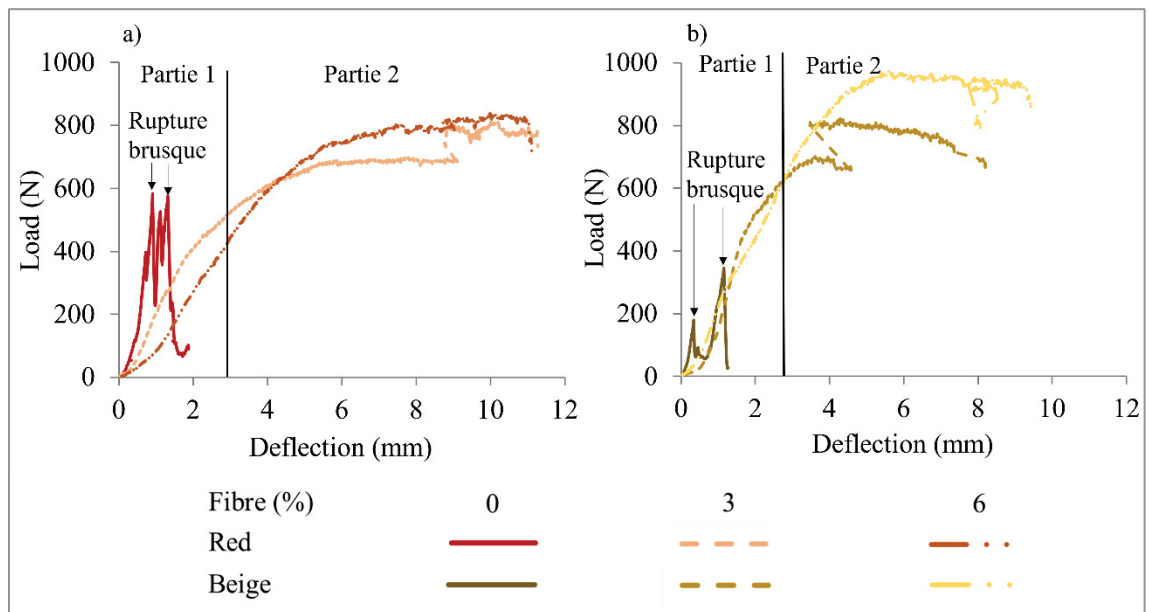


Figure 7.8 Courbes charge-déformation des échantillons d'argile rouge (a) et beige (b): sans fibre (déformation fragile), avec 3 % et 6 % de fibres : comportement élastique (déformation fragile) dans la partie 1, comportement plastique dans la partie 2 (déformation semi-ductile)

D'un point de vue mécanique, les résultats montrent que les fibres de blé exercent une grande influence sur la résistance à la flexion et à la compression. Ces résultats concordent avec

plusieurs auteurs qui ont démontré que la longueur des fibres influence la résistance mécanique des matériaux de construction et augmente avec l'augmentation des taux de fibres. On peut mentionner les travaux de Chegenizadeh et al., Kumar et al., Laibi, Poullain et al., Lertwattanakul et al., et Makomra et al. (Chegenizadeh & Nikraz, 2011; Kumar et al., 2006; Laibi et al., 2018; Lertwattanakul & Choksiriwanna, 2011; Makomra et al., 2022).

7.2 Risque de dommage à une exposition de 100 %HR

Le risque de moisissure en surface des torchis fabriqués avec 3 % et 6 % de fibres a été observé après deux mois d'exposition à une humidité relative de 100 %. Les conditions d'humidité élevée favorisent la croissance des moisissures, car elles offrent un environnement propice à leur développement. Les fibres, en particulier, peuvent retenir l'humidité et les restituer lorsque l'humidité de leur environnement baisse. Lorsque cette humidité reste élevée, cela accroît le risque de moisissure.

L'apparition des moisissures en surface des échantillons a commencé dès le premier mois d'exposition. Les premiers signes de moisissure étaient de petites taches qui sont devenues de plus en plus visibles au fil du temps. À partir d'un mois et quinze jours, la croissance des moisissures était nettement observable. Pour les échantillons sans fibres, aucune moisissure visible en surface n'était présente. Les Figures 7.9 et 7.10 illustrent quelques images des échantillons avant et après les tests de risque de moisissure.

Après les tests, tous les échantillons ont été sectionnés en deux parties pour examiner la profondeur de l'apparition de moisissure visible. Aucune moisissure visible n'a été détectée à l'intérieur des échantillons, ce qui indique que la croissance des moisissures était principalement superficielle (Figure 7.10 b et 7.10c). Cela pourrait être dû à l'exposition directe des surfaces externes à l'humidité, tandis que l'intérieur des échantillons est resté relativement sec.

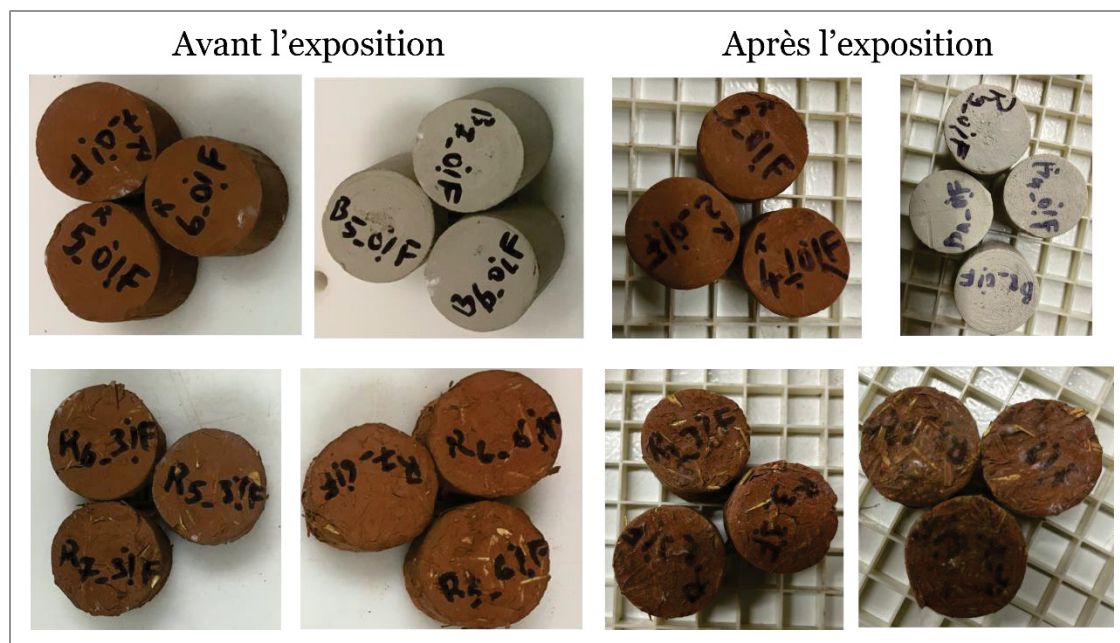


Figure 7.9 Échantillons avant et après exposition à 100 %HR

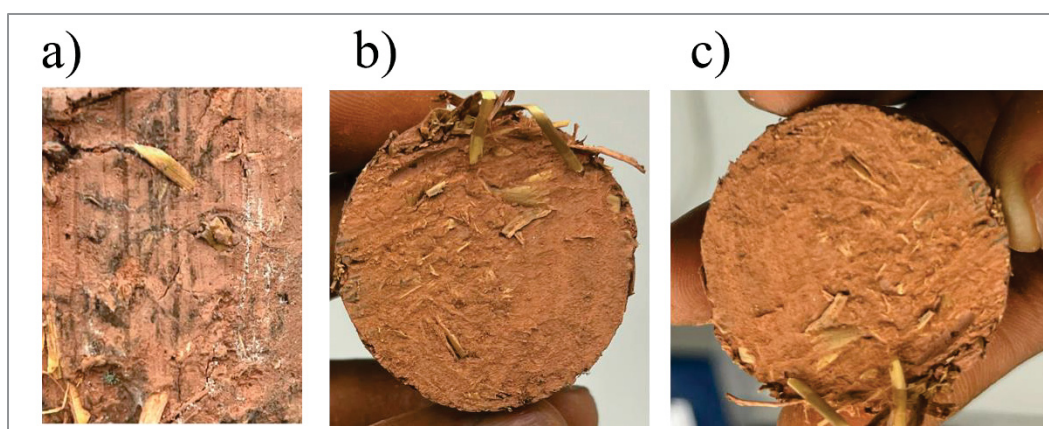


Figure 7.10 Surface extérieure et au cœur de l'échantillon après exposition de 2 mois 15 jours à 100 %HR

7.3 Résultats préliminaires sur la résistance au feu

Pour les essais préliminaires de résistance au feu, des échantillons avec 0 %, 3 % et 6 % de fibres de dimension 100 mm x 100 mm x 25,4 mm ont été exposés à une irradiance de 50 kW/m² (750 °C) et deux échantillons de 3 % de fibres de dimension 254 mm x 254 mm x 76 mm ont été exposés au feu à 1000 °C pour une durée de 15 minutes. Les tests ont été réalisés

au moyen d'un calorimètre à cône et selon les normes ISO 5660 (ISO 5660, 2015) et CAN/ULC S135 du Code National du Bâtiment du Canada (CNB) (CAN/ULC S135, 2020). Les échantillons sans fibre se brisent en plusieurs morceaux lorsqu'ils sont en contact avec le feu (Figures 7.11b et 7.11e). Pour les échantillons en torchis, la calcination des fibres en surface des échantillons a été observée sur la face exposée au feu, mais les échantillons restent toujours intacts après l'essai (Figures 7.11c et 7.11f). La température du côté non exposée au feu reste inchangée (Figure 7.11 d et 7.11 g). L'appareil utilisé pour les essais est présenté par la Figure 7.11a

En ce qui concerne le dégagement de chaleur, rien n'a été observé pour les échantillons sans fibre. Un dégagement de chaleur de $0,23 \text{ MJ/m}^2$ a été observé pour les échantillons en torchis pour le côté exposé au feu. Une production de fumée de $0,13 \text{ m}^3$ et un dégagement de CO et CO_2 par unité de masse de $0,001 \text{ g}_{\text{CO}}/\text{g}_{\text{matériau}}$ et de $0,103 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{g}_{\text{matériau}}$ en moyenne ont été enregistrés respectivement pour les échantillons en torchis. Les essais de la résistance au feu sur les panneaux en torchis de 7,6 cm d'épaisseur ont montré une calcination des fibres en surface des échantillons exposés au feu, mais aucune fumée visible n'a été observée pendant l'essai. Cependant, de petites fissures visibles sont apparues en surface de l'échantillon exposé au feu, et la température du côté non exposé au feu est restée inchangée.

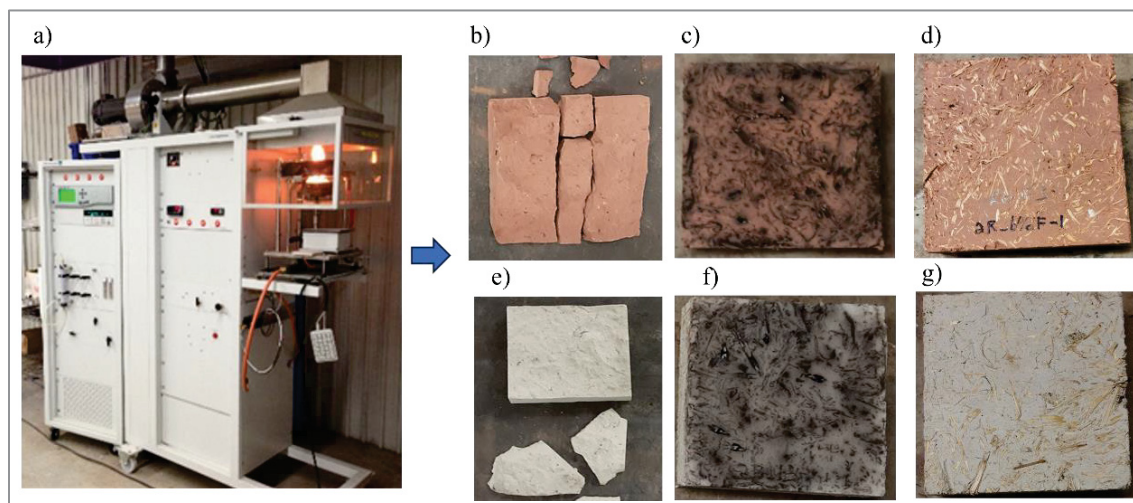


Figure 7.11 a) Appareil calorimètre à cône, images des échantillons après exposition à une température de $750 \text{ }^\circ\text{C}$: b et e) sans fibres, c et f) côté exposé au feu, échantillons avec 6 % de fibres et d et h) côté non exposé au feu

7.4 Caractérisation des échantillons en torchis stabilisés

Dans cette partie, l'objectif est de vérifier l'effet du ciment sur les propriétés thermiques et sur la porosité des échantillons en torchis. La Figure 7.12 illustre les masses volumiques des échantillons en fonction de la teneur en ciment dans le mélange et montre qu'une quantité de 2 %, 4 % et 6 % de ciment ne semble pas influencer de manière significative la masse volumique des échantillons. Avec une teneur en ciment de 4 %, la densité pour 0 % de fibres est de 1778 kg/m³, tandis que pour 3 % et 6 % de fibres, la densité est d'environ 1466 kg/m³ et 1288 kg/m³ respectivement.

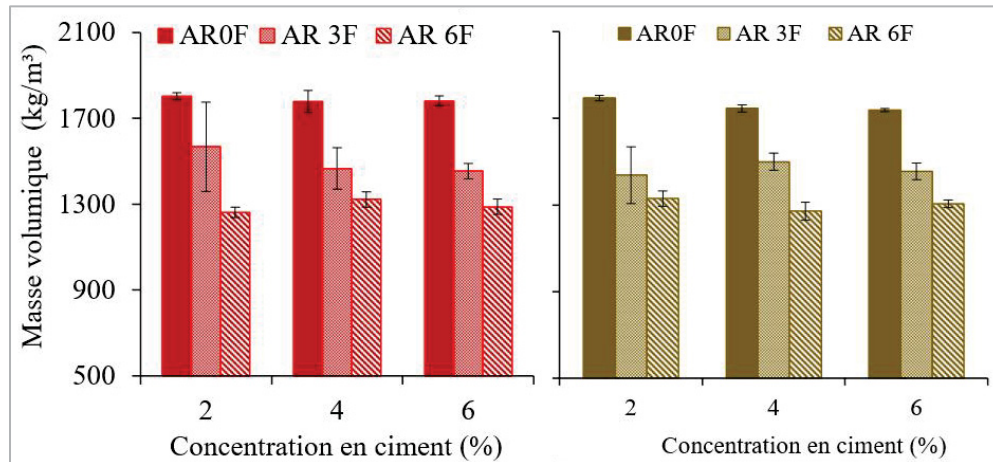


Figure 7.12 Masse volumique en fonction de la teneur en ciment

7.4.1 Conductivité thermique et capacité thermique spécifique des échantillons

La Figure 7.13 présente les résultats obtenus pour la conductivité thermique des échantillons en torchis et en argile, stabilisés avec des concentrations de ciment de 2 %, 4 % et 6 %. Une variation aléatoire de la conductivité thermique moyenne a été observée parmi les échantillons contenant la même quantité de fibres et soumis aux mêmes conditions, mais avec des concentrations en ciment différentes. Cette variation, due à l'ajout de ciment, a été confirmée par plusieurs études, notamment celles de (Ashour, Korjenic, Korjenic, & Wu, 2015; Boffoue et al., 2015; L. Zhang et al., 2017). Ces recherches ont rapporté que l'ajout d'une faible quantité de ciment n'entraîne qu'une légère modification des propriétés thermiques des blocs de terre.

Cette diminution, bien que modeste, pourrait être attribuée à l'effet isolant du ciment à faible concentration, qui perturbe légèrement la transmission de la chaleur à travers le matériau.

En effet, pour les mesures effectuées sur les échantillons à l'état sec, la conductivité thermique a augmenté avec l'ajout de ciment de 0,22 W/m.K (échantillon sans fibre et 2 % de ciment), 0,29 W/m.K (échantillon avec 3 % de fibre et 4 % de ciment), et 0,58 W/m.K (échantillon avec 6 % de fibre et 2 % de ciment) pour les échantillons d'argile rouge. En revanche, aucune augmentation de la conductivité thermique n'a été observée pour les échantillons d'argile beige. Après conditionnement à 50 %HR et à 23 °C, la conductivité thermique des échantillons sans fibre a diminué de plus de 0,1 W/m.K. Elle a également diminué de plus de 0,2 W/m.K pour les torchis en argile beige avec 3 % de fibres conditionnés à 75 %HR, et de plus de 0,06 W/m.K pour tous les torchis avec 6 % de fibres conditionnés à 75 %HR.

La Figure 7.14 montre l'influence de l'ajout du ciment sur la capacité thermique spécifique des échantillons, de manière similaire que à son effet sur leur conductivité thermique. Une légère diminution de la capacité thermique a été observée pour les échantillons sans fibre stabilisés et conditionnés à 75 %HR (diminution de 29 J/kg.K et 75 J/kg.K pour les échantillons en argile rouge avec 4 % de ciment et en argile beige avec 2 % de ciment, respectivement). Une légère diminution de la capacité thermique a également été observée pour les échantillons avec 6 % de fibres stabilisés et conditionnés à 50 %RH et à 75 %HR (diminution de 148 J/kg.K et 26 J/kg.K pour les échantillons en argile rouge avec 6 % de fibre et 6 % de ciment, et en argile beige avec 6 % de fibre et 2 % de ciment, respectivement). Le reste des valeurs de capacité thermique a légèrement augmenté. La capacité thermique spécifique moyenne est supérieure à 820 J/kg.K. Bien que l'ajout de ciment en faible quantité entraîne une modification de la conductivité thermique et de la capacité thermique spécifique du torchis, cette influence reste marginale. Par ailleurs, les variations observées sont cohérentes avec les résultats rapportés dans la littérature.

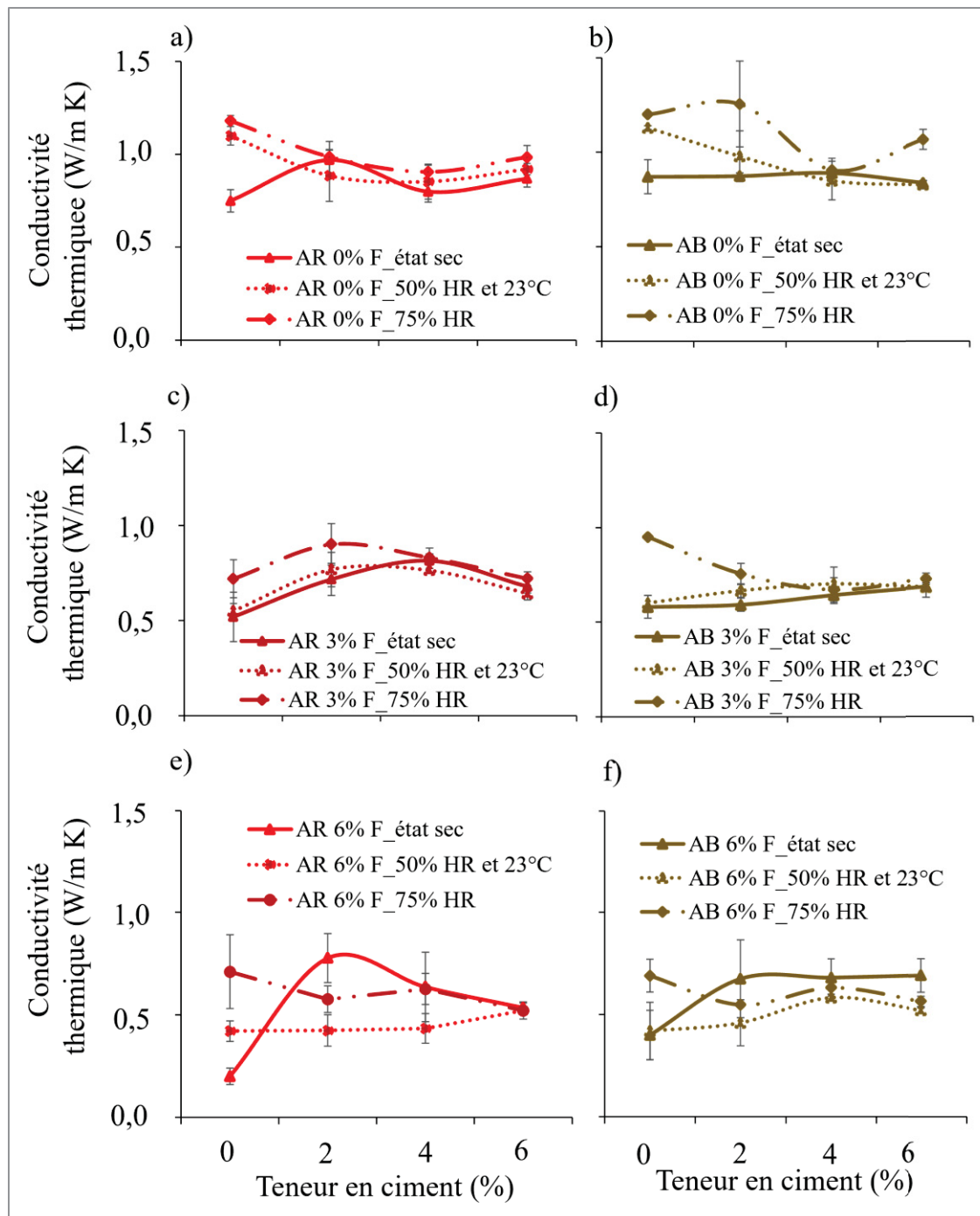


Figure 7.13 Évolutions de la conductivité thermique en fonction de la teneur en ciment : (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres

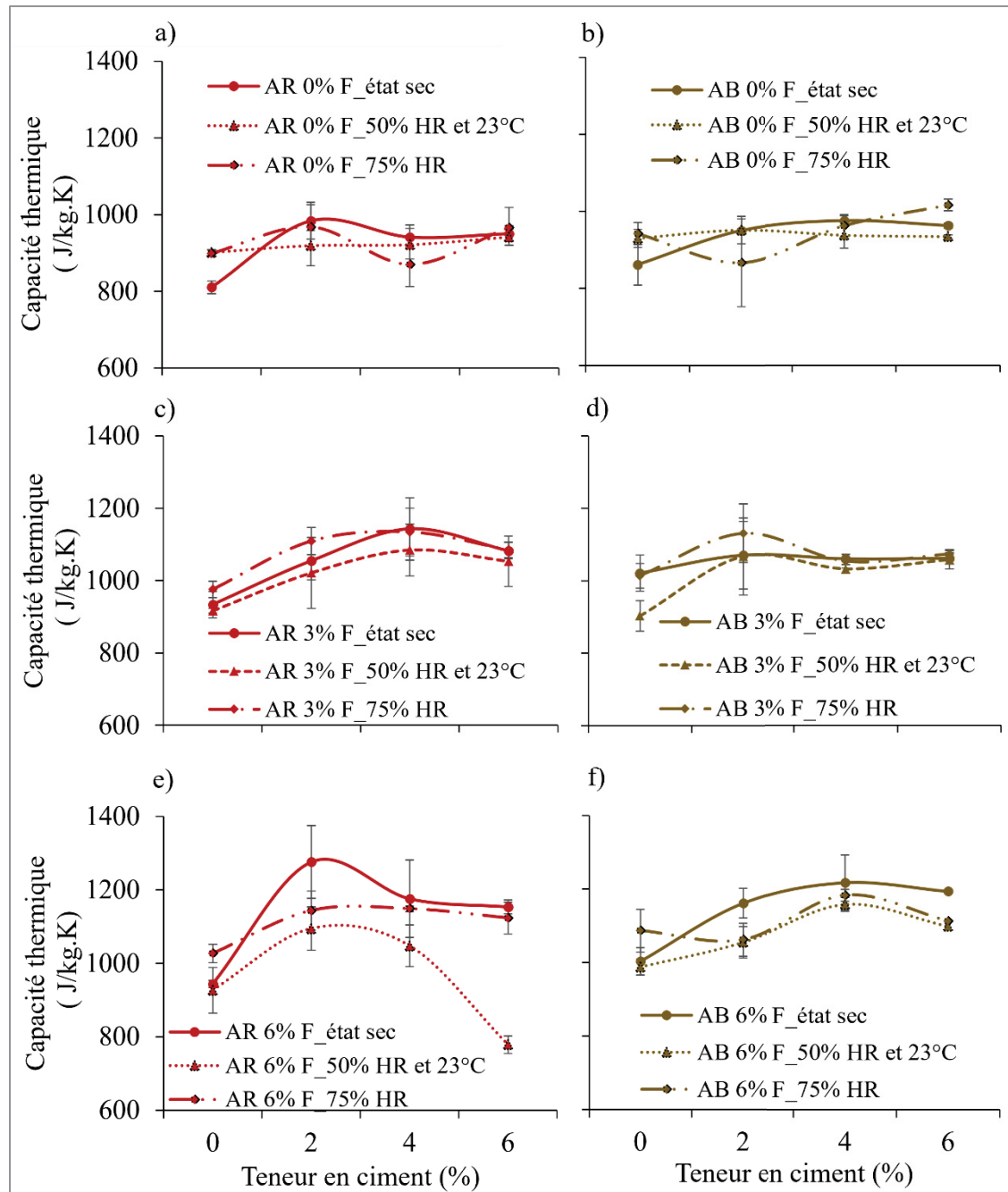


Figure 7.14 Capacité thermique spécifique en fonction de la teneur en ciment : (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres

7.4.2 Effusivité et Diffusivité thermique des échantillons stabilisés

Les Figures 7.15 et 7.16 illustrent l'influence du ciment sur l'effusivité et la diffusivité thermique des échantillons. Pour les échantillons d'argile sans fibre, une teneur de 4 % en

ciment entraîne une diminution de l'effusivité. Les échantillons de torchis composés de 6 % de ciment présentent une diffusivité thermique moins élevée. L'effusivité thermique, qui représente la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement, est significativement influencée par la présence de ciment, mais cette influence varie en fonction de la concentration de ciment et de la présence de fibres. La diffusivité thermique, qui caractérise la vitesse de propagation de la chaleur dans un matériau, montre des variations aléatoires en fonction du conditionnement des échantillons et du pourcentage de ciment ajouté.

Pour les échantillons sans fibre à l'état sec, les valeurs de l'effusivité thermique ont augmenté avec l'ajout de ciment, sauf pour les échantillons en argile beige avec 6 % de ciment. Les valeurs de l'effusivité thermique ont diminué de plus de $100 \text{ J/m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2}$ pour tous les échantillons sans fibre conditionnés. Seules les valeurs de l'effusivité des torchis en argile beige avec 3 % de fibre, conditionnés à 75 % HR, ont diminué de plus de $150 \text{ J/m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2}$ avec l'ajout de ciment. À l'état sec, elle a diminué de $44 \text{ J/m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2}$ pour un ajout de 2 % de ciment par rapport à celle sans ajout de ciment. Une diminution a également été observée pour les valeurs de l'effusivité thermique des torchis avec 6 % de fibres conditionnés à 75 % HR.

En observant les valeurs de la diffusivité thermique, toutes les valeurs ont légèrement diminué avec l'ajout de ciment pour les échantillons sans fibre. Les torchis avec 3 % de fibres ont vu leur diffusivité thermique augmenter avec l'ajout de ciment, sauf pour ceux en argile beige conditionnés à 75 % HR, dont la diffusivité thermique a subi une diminution. Pour les torchis avec 6 % de fibres, toutes les valeurs de la diffusivité thermique ont diminué de plus de $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ par rapport à celles des torchis sans ciment après conditionnement à 75 % HR. Les valeurs de la diffusivité thermique des torchis avec 6 % de fibres à l'état sec et conditionnés à 50 % HR ont augmenté avec l'ajout de ciment.

Ces observations montrent que l'ajout de ciment peut modifier légèrement les propriétés thermiques des matériaux en terre et en torchis, bien que les mécanismes de ces modifications demeurent complexes et dépendent de plusieurs facteurs, notamment la teneur en fibres et les conditions environnementales.

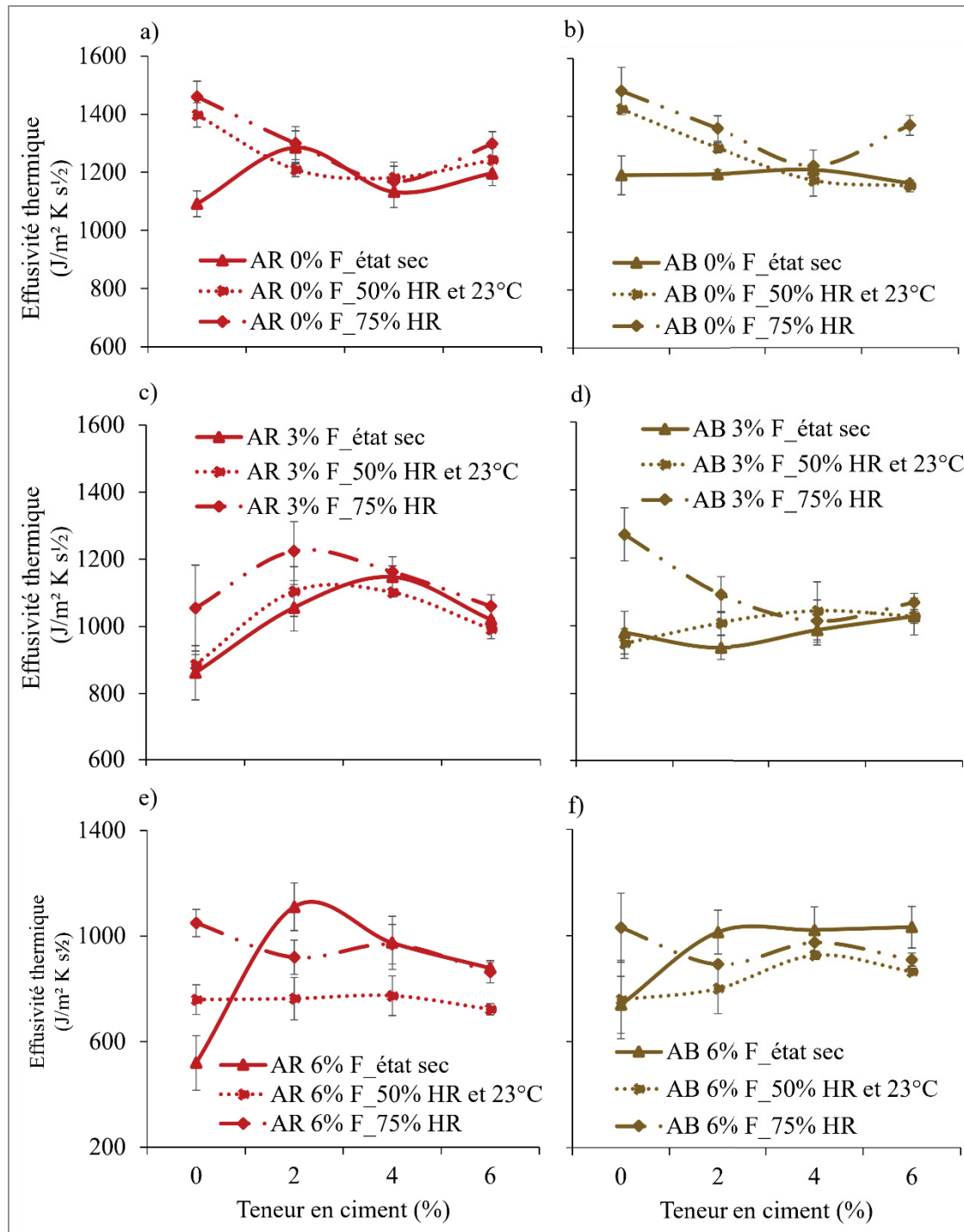


Figure 7.15 Effusivité thermique en fonction de la teneur en ciment : (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres

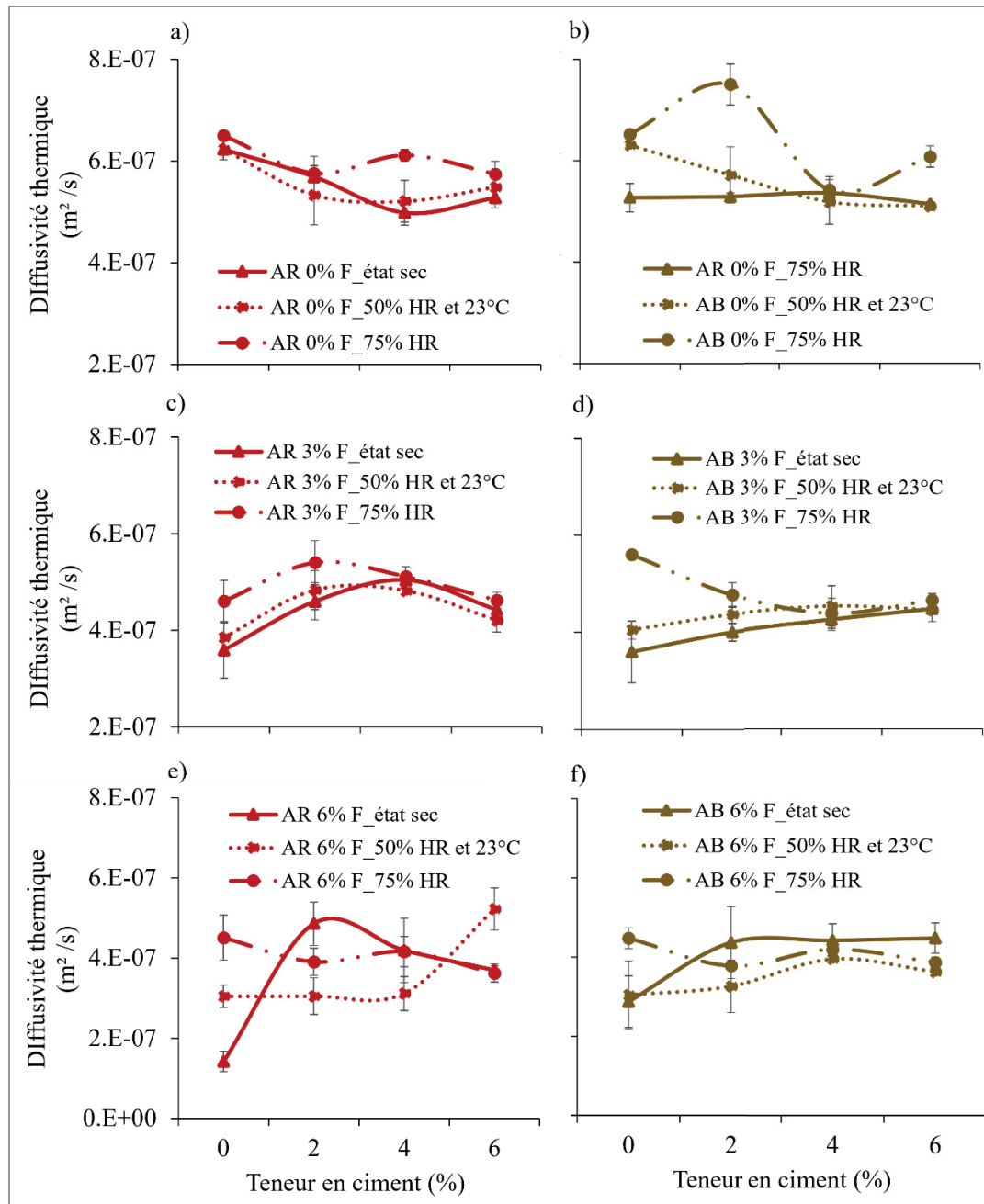


Figure 7.16 Diffusivité thermique en fonction de la teneur en ciment : (a, b) échantillons sans fibre et (c à f) torchis avec 3 % et 6 % de fibres

7.4.3 Propriétés mécaniques

Les Figures 7.17 et 7.18 illustrent les résultats de la résistance à la compression et à la flexion des échantillons stabilisés avec 2 %, 4 % et 6 % de ciment. Les essais de la résistance à la

compression ont été réalisés après 28 jours de séchage à l'air libre, avec une tolérance de ± 1 jour. Les échantillons contenant 2 % de ciment ont été testés à l'aide d'une presse automatique, tandis que les autres échantillons ont été testés à l'aide d'une presse manuelle en raison d'un problème technique survenu pendant les essais, ce qui pourrait avoir influencé les résultats. L'ajout de 2 %, 4 % et 6 % de ciment n'a pas eu d'effet significatif sur la résistance à la compression des échantillons, sauf pour ceux en argile rouge contenant 6 % de fibres et 2 % de ciment, qui ont montré une augmentation. Comparée aux échantillons sans ciment, la résistance à la compression a diminué avec l'ajout de ciment pour chaque type de mélange, à l'exception des échantillons en argile rouge contenant 6 % de fibres et 2 % de ciment (Figure 7.17). Selon les résultats obtenus, les échantillons composés de 6 % de fibres sont 138 % plus résistants que ceux stabilisés sans fibres, mais restent inférieurs à ceux non stabilisés (voir les tests statistiques dans les Tableaux-A IV-1 et IV-2). Dans la littérature, il est rapporté que l'ajout d'une faible teneur en ciment pour la fabrication des échantillons sans fibres n'a pas d'influence significative sur leur résistance à la compression (Himouri, Hamouine, & Guettatfi, 2023; Sanou et al., 2024).

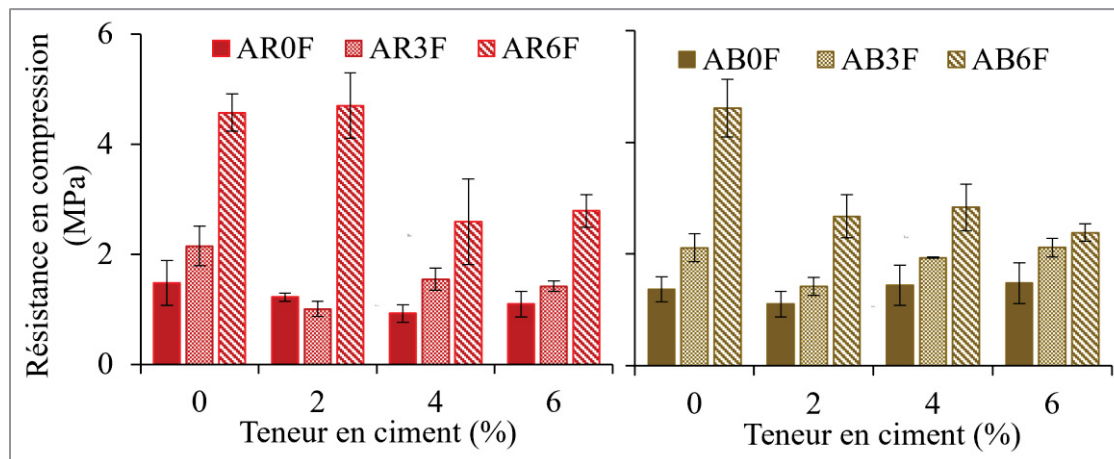


Figure 7.17 Résistance en compression en fonction de la teneur en ciment

Comme pour les essais de résistance à la compression, les essais de résistance à la flexion de tous les échantillons ont été effectués après 28 jours de séchage, avec une tolérance de ± 1 jour, en utilisant la même presse manuelle que celle du chapitre 5. La Figure 7.18 montre les résultats de la résistance à la flexion pour les torchis contenant 3 % et 6 % de fibres, stabilisés avec 2 %,

4 % et 6 % de ciment. Une faible augmentation de la résistance à la flexion a été observée pour les échantillons stabilisés, et peut être attribuée à l'effet combiné du ciment et des fibres, qui améliore la cohésion et la rigidité du matériau. Toutefois, cette augmentation demeure non significative. La résistance à la flexion des échantillons d'argile rouge sans fibre est comparable, quelle que soit la concentration de ciment, sauf pour l'argile beige où la résistance varie légèrement en fonction de la concentration de ciment, mais encore une fois reste non significative (Tableaux-A IV-3 et IV-4). Pour les torchis stabilisés, les valeurs de la résistance à la flexion varient entre 0,2 et 1 MPa. Ces valeurs sont supérieures à 0,1 MPa spécifié dans la norme NZS 4297, énoncée dans les articles (Rai, 2005; Tripura, Gupta, Debbarma, & Deep, 2020). Comme mentionné dans le chapitre 5, des tests sur des murs ont également montré qu'une résistance à la compression de 0,6 MPa et une résistance à la flexion inférieure à 1 MPa suffisent pour assurer la sécurité des bâtiments en torchis de deux étages dans les régions non sismiques (Miccoli et al., 2014; Paquet, 2020; Quagliarini & Maracchini, 2018; Rafi & Lodi, 2017; RB299-19_IRC, 2019; Sen & Saha, 2022).

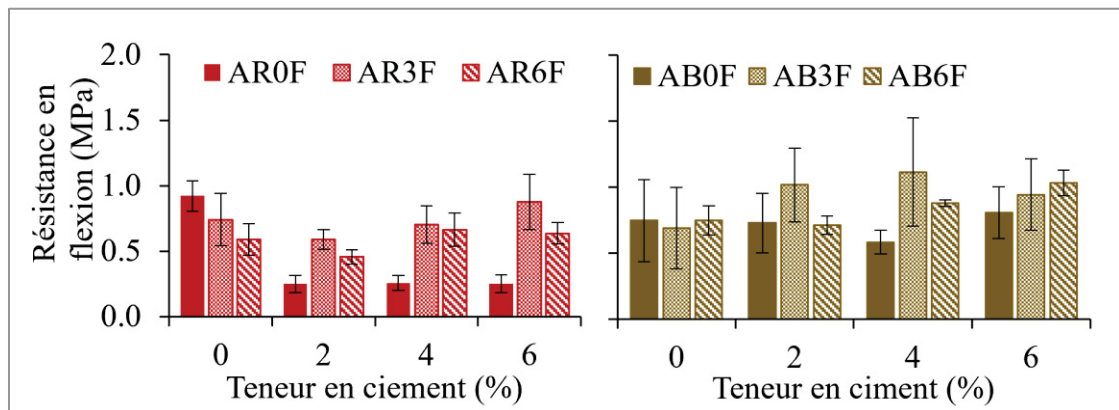


Figure 7.18 Résistances en flexion en fonction de la teneur en ciment

7.4.4 Porosité ouverte

La mesure de la porosité ouverte a été effectuée en combinant la méthode du pycnomètre à gaz utilisant de l'hélium et la méthode d'immersion dans de l'huile non mouillante, réalisée selon la norme (NF ISO 5017, 2013). Les résultats sont illustrés dans le Tableau 7.3. L'ajout de 2 %, 4 % et 6 % de ciment a entraîné une augmentation de la porosité ouverte de tous les

échantillons, qu'ils soient sans fibres ou avec fibres. Ces résultats sont conformes aux études rapportées dans la littérature (Dao, Ouedraogo, Millogo, Aubert, & Gomina, 2018). Pour les échantillons sans fibres, la porosité a augmenté de 13 % à 16 %. Pour les échantillons en torchis avec 3 % et 6 % de fibres, l'augmentation a été de 2 % à 7 %, respectivement. L'augmentation de la porosité des échantillons en argile et en torchis avec l'ajout de ciment, par rapport aux échantillons sans ciment, pourrait être due à une combinaison de plusieurs facteurs. Ces facteurs incluent l'hydratation du ciment, la distribution des particules, la rétraction pendant le séchage et les interactions chimiques entre le ciment et l'argile. Ces mécanismes favorisent la création d'espaces vides supplémentaires dans le matériau, augmentant ainsi sa porosité.

Tableau 7.3 Porosité des échantillons stabilisés et séchés à 28 jours

code	Ciment (%)	Porosité
AR 0F	0	21 ± 0,01
	2	34 ± 0,72
	4	37 ± 0,33
	6	37 ± 1,83
AB 0F	0	20 ± 0,00
	2	33 ± 0,86
	4	35 ± 1,38
	6	33 ± 1,33
AR 3F	0	37 ± 0,01
	2	42 ± 0,48
	4	43 ± 2,23
	6	44 ± 1,20
AB 3F	0	39 ± 0,01
	2	43 ± 3,02
	4	42 ± 0,93
	6	43 ± 0,29
AR 6F	0	45 ± 0,00
	2	48 ± 0,57
	4	49 ± 2,01
	6	47 ± 1,42
AB 6F	0	44 ± 0,02
	2	47 ± 0,78
	4	47 ± 0,25
	6	48 ± 0,71

7.5 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, les résultats exploratoires sur la résistance au feu des échantillons en argile et en torchis non stabilisés, ainsi que les propriétés thermiques des torchis stabilisés, ont été présentés et commentés brièvement. Les échantillons en torchis sont restés intacts lors de l'essai au feu d'une durée de 15 minutes, contrairement aux échantillons en argile qui se sont brisés avant la fin de l'essai.

Pour les propriétés thermiques, la capacité thermique spécifique dépasse 820 J/kg.K, quelle que soit la concentration en ciment. L'ajout de ciment influence significativement l'effusivité et la diffusivité thermique des échantillons d'argile et de torchis. Pour les échantillons sans fibres contenant 4 % de ciment, l'effusivité thermique diminue, tandis que pour ceux avec les fibres et 2 % de ciment, elle est plus élevée et diminue avec 6 % de ciment. La variation de la diffusivité thermique est aléatoire.

L'ajout de ciment affecte également la résistance à la compression et à la flexion des échantillons, mais les variations demeurent non significatives. La résistance à la compression diminue en comparaison avec les échantillons sans ciment, sauf pour les échantillons contenant 6 % de fibres et 2 % de ciment. En revanche, la résistance à la flexion augmente pour les torchis contenant 3 % et 6 % de fibres stabilisés avec du ciment, grâce à l'effet combiné du ciment et des fibres qui améliore la cohésion et la rigidité du matériau. Cette augmentation est non significative.

De plus, l'ajout de ciment a entraîné une augmentation significative de la porosité ouverte des échantillons, qu'ils soient sans fibres ou avec fibres. Cette augmentation pourrait être due à la distribution des particules, à la rétraction pendant le séchage et aux interactions chimiques entre le ciment et l'argile. Toutefois, l'explication des mécanismes qui entrent en jeu demeure très complexe et dépend de plusieurs facteurs, notamment le type d'argile, ainsi que la concentration en fibres et en ciment.

CONCLUSION

Les architectures traditionnelles en terre et ossature de bois, terre et pierre, ou terre renforcée de fibres végétales et ossature de bois, étudiées par plusieurs auteurs, se sont avérées thermiquement plus confortables que les bâtiments construits avec des matériaux conventionnels, également appelés matériaux modernes. Ces dernières années, les matériaux locaux ou traditionnels utilisés dans la construction ont été remplacés par des matériaux conventionnels à haute conductivité thermique, tels que le ciment et les toitures en tôles ondulées. Ce changement a conduit à la conception de bâtiments à performance thermique modeste, nécessitant une forte consommation d'énergie pour maintenir un niveau de confort intérieur entre 20 et 26 °C en cette époque de changements climatiques. Par conséquent, le secteur de la construction et la surconsommation de ciment contribuent fortement au changement climatique par l'émission de CO₂.

En réponse à ces préoccupations environnementales, la réintégration des matériaux locaux à faible empreinte carbone dans le secteur de la construction est encouragée. Réétudier les propriétés hygrothermiques du torchis fabriqué traditionnellement pour sa réintégration dans la construction apparaît comme une solution prometteuse et réaliste, contribuant à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la construction.

La vision générale de ce projet de doctorat était de formuler deux types de torchis en utilisant la technique de fabrication traditionnelle du torchis et d'obtenir un matériau de remplissage pour les structures à ossature de bois. Ensuite, il s'agissait de réaliser une caractérisation hygrothermique et mécanique des échantillons en torchis obtenus, ainsi que d'effectuer la simulation hygrothermique de différents systèmes de murs en torchis pour diverses conditions climatiques. Des études exploratoires ont également été réalisées concernant la résistance au feu pour les échantillons en torchis formulés et les propriétés thermiques et mécaniques pour les torchis stabilisés. Les travaux menés au cours de ce doctorat ont permis de caractériser les propriétés hygrothermiques et mécaniques des matériaux en torchis, et d'évaluer le comportement hygrothermique de différentes configurations de murs en torchis. Ensuite, une

caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques a été effectuée sur des échantillons de torchis stabilisés avec 2 %, 4 % et 6 % de ciment Portland GU.

Les chapitres I et II ont examiné l'état de l'art des recherches antérieures sur la construction en terre et les structures en torchis existantes, ainsi que les méthodes utilisées pour la caractérisation des échantillons en torchis formulés avec de l'argile rouge, beige et des fibres de blé. La technique expérimentale utilisée pour évaluer la performance thermique d'un mur en torchis de 3 % de fibres a été présentée, de même que les logiciels COMSOL Multiphysics 6.1 et WUFI 6.7 employés pour la simulation numérique. Les simulations ont été effectuées en utilisant les données climatiques de huit villes différentes, telles que Djibouti, Johannesburg, Le Caire, Abidjan, Montréal, Paris, Rennes et Reno, afin de couvrir une diversité de zones climatiques. Le chapitre I sur l'état de l'art a montré que l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments implique d'améliorer l'enveloppe du bâtiment afin de réduire la consommation d'énergie en limitant l'utilisation des équipements de chauffage et de refroidissement. Par ailleurs, le recours à de nouveaux matériaux plus respectueux de l'environnement, tels que les matériaux en terre et géosourcés, tend à devenir courant pour la conception des enveloppes. Cependant, l'utilisation des matériaux géosourcés pour la conception des enveloppes des bâtiments peut entraîner des phénomènes de condensation et de dégradation des matériaux en raison de la présence de fibres dans le matériau et des conditions climatiques. Cela nécessite de modéliser l'enveloppe du bâtiment en utilisant les données climatiques spécifiques à chaque ville, afin de déterminer si le climat est adapté à ces types de construction.

Le premier chapitre a également souligné le manque de main-d'œuvre qualifiée et de connaissances sur l'utilisation des matériaux locaux disponibles, ainsi que le déficit de logements en Afrique, qui représente environ 51 millions de logements. Pouvoir formuler un matériau de construction adapté aux climats variables et offrant une inertie thermique optimale est un enjeu considérable de nos jours. Toutefois, La conception de ces types d'architecture dans des climats chauds et humides pose des défis particuliers, car la construction doit répondre aux exigences de performance thermique pour des climats changeants au fil des saisons. Le bois et l'argile étant tous deux des matériaux fortement hygroscopiques, l'analyse du

comportement de l'enveloppe bois/argile face à l'eau et de l'évolution de la température dans ces enveloppes mixtes face au climat extérieur était nécessaire.

Pour répondre aux objectifs du doctorat, les travaux présentés concernent les résultats des caractérisations hygrothermiques et mécaniques des échantillons en torchis et en argile. Ils incluent également une caractérisation exploratoire des propriétés thermiques du torchis stabilisé, la résistance au feu du torchis non stabilisé, ainsi que des simulations numériques des transferts en régime transitoire au sein de onze enveloppes en torchis dans différentes conditions climatiques.

Cette étude a démontré que l'ajout de fibres de blé dans les mélanges d'argile, utilisés pour la fabrication du torchis améliore significativement les propriétés thermiques des échantillons. Les résultats expérimentaux ont montré que l'augmentation de la teneur en fibres réduisait la densité des échantillons tout en augmentant leur capacité d'isolation thermique. La conductivité thermique des échantillons a diminué de 40 % à 63 %, et la capacité thermique a augmenté de 2 % à 10 % avec l'ajout de 3 % et 6 % de fibres. Les valeurs de conductivité thermique de 0,2 et 0,4 W/(m·K) ont été obtenues pour les échantillons secs fabriqués avec 6 % de fibres d'argile rouge et d'argile beige, respectivement. Ces résultats sont prometteurs pour des torchis fabriqués par la technique de fabrication traditionnelle du torchis, et leur utilisation en construction pourrait réduire l'impact environnemental grâce à la disponibilité des matières premières, la facilité de production des matériaux et leur faible empreinte carbone. Les analyses des résultats globaux ont montré que les échantillons en torchis présentaient des propriétés hygrothermiques intéressantes grâce à leur capacité à réguler l'humidité relative élevée sans risque de moisissure. Ces échantillons ont été exposés à une humidité relative très élevée (80 à 95 %) pendant plus de deux semaines sans risque de moisissure. De plus, les échantillons étudiés présentaient une excellente valeur de tampon d'humidité supérieure à 2 g/(m²·%HR).

L'analyse du comportement mécanique des échantillons en torchis a montré que l'ajout de fibres de blé améliorait les propriétés mécaniques. Les échantillons sans fibres présentaient une résistance à la flexion plus élevée que ceux avec fibres à 28 jours de séchage. Cependant, à 120 jours de séchage, les valeurs de résistance à la flexion des échantillons avec fibres se

sont améliorées pour égaler celles des échantillons sans fibres, indiquant une amélioration progressive de la résistance à la flexion des échantillons renforcés par des fibres au fil du temps. Les essais exploratoires sur les échantillons stabilisés ont également montré que l'ajout de ciment influençait les propriétés thermiques et mécaniques des échantillons.

Les simulations de performance hygrothermique ont révélé que les murs en torchis, en particulier ceux contenant 6 % de fibres, offraient des températures intérieures plus favorables pour les zones climatiques froides et chaudes. Pour des températures extérieures variant de -15 °C à 43 °C, la variation des températures de surface intérieure était de 12 °C à 29,6 °C pour les murs en argile, de 15 °C à 27 °C pour les murs en torchis avec 3 % de fibres, et de 19 °C à 25,5 °C pour les murs en torchis avec 6 % de fibres. L'application de finitions en argile et l'utilisation d'une structure en bois pour les murs en torchis amélioraient le confort thermique intérieur, réduisant ainsi la demande de climatisation pour les climats chauds. Pour les climats tempérés, humides et/ou froids tels qu'Abidjan, Montréal, Paris et Rennes, l'utilisation d'un pare-air/vapeur ou d'un pare-pluie sur la face extérieure du matériau en torchis éliminait le risque de développement de moisissures.

Les tests exploratoires de résistance au feu ont démontré que les échantillons de torchis renforcés par des fibres restaient intacts après avoir été exposés au feu, tandis que les échantillons sans fibres se sont brisés en morceaux. À une température de 750 °C, les échantillons de torchis ont présenté une calcination des fibres sur la surface exposée. Les résultats des travaux menés dans ce projet de doctorat ont démontré que les matériaux en torchis fabriqués selon la technique traditionnelle présentaient des caractéristiques favorables pour la conception d'enveloppes écologiques. Toutefois, une étude plus approfondie sur la résistance au feu est en cours de réalisation pour consolider les résultats exposés dans ce rapport de doctorat.

La recherche effectuée dans cette thèse de doctorat a permis de caractériser et de comprendre le comportement hygrothermique des murs en torchis, tout en améliorant leur comportement hydrique grâce à l'utilisation d'une membrane pare-air/pare-vapeur 3M™ 3015 dans les zones climatiques froides et humides. L'intégration de finitions en argile et de structures en bois dans l'enveloppe du bâtiment, sans la membrane pare-air/pare-vapeur 3M™ 3015, offre des

solutions durables qui réduisent la dépendance aux systèmes de climatisation, ce qui est particulièrement bénéfique dans les climats chauds. La réponse aux objectifs spécifiques de cette thèse a conduit à l'établissement d'une base de données complète sur les propriétés et la performance hygrothermiques des matériaux en torchis, révélant leur potentiel pour une utilisation durable dans la construction. Les résultats obtenus dans cette thèse de doctorat soulignent l'opportunité de valoriser le torchis dans une démarche d'économie circulaire, réduisant ainsi l'empreinte environnementale des constructions grâce à l'utilisation de ressources locales et renouvelables. Du point de vue environnemental, l'utilisation de fibres végétales dans la fabrication de matériaux en torchis permettrait de réduire les fibres végétales présentes dans la nature. Pour la construction, cela offre des matériaux locaux et entièrement recyclables en fin de vie. En ce qui concerne les émissions de CO₂ liées à la construction et à l'utilisation des bâtiments, cela ouvre la voie à une adoption plus large de solutions écologiques dans le secteur du bâtiment, par la conception de bâtiments écologiques et bioclimatiques, réduisant la dépendance aux systèmes de climatisation et de chauffage. L'approfondissement des études sur la résistance au feu et l'optimisation des propriétés hygrothermiques et mécaniques avec d'autres types de fibres pourraient transformer ces matériaux traditionnels en solutions modernes et efficaces, élargissant leur utilisation face aux défis climatiques actuels.

RECOMMANDATIONS

Pour valoriser les avantages globaux du torchis fabriqué selon la technique traditionnelle et favoriser son utilisation dans la construction moderne sur une large zone, plusieurs recommandations sont proposées pour compléter cette étude :

1. Recommandations pour la modélisation hygrothermique

- Effectuer des modélisations numériques à l'échelle du bâtiment conçu avec du torchis, formulé avec la même technique, ainsi que des mesures expérimentales à l'échelle du bâtiment sur une période d'un an pour confirmer les avantages de la performance hygrothermique de la structure du bâtiment en torchis traditionnel pour la construction moderne.
- Effectuer des simulations avec le logiciel COMSOL 6.1 en utilisant les configurations des murs multicouches présentées dans cette thèse de doctorat, sans considérer l'hypothèse adiabatique entre le contact sol/mur et toiture/mur.

2. Recommandations pour les travaux expérimentaux

- Poursuivre les études expérimentales sur des spécimens de torchis fabriqués avec différents types de fibres végétales en utilisant la même méthode de fabrication pour élargir son utilisation dans le secteur de la construction.
- Réaliser une étude sur l'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques et le retrait volumique du torchis pour observer l'impact de la variation de la teneur en eau sur la résistance à la compression et à la flexion des échantillons de torchis fabriqués selon la méthode traditionnelle.
- Effectuer des études supplémentaires sur les mesures du retrait linéaire et volumique par d'autres méthodes, modéliser le retrait volumique du torchis avec 3 % et 6 % de fibres en fonction du temps en utilisant des données climatiques réelles pour observer comment le torchis réagit aux variations climatiques. Il serait également pertinent

d'étudier le comportement des murs en torchis face aux tremblements de terre et aux vents forts (systèmes de cadre en bois vertical/horizontal/diagonal remplis de torchis).

- Les tests acoustiques pour les torchis fabriqués selon la technique traditionnelle sont indispensables pour évaluer leur performance en termes d'isolation acoustique, d'absorption sonore et de confort acoustique global. Ces tests permettront d'assurer que le torchis est un matériau de construction efficace non seulement du point de vue thermique et écologique, mais aussi du point de vue acoustique, contribuant ainsi à la création d'environnements intérieurs sains, confortables et propices au bien-être des occupants. Il serait donc nécessaire d'effectuer ce travail par des études acoustiques.
- Il serait aussi pertinent de mener des études sur les économies de coûts de ce type de construction par rapport à la construction avec des matériaux conventionnels pour confirmer tous les avantages associés à la construction en torchis.
- Effectuer des tests sur des bâtiments de 3 à 4 étages avec des fondations utilisant des pierres ou d'autres matériaux imperméables à la vapeur d'eau pour éviter la remontée capillaire, ce qui éviterait le contact direct du mur en bois/torchis avec le sol.
- Évaluer l'isolation et l'effet de la neige sur la construction en bois/torchis en zone nordique.
- Des recherches futures pourraient également se concentrer sur l'étude des propriétés hydriques, de l'influence de la teneur en eau sur les propriétés thermiques et mécaniques du torchis stabilisé afin de pouvoir effectuer des simulations numériques sur différentes enveloppes conçues avec le torchis stabilisé pour l'évaluation de leur performance hygrothermique.

ANNEXE I

AUTRES DONNÉES SUR LA CARACTÉRISATION DES ARGILES ET DES FIBRES

Ces résultats confirment que les deux argiles utilisées dans ce travail ont le quartz (SiO_2) comme composant principal, par la présence d'un pic élevé de Si.

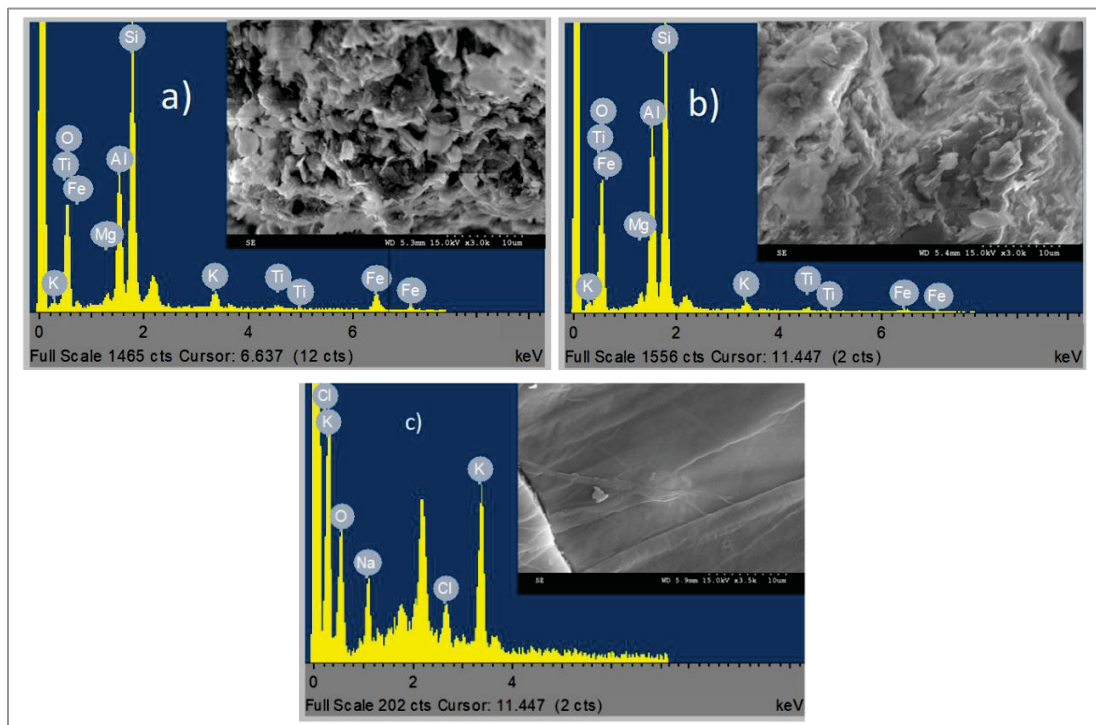


Figure-A I-1 Image obtenue par microscope électronique à balayage (MEB), a) argile rouge, b) argile beige, and c) fibres

ANNEXE II

CHOIX DE RAPPORT EAU/ARGILE ET MÉTHODE DE SÉCHAGE

Le processus de formulation des échantillons a débuté à la fin de l'été 2020, suite au remplacement des moules en raison des problèmes rencontrés lors du démoulage. Initialement, les échantillons ont été préparés, insérés dans les moules et laissés pendant 3 jours avant d'être démoulés. Cependant, ce processus n'a pas abouti, car les échantillons ont développé des fissures, comme le montre la Figure A II-1. Une seconde tentative a été entreprise en démoulant les échantillons immédiatement après leur fabrication et en les exposant à l'air ambiant du laboratoire. Après trois jours d'exposition, ils ne séchaient pas et développaient d'importantes fissures, similaires à celles de la première tentative. Avec les échantillons contenant 3 % de fibres, le séchage s'est avéré long et a entraîné de légères fissures. Par conséquent, une analyse de l'humidité et de la température du laboratoire a été menée pour déterminer les causes des fissurations et du séchage insuffisant des échantillons. Il a été constaté que la température du laboratoire fluctuait entre 22 et 23 °C et l'humidité entre 37 et 77 %. La nuit, l'humidité atteignait 77 %, empêchant ainsi un séchage normal des échantillons.

Étant donné que la fissuration joue un rôle crucial dans l'évaluation des propriétés hygrothermiques, la méthode de séchage a été modifiée. Un séchage en étuve a été mis en place pour évaluer l'état des échantillons après une journée à une température de séchage de 30 ± 5 °C, respectant ainsi le mode de séchage dans les climats chauds et les climats froids, soit en saison d'été. Les échantillons sans fissuration superficielle ont été obtenus après cette première journée de séchage, suivie d'une période de séchage de 6 jours à l'air ambiant du laboratoire. Par la suite, tous les échantillons fabriqués pour le projet ont été séchés en étuve à 30 ± 5 °C pendant une journée, puis à l'air ambiant du laboratoire pendant 6 jours ou plus avant les essais (Tableau A II-1).

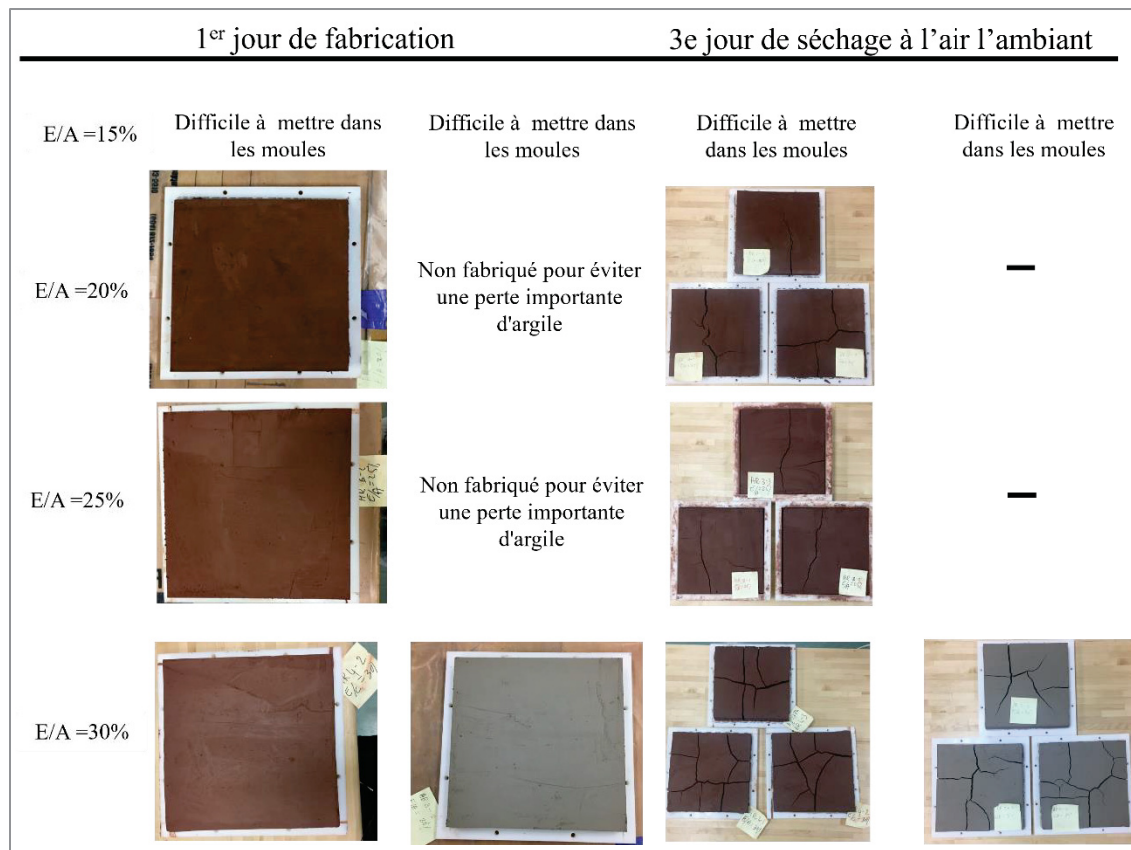


Figure-A II-1 Quelques images des échantillons séchés à l'air libre dans le laboratoire

Tableau-A II-1 Choix de technique de séchage des échantillons

Code	Argile	Nombre d'échantillons	E/A	Fibre	Fibre humidifiée	E/F	Temps d'humidification fibre	Temps de repos du mélange	Temps avant démoulage
			%	%		%	h	h	J
AR1-1	Rouge	3	20	0	-	-	-	0.5	3
AR1-2	Rouge	3	20		-	-	-	0.5	3
AR1-3	Rouge	3	20		-	-	-	0.5	3
AR2-1	Rouge	3	25	0	-	-	-	0.5	3
AR2-2	Rouge	3	25		-	-	-	0.5	3
AR2-3	Rouge	3	25		-	-	-	0.5	3
AR3-1	Rouge	3	30	0	-	-	-	0.5	3
AR3-2	Rouge	3	30		-	-	-	0.5	3
AR3-3	Rouge	3	30		-	-	-	0.5	3
AB3-1	Beige	3	30	0	-	-	-	0.5	3
AB3-2	Beige	3	30		-	-	-	0.5	3
AB3-3	Beige	3	30		-	-	-	0.5	3
AR2-1F	Rouge	3	25	3	Non	0	-	2	3
AR2-2F	Rouge	3	25		Non	0	-	2	3
AR2-3F	Rouge	3	25		Non	0	-	2	3
AB2-1F	Beige	3	25	3	Non	0	-	2	3
AB2-2F	Beige	3	25		Non	0	-	2	3
AB2-3F	Beige	3	25		Non	0	-	2	3
AR25%-1	Rouge	3	25	0	-	-	-	2	Immédiat
AR25%-2	Rouge	3	25		-	-	-	2	Immédiat
AR25%-2ex	Rouge	3	25		-	-	-	2	Immédiat
AR25%-3	Rouge	3	25	0	-	-	-	2	Immédiat
AB25%-1	Beige	3	25	0	-	-	-	2	Immédiat
AB25%-2	Beige	3	25		-	-	-	2	Immédiat
AB25%-3	Beige	3	25		-	-	-	2	Immédiat
AR25%-1FN	Rouge	3	25	3	Oui	205	2 à 5	2	Immédiat
AR25%-2FN	Rouge	3	25		Oui	205	2 à 5	2	Immédiat
AR25%-3FN	Rouge	3	25		Oui	205	2 à 5	2	Immédiat
AR25%-1FS	Rouge	3	25	3	Oui	443	2 à 5	2	Immédiat
AR25%-2FS	Rouge	3	25		Oui	443	2 à 5	2	Immédiat
AR25%-3FS	Rouge	3	25		Oui	443	2 à 5	2	Immédiat
Totale d'échantillons			93						
Echantillons retenus			27						

Tableau-A II-1 Choix de technique de séchage des échantillons (suite)

Code	Type de séchage	Température	Humidité	Sortie de l'étuve	Temps séchage	Etat	Choix pour les tests
		°C	%	J	J		
AR1-1	Ambiant	22 -23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR1-2	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR1-3	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR2-1	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR2-2	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR2-3	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR3-1	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR3-2	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR3-3	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AB3-1	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AB3-2	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AB3-3	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Craqué	Non
AR2-1F	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Fissure faible	Utilisable
AR2-2F	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Fissure faible	Utilisable
AR2-3F	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Fissure faible	Utilisable
AB2-1F	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Fissure faible	Utilisable
AB2-2F	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Fissure faible	Utilisable
AB2-3F	Ambiant	22-23	37- 77	-	7	Fissure faible	Utilisable
AR25%-1	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AR25%-2	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AR25%-2ex	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Fissure très faible	Utilisable
AR25%-3	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AB25%-1	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AB25%-2	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AB25%-3	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AR25%-1FN	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AR25%-2FN	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AR25%-3FN	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Non fissuré	Oui
AR25%-1FS	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Fissure surface	Utilisable
AR25%-2FS	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Fissure surface	Utilisable
AR25%-3FS	Étuve	30-35	Inconnu	1	7	Fissure surface	Utilisable
Totale d'échantillons			93				
Echantillons retenus			27				

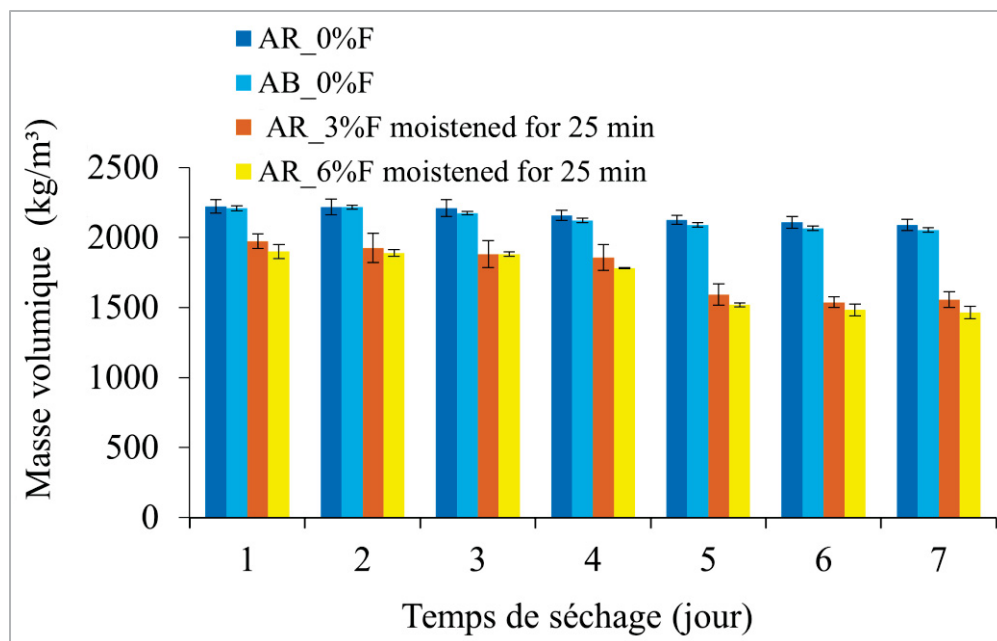


Figure-A II-2 Évolution de la masse volumique de quelques échantillons en fonction du temps de séchage

ANNEXE III

ÉCHÉANCIER DÉTAILLÉ

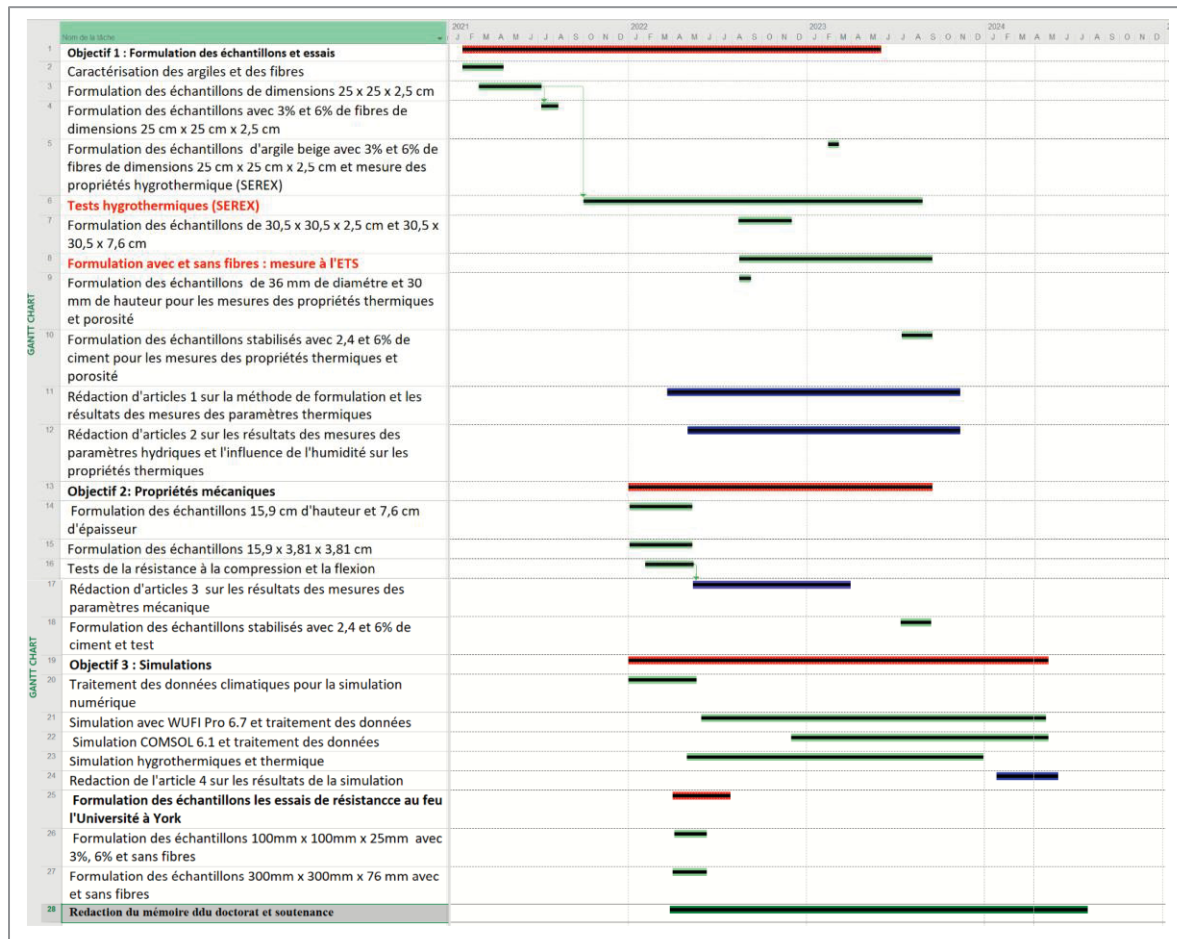


Figure-A III-1 Les étapes du programme de la thèse

ANNEXE IV

ARTICLES ET POSTERS RÉALISÉS DURANT LA THÈSE DE DOCTORAT

- **Articles de revues publiés et soumis**

Kaboré, A., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2024). Improved insulation with fibres in heavy cob for building walls. *Industrial Crops and Products*, 215, (2024) 118626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118626>

Kaboré, A., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2024). The Impact of Vegetable Fibres on the Shrinkage and Mechanical Properties of Cob Materials. *Materials* 2024, 17, 736. doi: <https://doi.org/10.3390/ma17030736>

Kaboré, A., Laghdir, A., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2024). Natural thermal and hygrothermal regulation with heavy cob for low carbon construction. *Construction and Building Materials*, 451, (2024) 138832.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138832>

Kaboré, A., Bendouma, M., & Ouellet-Plamondon, C. (submitted for review). Numerical analysis of heavy cob walls' hygrothermal behavior. *Energy and Building*

- **Articles de conférence accompagnés de communications orales**

Ouellet-Plamondon, C., Kaboré, A., Hygrothermal measurement of heavy cob materials, 2023. Conférence internationale RILEM sur la synergie de l'expertise vers la durabilité et la robustesse des matériaux à base de ciment et des structures en béton du 14 au 16 juin 2023, Vol.43. pp. 1243– 1252. Communication orale et un article de conférence.

doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_111

Kaboré, A., Ouellet-Plamondon, C., Characterization of the clay for hygrothermal modelling, 2021. CSCE 2021 Annual Conference, 26-29 May 2021. Contribution : Valorisation des argiles pour son utilisation dans la construction en bois-argile et en bois-torchis. Communication orale et d'un article de conférence. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-1004-3_29

Kaboré, A., Bendouma, M., Ouellet-Plamondon, C., Study of the thermal behavior of a low carbon material: the case of the cob, 24-27 May 2023. Présentée au Congrès annuel SCGC_ Moncton, N.B 2023. Communication orale et un article de conférence. doi :https://doi.org/10.1007/978-3-031-61499-6_28

Kaboré, A., Bendouma, M., Ouellet-Plamondon, C., Étude du comportement thermique d'un matériau neutre en carbone, 8-12 Mai 2023 (Université Polytechnique de Montréal). Présentée au 90e Congrès de l'Acfas, section 622, Matériaux durables pour des constructions durables. Communication orale. <https://www.acfas.ca/evenements/congres/programme/90/600/622/c>

Kaboré, A., Ouellet-Plamondon, C., Characterization of clays and fibers for use in wood/cob construction, 2022. Rilem 2022, 75th RILEM Spring Convention Paris 2022, 14 to 19 March 2022. Contribution : Valorisation des argiles pour son utilisation dans la construction en bois-argile et en bois-torchis. Communication orale.

Kaboré, A., Ouellet-Plamondon, C., Hygrothermal Assessment of Cob Walls in Cold Conditions. The 9th International Building Physics Conference (IBPC 2024). 25 to 27 July 2024, Toronto. Communication orale et un article de conférence. doi : https://doi.org/10.1007/978-981-97-8305-2_45

Kaboré, A., Ouellet-Plamondon, C., Optimizing heavy cob wall design for temperate-semi-oceanic environments. 78th RILEM week & RILEM Conference on sustainable materials and structures: meeting the major challenges of the 21st century-SMS 2024. 25 to 30 August 2024, Toulouse, France. Communication orale et un article de conférence.

- **Affiches**

Présentation de l’affiche ACFAS 2022 : Matériaux innovants pour la construction durable et à faible empreinte carbone : cas du torchis, 9-11 mai 2022, Auteur : Aguérata Kaboré et Claudiane Ouellet-Plamondon, présentée au 89e Congrès de l’Acfas sur la contribution de la recherche à la transition vers l’économie circulaire.

<https://www.acfas.ca/evenements/congres/89/contribution/materiaux-innovants-construction-durable-faible-empreinte>

Présentation de l’affiche CIGR 2021 : Water absorption of natural fibers for the dosage in clay-wood buildings, 11-14 May 2021, authors: Aguérata Kaboré, Claudiane Ouellet-Plamondon, Presented at 9th Conference of the concrete for sustainable agriculture International Symposium Virtually from Québec City, Canada, 2021. Mon rôle est d’expliquer l’importance de l’utilisation des fibres et de l’argile pour la fabrication des matériaux composites.

<https://library.csbe-scgab.ca/docs/meetings/2021/CSBE21799.pdf>

APPENDICE A

CHAPITRE 3 - ARTICLE 1 - IMAGES OF TEST EQUIPMENT AND STATISTICAL ANALYSIS RESULTS

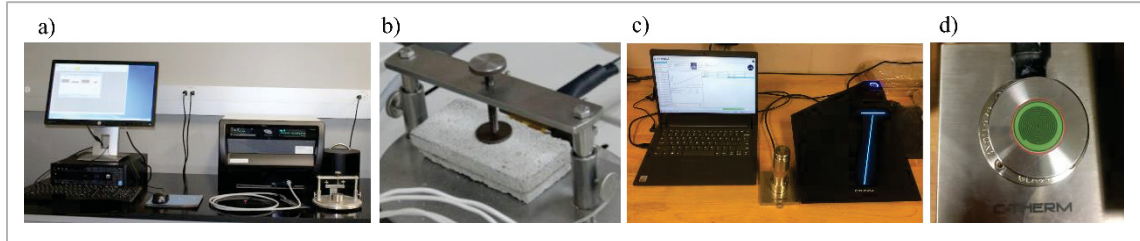


Figure AA-1 Photographic image of a) TPS 3500 apparatus, b) the sample holder of the TPS 3500 apparatus, c) Trident apparatus and d) Trident sensor

Table AA-1 Difference in thermal conductivity (λ) between the two methods: t-TEST - approved

Method	TPS 3500	Trident C-Therm
Mean	0.79	0.71
Variance	0.11	0.10
Observations (n)	18	18
P-value	0.0003	

Table AA-2 Improving thermal properties by adding fibres: ANOVA - approved

Groups	Methods	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
Thermal cond. λ	STT	18	0.79	0.08	0.11	E-73
Heat capacity C_p		18	893	40	18707	
Thermal eff. E		18	1037	39	57811	
Thermal diff. D		18	5.45E-07	5.02E-8	4.11E-14	
Thermal cond. λ	MTPS	18	0.71	0.04	0.10	
Heat capacity C_p		18	926	18	1130	
Thermal eff. E		18	1029	32	83593	
Thermal diff. D		18	4.43E-07	2.11E-8	1.99E-14	

STT = Steady thermal transmission method

MTPS = Modified transient planar source method

Table AA-3 Effect of fibres load (%) on thermal conductivity:
ANOVA - approved

Groups	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
0%	6	1.23	0.05	0.006	4E-11
3%	6	0.63	0.03	0.009	
6%	6	0.51	0.04	0.000	

Table AA-4 Effect of fibres load (%) on thermal conductivity (λ) for red clay: t-TEST - approved

Red clay	0% fibre	6% fibres
Mean	0.75	0.20
Variance	0.003	0.002
Observations (n)	3	3
P-value	0.004	

Table AA-5 Effect of fibres load (%) on thermal conductivity (λ) for beige clay: t-TEST - approved

Beige clay	0% fibre	6% fibres
Mean	0.87	0.4
Variance	0.008	0.015
Observations (n)	3	3
P-value	0.02	

Table AA-6 Effect of fibres on thermal diffusivity (D) and effusivity (E): ANOVA - approved

Groups	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
Effusivity- STT	18	1037	39	57811	2E-32
Effusivity-MTPS	18	1029	32	83593	
Diffusivity - STT	18	5.45E-07	5.02E-8	4.11E-14	
Diffusivity-MTPS	18	4.43E-07	2.11E-8	1.99E-14	

STT = Steady thermal transmission method

MTPS = Modified transient planar source method

Table AA-7 Difference between the two clays for thermal inertia. t-TESTA : (thermal effusivity (E)) - approved

clay	Red	Beige
Mean	824	972
Variance	67875	46742
Observations (n)	9	9
P-value	0.01	

Table AA -8 Difference between the two clays for thermal inertia. t-TEST B: (thermal diffusivity (D)) - approved

clay	Red	Beige
Mean	3.26E-07	3.91E-07
Variance	2.31E-14	1.48E-14
Observations (n)	9	9
P-value	0.04	

Table AA-9 Improving thermal inertia by adding fibres: ANOVA - approved

	Groups	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
Effusivity-MTPS	0%	6	1008	0.05	76601	0.01
	3%	6	921	0.03	13187	
	6%	6	629	0.04	22434	
Diffusivity-MTPS	0%	6	5.01E-07	1.62E-08	1.53E-15	2 E-5
	3%	6	3.59E-07	3.34E-09	4.47E-15	
	6%	6	2.15E-07	2.48E-08	9.20E-15	

APPENDICE B

CHAPITRE 4-ARTICLE 2 - STATISTICAL ANALYSIS RESULTS

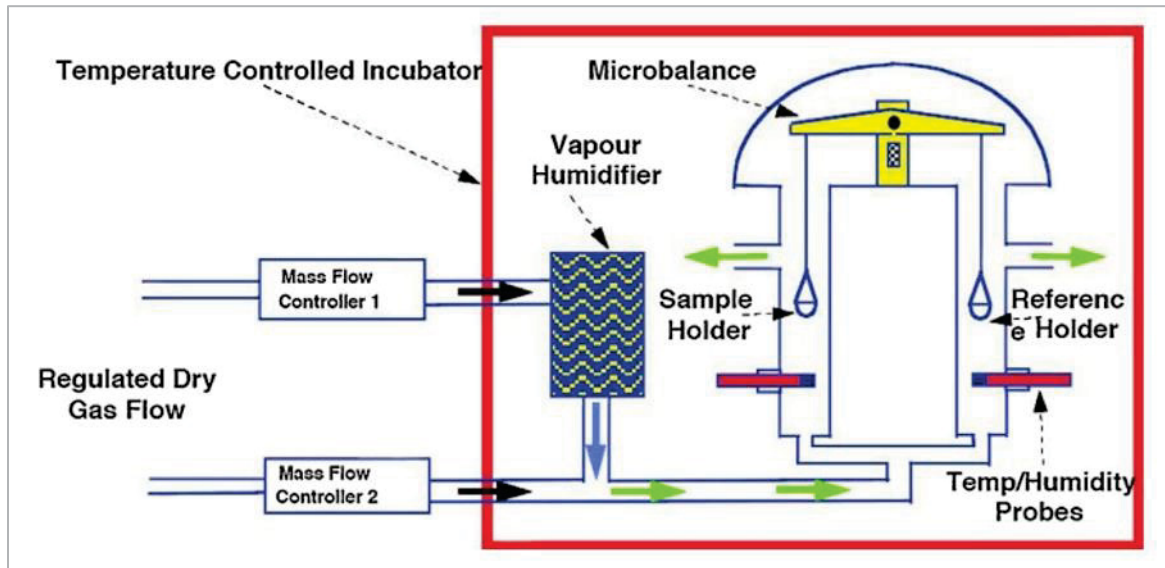


Figure AB-1 Measurement of Sorption, desorption isotherm curves, and specific moisture capacity (ξ): Principle of the Dynamic Vapor System (DV2, SMS, UK) (ASTM C1498, 2016; ISO 12571, 2021)

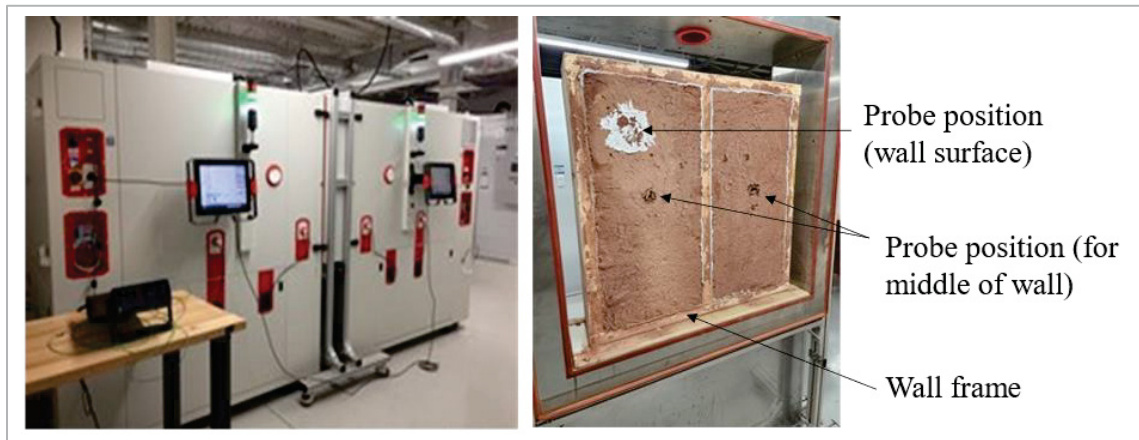


Figure AB-2 Measurement of indoor temperature and humidity in cob on a wall element: Principle for the evaluation of the hygrothermal performance of cob wall

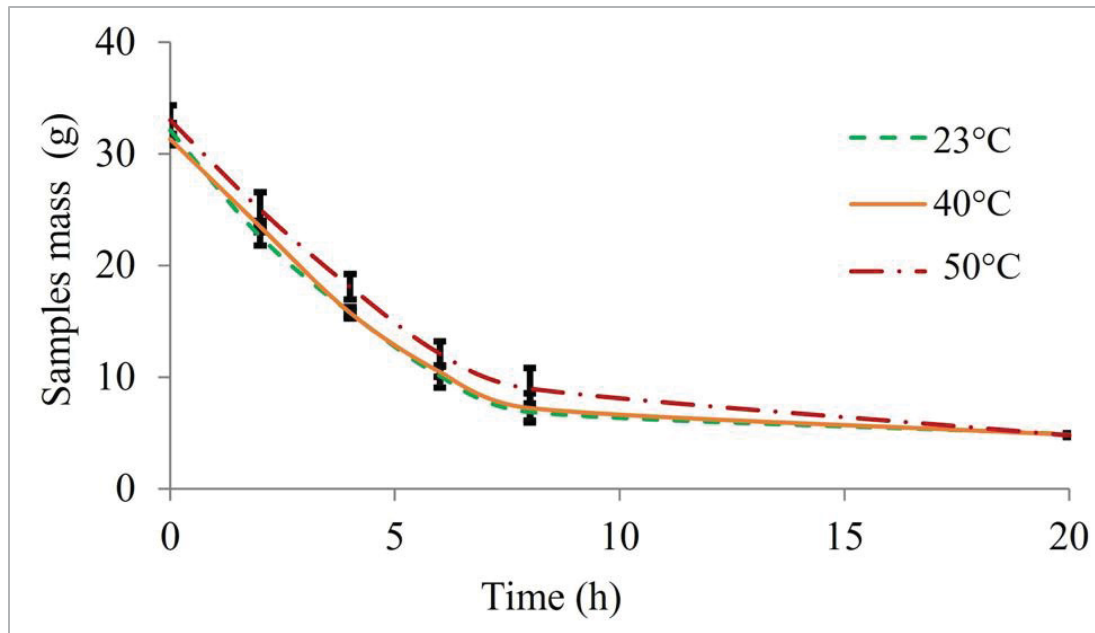


Figure AB-3 Drying kinetics of wheat fibres as a function of time (water desorption of samples)

Table AB-1 Effect of relative humidity on thermal capacity (C_p) of red clay samples and no influence of beige clay sample: ANOVA - Non-significant difference observed

clay		n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
	Dry sample	9	962	83	17737	0.26
Beige	50%HR	9	940	40	3700	
	75%HR	9	1014	30	5947	

Table AB-2 Resistance factor (μ) depends on the nature of the clays: t-TEST A – Significant difference observed

Test methods	Dry		Wet	
	Red	Beige	Red	Beige
Clay	Red	Beige	Red	Beige
Mean	14.79	18.01	4.65	6.59
Variance	0.23	4.83	1.12	4.38
Observations (n)	9	9	9	9
P-value	0.002		0.02	

Table AB-3 Vapor permeability (δ) depends on the nature of the clays: t-TEST B – Significant difference observed

Test methods	Dry		Wet	
Clay	Red	Beige	Red	Beige
Mean	1.53E-11	1.32E-11	5.18E-11	3.87E-11
Variance	1.38E-24	3.95E-24	9.79E-23	9.63E-23
Observations (n)	9	9	9	9
P-value	0.03		0.003	

Table AB-4 No influence of fibre addition on water vapour resistance factor (μ). ANOVA. - Non-significant difference observed

Test method	Groups (fibres %)	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
Dry	0	6	17.28	0.06	9.90	0.50
	3	6	15.72	0.02	2.94	
	6	6	16.21	1.77	3.09	
Wet	0	6	4.26	0.79	0.58	0.08
	3	6	6.03	1.17	2.37	
	6	6	6.57	0.52	5.75	

Table AB-5 Comparison of MBV_{exp} for MBV_{theor}: ANOVA Significant difference observed

Groups	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
experimental	6	5.13	0.06	1.01	0.001
	6	4.88	0.17	0.56	
	6	3.60	0.10	0.21	
Theoretical	6	4.19	0.18	0.72	
	6	3.52	0.11	0.34	
	6	3.59	0.60	0.57	

APPENDICE C

CHAPITRE 5-ARTICLE 3 - IMAGES BEFORE AND AFTER THE MECHANICAL RESISTANCE TESTS, AND STATISTICAL ANALYSIS RESULTS

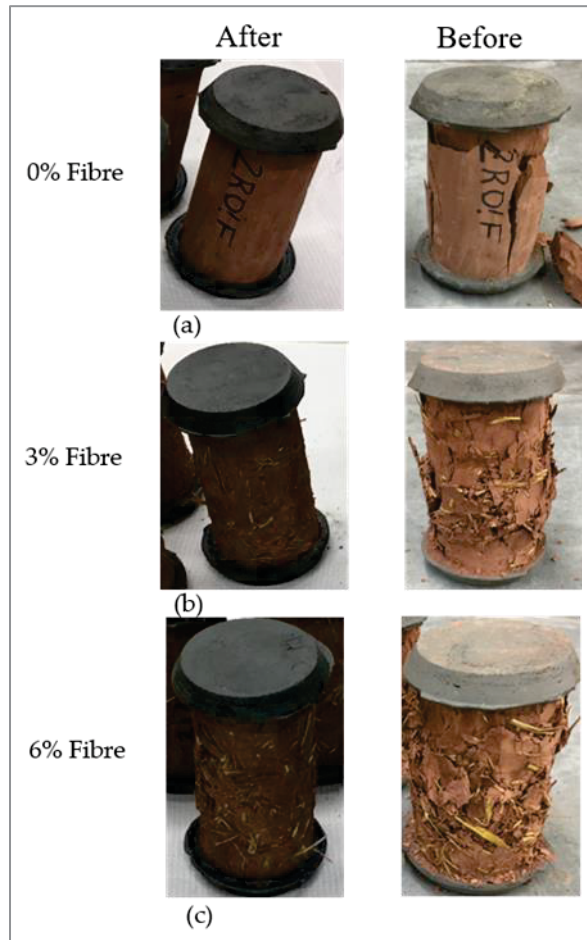


Figure AC-1 The condition of the samples after and before compression testing



Figure AC-2 Condition of the samples after and before flexural testing

Table AC-1 Influence fibres on compressive strength: ANOVA – Significant difference observed

Time (days)	Groups (fibre)	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
28	0	6	1.72	0.09	0.06	5.03E-11
	3	6	2.13	0.09	0.04	
	6	6	4.59	0.03	0.16	
120	0	6	1.40	0.19	0.023	8.61E-10
	3	6	2.15	0.17	0.058	
	6	6	3.91	0.19	0.182	

Table AC-2 Effect of time on mechanical properties: t-TEST- Significant difference observed

Type of test	Compressive strength		Flexural strength	
Clay	Red	Beige	Red	Beige
Mean	2.81	2.49	0.83	1.25
Variance	1.77	1.25	0.08	0.05
Observations (n)	18	18	18	18
P-value	0.008		8.62E-05	

Table AC-3 Influence fibres on flexural strength: ANOVA A- Significant difference observed

Time (days)	Groups (fibre)	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
28	0	6	1.10	0.23	0.08	0.009
	3	6	0.71	0.21	0.06	
	6	6	0.67	0.10	0.02	

Table AC-4 Influence fibres on flexural strength: ANOVA B- Non-significant difference observed

Time (days)	Groups(fibre)	n	Average	Std. dev.	Variance	P-value
120	0	6	1.16	0.17	0.06	0.17
	3	6	1.21	0.12	0.02	
	6	6	1.39	0.14	0.05	

APPENDICE D

CHAPITRE 6-ARTICLE 4 – EVALUATION OF THE CLIMATE DATA FROM THE STUDIED CITIES

- Djibouti city

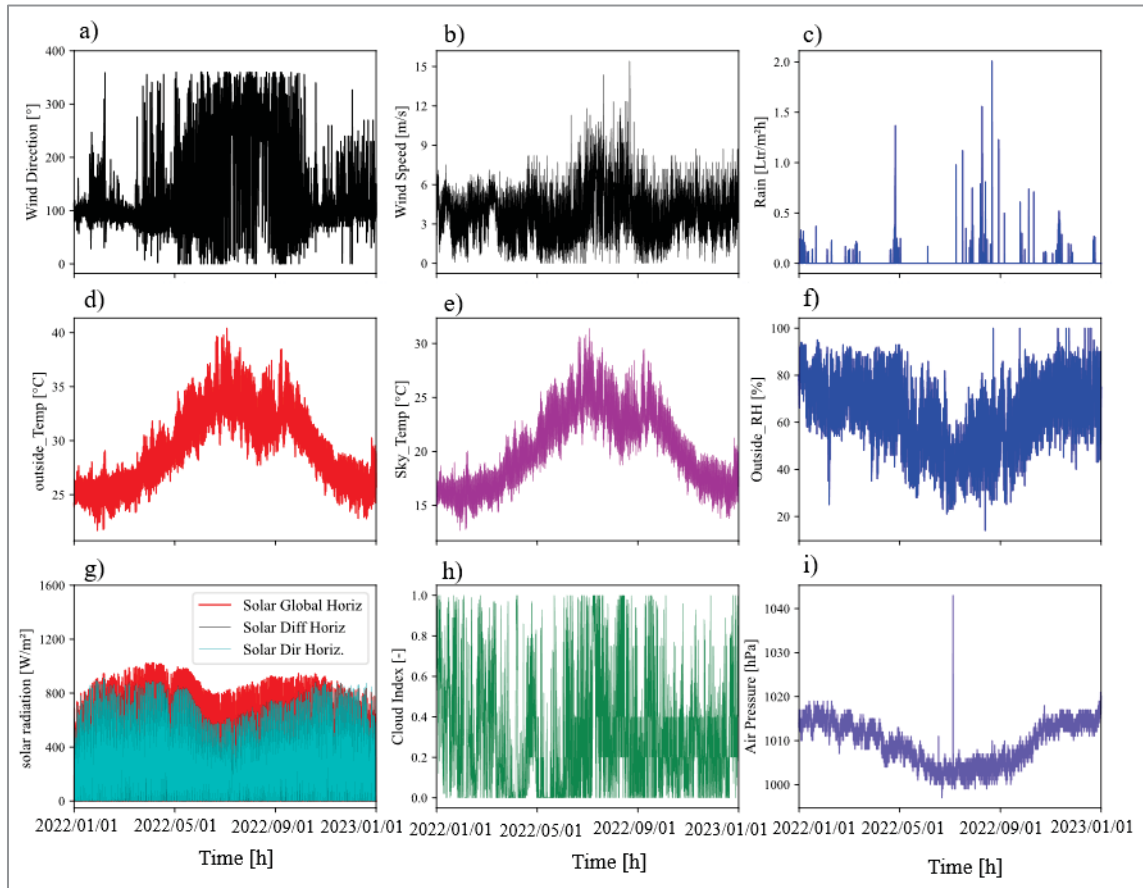


Figure AD-1 Djibouti climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- Johannesburg city

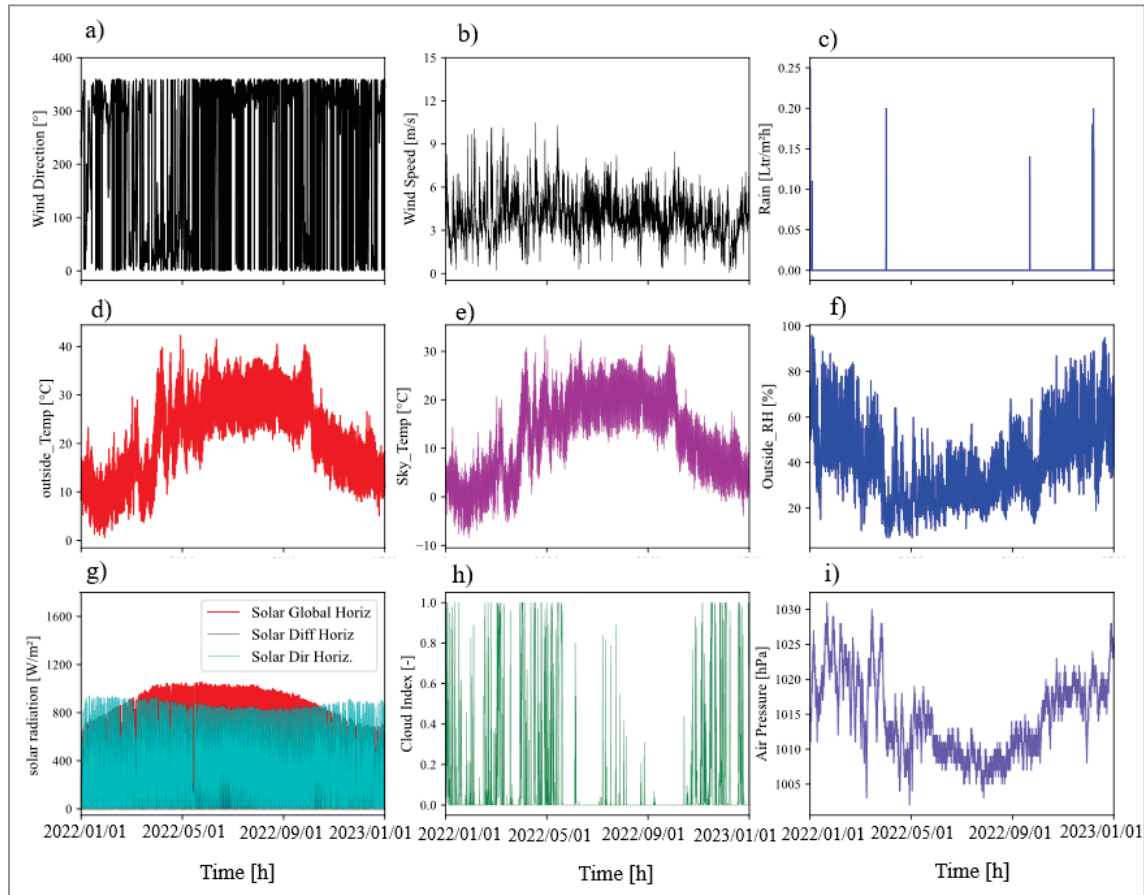


Figure AD-2 Johannesburg climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- Cairo city

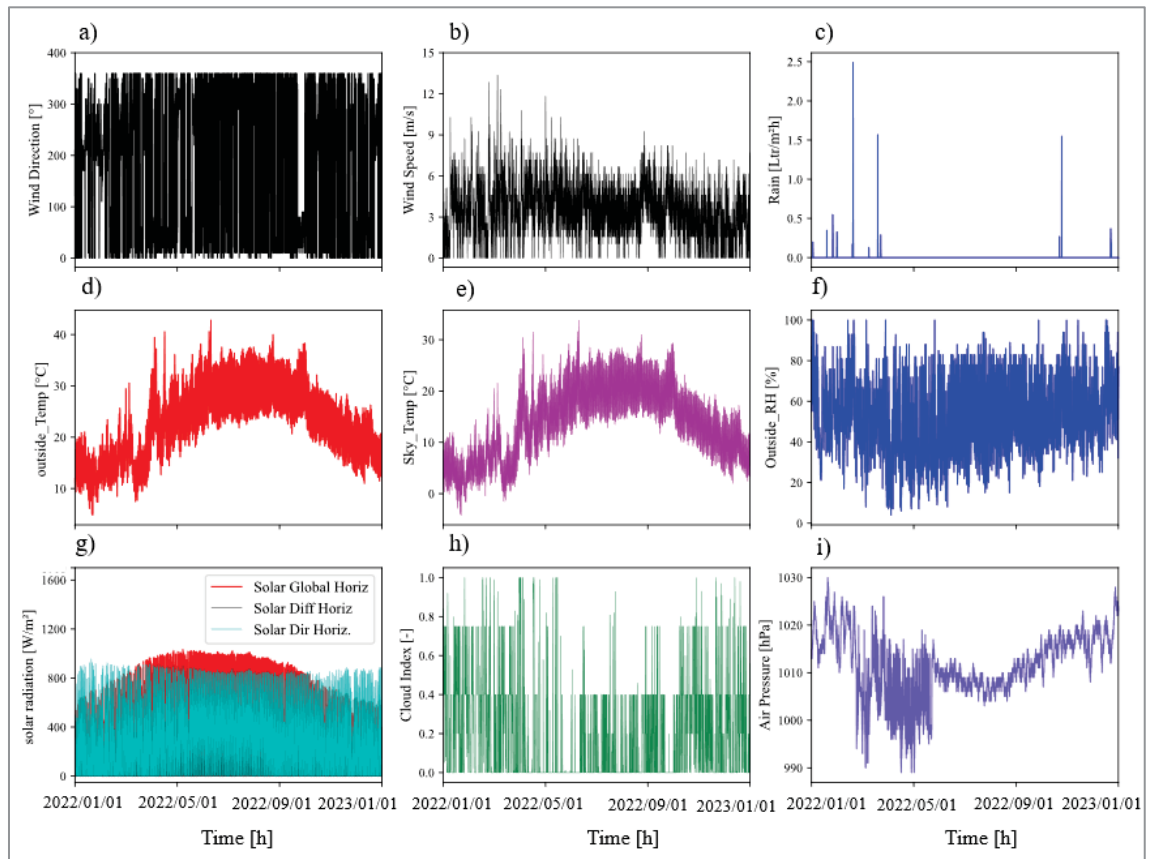


Figure AD-3 Cairo climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- Abidjan city

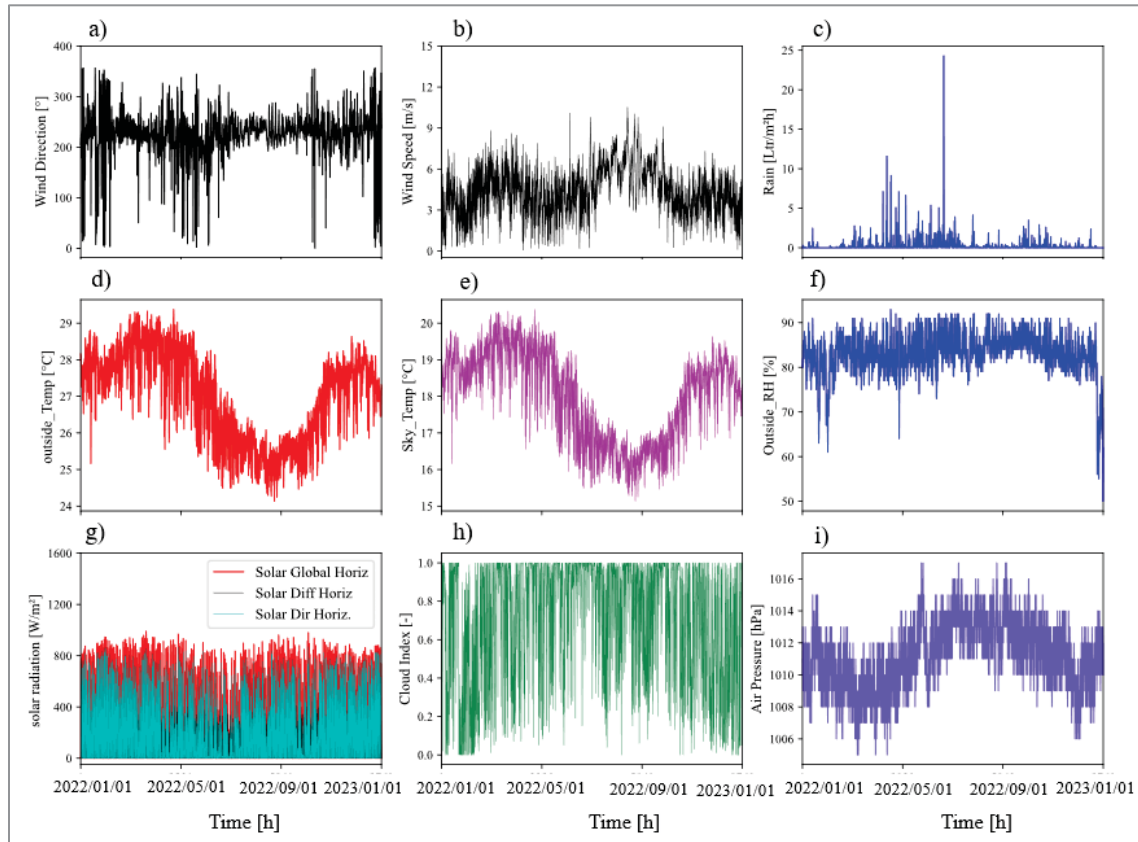


Figure AD-4 Abidjan climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- Montreal city

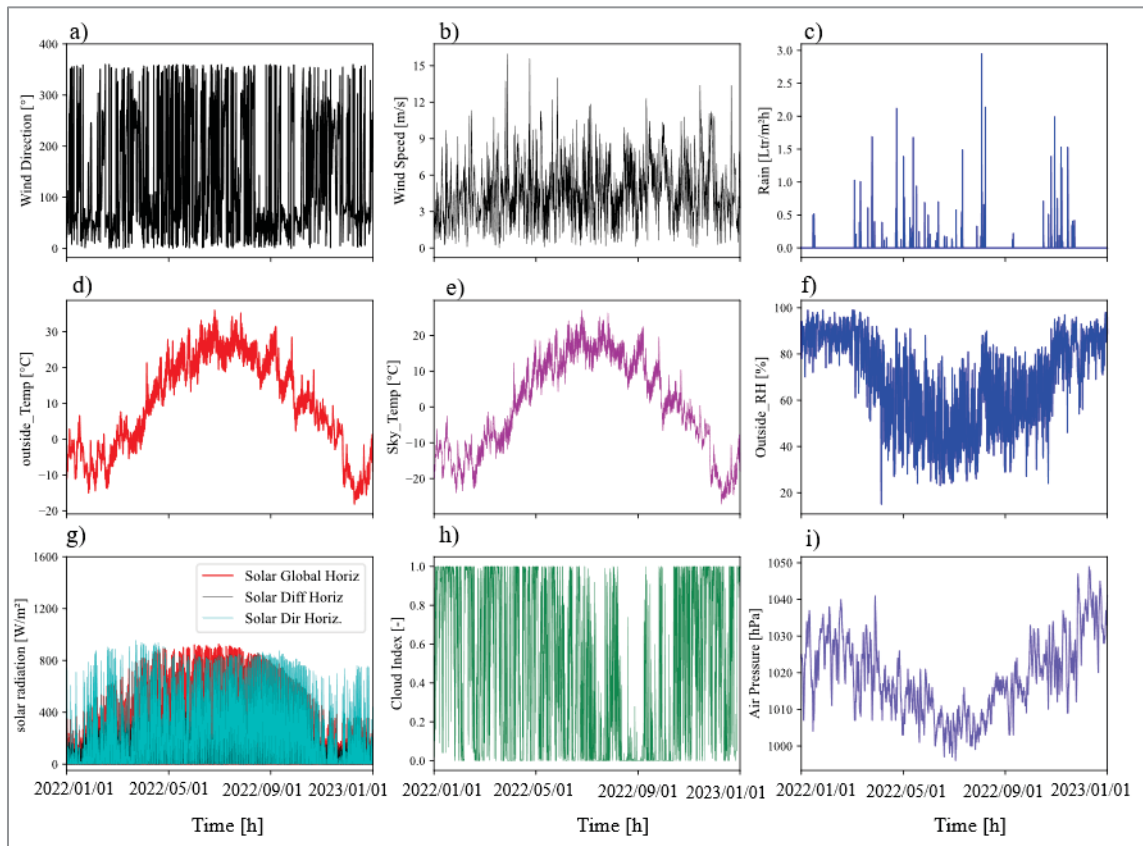


Figure AD-5 Montreal climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- Paris city

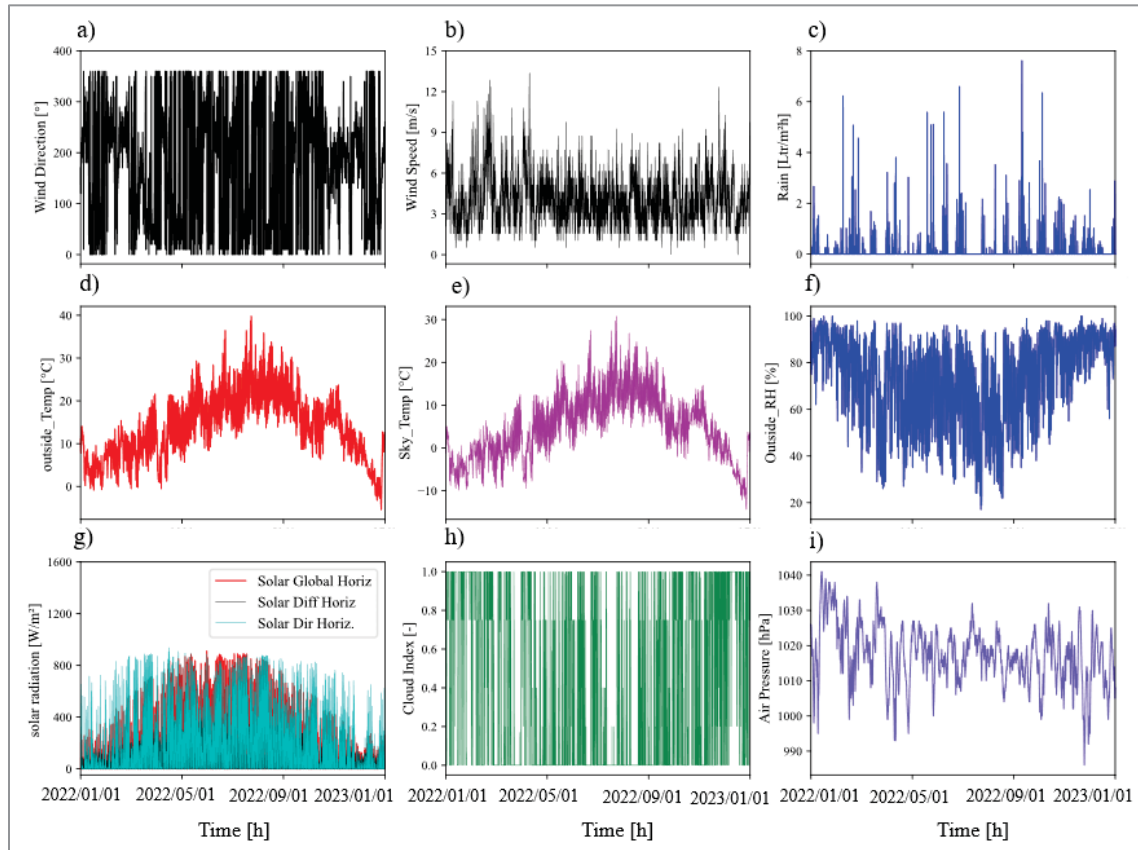


Figure AD-6 Paris climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- Rennes city

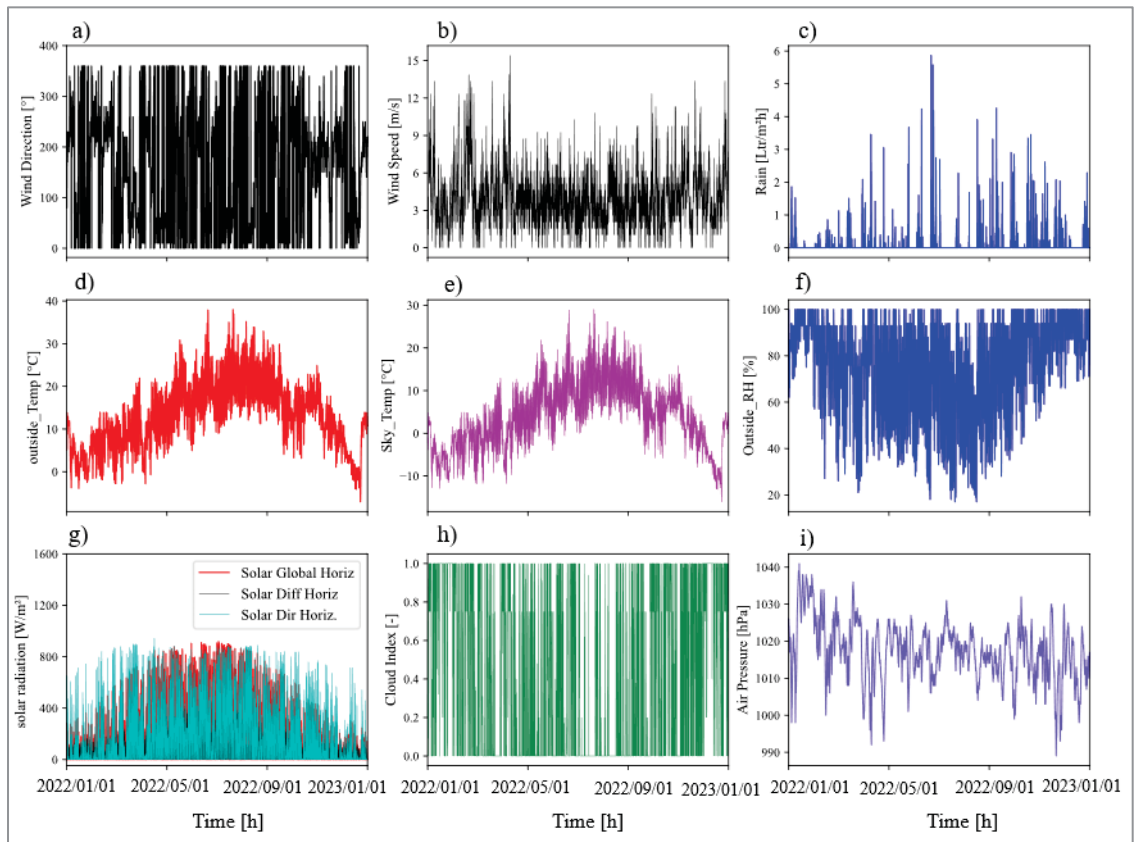


Figure AD-7 Rennes climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- **Reno city**

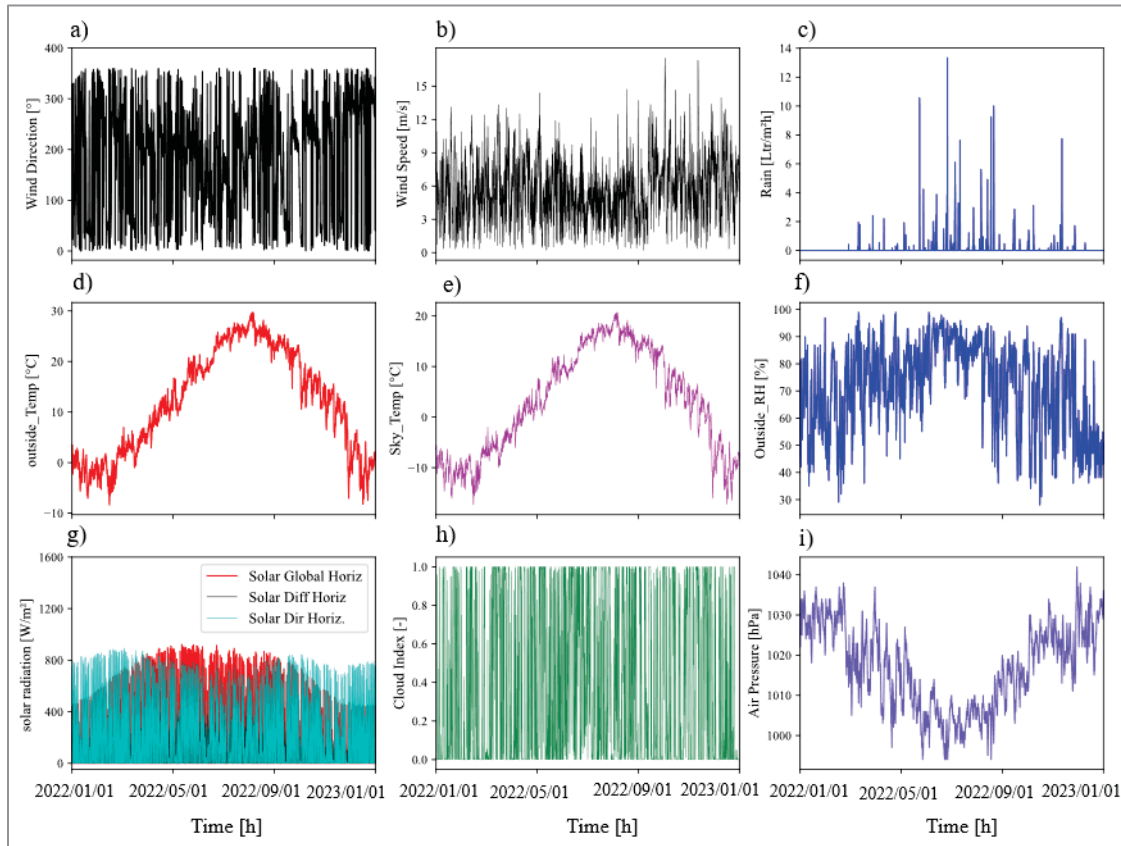


Figure AD-8 Reno climate from January 2022 to January 2023: a) wind direction, b) wind speed, c) amount of rain per hour, d) and e) outside and sky temperature, f) relative humidity, g) solar radiation, h) cloudiness rate, i) air vapour pressure

- **Evaluation de l'humidité dans les murs de type X à XII étudiés pour les régions froides et humides à fortes précipitations : Cas d'Abidjan et de Montréal**

En observant la Figure AD-9, on constate que la variation de l'humidité de la surface extérieure du torchis en contact avec la membrane pare-air et pare-vapeur 3MTM 3015 est inférieure à 70 %, ainsi que pour celle de la profondeur des murs durant les trois années de simulation. Donc, il n'y a pas de risque de condensation d'humidité dans le torchis pour ces systèmes de murs simulés avec les données climatiques de la ville d'Abidjan. En ce qui concerne les résultats de la simulation avec les données climatiques de la ville de Montréal, l'humidité la plus élevée est observée pour le mur de type X, qui est égale à 80 % (Figure AD-10). Ce mur

respecte la limite fixée pour éviter la condensation, tout comme les deux autres murs qui présentent des variations d'humidité tout au long du matériau en torchis, inférieures à 80 %.

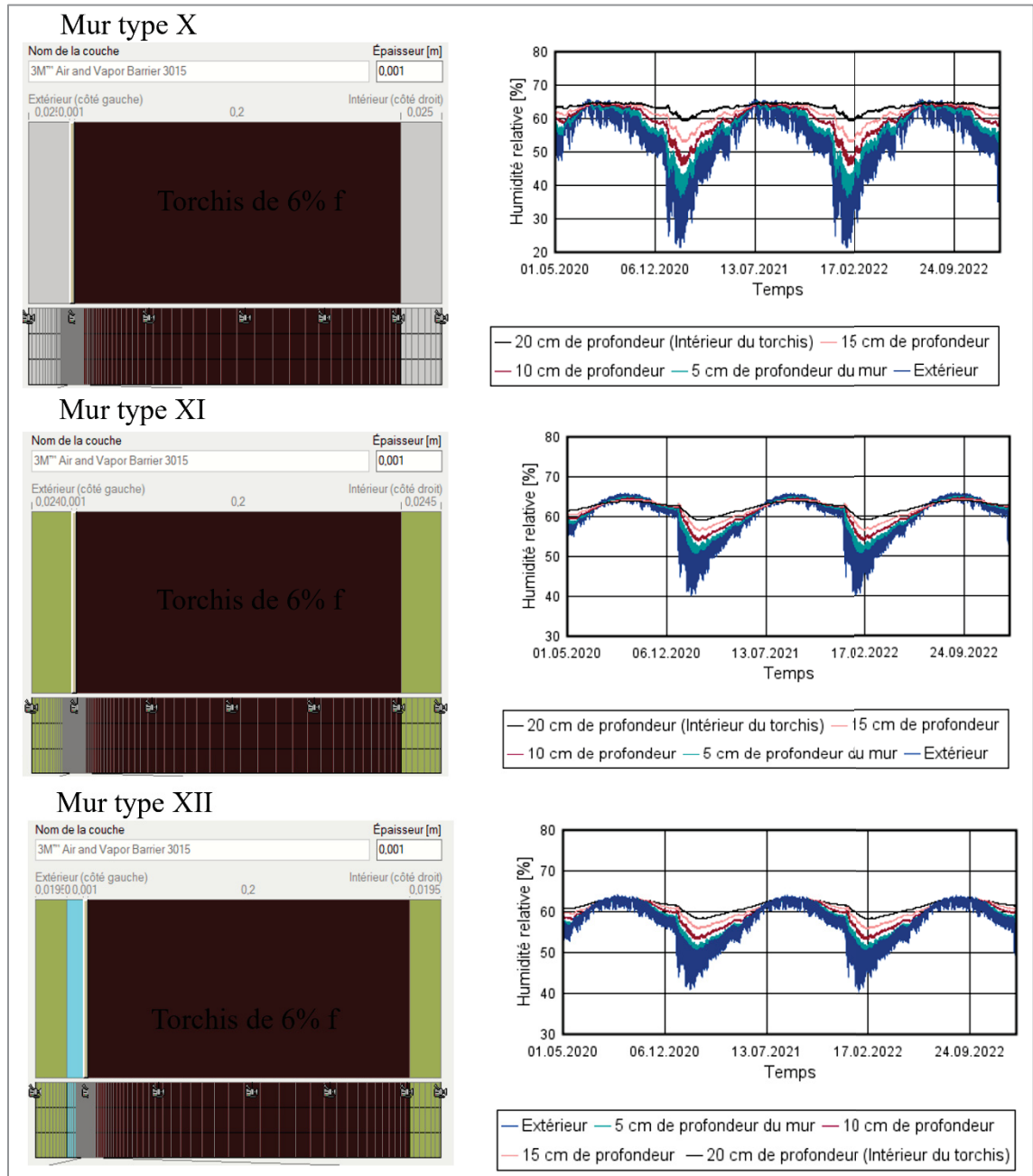


Figure AD-9 Position des moniteurs à récupération de données et variation de l'humidité dans les murs pour chaque position (ville d'Abidjan)

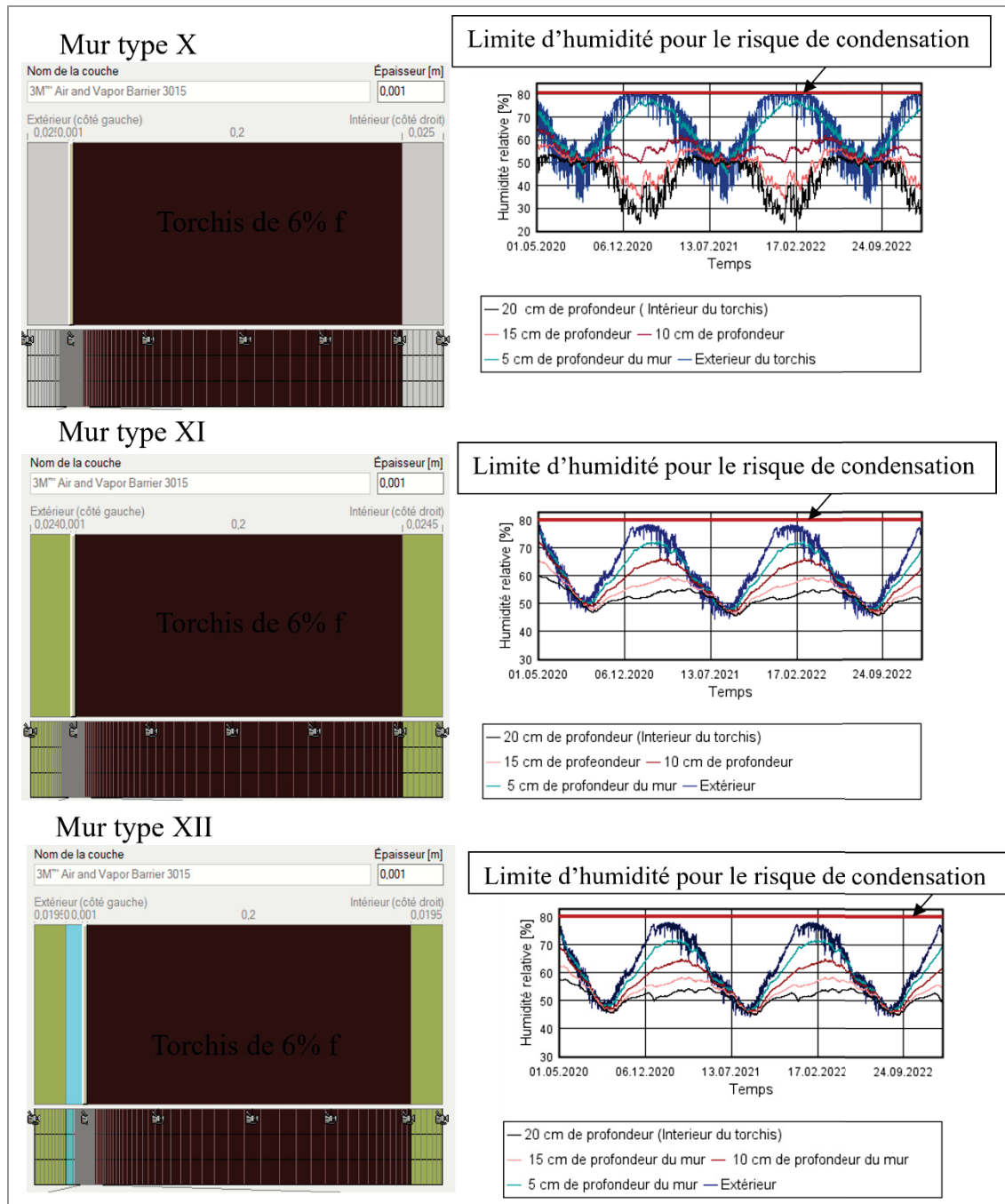


Figure AD-10 Position des moniteurs à récupération de données et variation de l'humidité dans les murs pour chaque position (Ville de Montréal)

APPENDICE E

CHAPITRE 7 - RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE

Tableau AE-1 Comparaison des valeurs de la résistance en compression des échantillons avec 6 % de fibres stabilisés et non stabilisés Vs échantillons sans fibre stabilisés et non stabilisés : ANOVA - Différence significative observée

Groupe (fibres %)	Groupe (ciment %)	n	Average	Stand. dev.	Variance	P-value
0	0	6	1,42	0,27	0,09	1,26E-14
0	2	6	1,26	0,17	0,03	
0	4	6	1,19	0,35	0,14	
0	6	6	1,29	0,32	0,12	
6	0	6	4,59	0,36	0,16	
6	2	6	3,68	1,09	1,42	
6	4	6	2,71	0,54	0,35	
6	6	6	2,59	0,28	0,09	

Tableau AE-2 Comparaison des valeurs de la résistance en compression des échantillons avec 6 % de fibres stabilisés Vs échantillons 6 % de fibres non stabilisés : ANOVA - Différence significative observée

Groupe (fibres %)	Groupe (ciment %)	n	Average	Stand. dev.	Variance	P-value
6	0	6	4,59	0,06	0,36	2,36E-04
6	2	6	3,68	0,17	1,09	
6	4	6	2,71	0,10	0,54	
6	6	6	2,59	0,18	0,28	

Tableau AE - 3 Comparaison entre les valeurs de la résistance en flexion des échantillons sans fibre stabilisés : argile rouge : ANOVA - Différence significative non observée

Groupe (fibres %)	Groupe (ciment %)	n	Average	Stand. dev.	Variance	P-value
0	2	3	0,25	0,05	0,004	0,98
0	4	3	0,26	0,05	0,003	
0	6	3	0,25	0,06	0,005	

Tableau AE - 4 Comparaison entre les valeurs de la résistance en flexion des échantillons sans fibre stabilisés : argile beige : ANOVA - Différence significative non observée

Groupe (fibres %)	Groupe (ciment %)	n	Average	Stand. dev.	Variance	P-value
0	2	3	0,73	0,18	0,05	0,37
0	4	3	0,58	0,08	0,009	
0	6	3	0,81	0,16	0,04	

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbas, M. S., McGregor, F., Fabbri, A., Ferroukhi, M. Y., & Perlot, C. (2022). Effect of moisture content on hygrothermal properties: comparison between pith and hemp shiv composites and other construction materials. *Construction and Building Materials*, 340, 127731. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127731>
- Abu-Jdayil, B., Mourad, A.-H., Hittini, W., Hassan, M., & Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709-735. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>
- Acevedo, N., Rocha, M., & Bertolino, L. (2017). Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, 63, 253-262. doi : <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662045>
- Ahmad, M. R., Chen, B., Maierdan, Y., Kazmi, S. M. S., & Munir, M. J. (2021). Study of a new capillary active bio-insulation material by hygrothermal simulation of multilayer wall. *Energy and Buildings*, 234, 110724. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110724>
- Aigbavboa, C., A Oke1, O. A., Aghimien, D., & Okgonne, S. (2019). Quality of low-income housing projects in South Africa *1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development*, 640 8. doi: 10.1088/1757-899X/640/1/012029
- Ajouguim, S., Talibi, S., Djelal-Dantec, C., Hajjou, H., Waqif, M., Stefanidou, M., & Saadi, L. (2021). Effect of Alfa fibers on the mechanical and thermal properties of compacted earth bricks. *Materials Today: Proceedings*, 37, 4049-4057. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.539>
- Akinwumi, I. (2014). Earth building construction processes in Benin City, Nigeria and engineering classification of earth materials used.
- Al-Mudhaffer, A. F., Saleh, S. K., & Kadhum, G. I. (2022). The role of sustainable materials in reducing building temperature. *Materials Today: Proceedings*, 61, 690-694. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.249>
- Al Haffar, N., Fabbri, A., McGregor, F., & Colina, H. (2019). Cement stabilization effect on mechanical and hygic properties of compacted earth. Dans *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>. Repéré à <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>

- Alabi, A. B., Babalola, O. A., Nwankwo, L. I., & Olatunji, S. (2014). Cooling effect of some materials in clay composite bricks for tropical region. *FUTY Journal of the Environment*, 8(1), 1-7. Repéré à file:///C:/Users/AP32820/Downloads/ajol-file-journals_406_articles_176059_submission_proof_176059-4837-450264-1-10-20180814.pdf
- Alassaad, F., Touati, K., Levacher, D., El Mendili, Y., & Sebaibi, N. (2022). Improvement of cob thermal inertia by latent heat storage and its implication on energy consumption. *Construction and Building Materials*, 329, 127163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127163>
- Alassaad, F., Touati, K., Levacher, D., & Sebaibi, N. (2023). Effect of latent heat storage on thermal comfort and energy consumption in lightweight earth-based housings. *Building and Environment*, 229, 109915. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109915>
- Alioui, A., Kaitouni, S. I., Azalam, Y., Bendada, E. M., & Mabrouki, M. (2024a). Effect of straw fibers addition on hygrothermal and mechanical properties of carbon-free adobe bricks: From material to building scale in a semi-arid climate. *Building and Environment*, 255, 111380.
- Alioui, A., Kaitouni, S. I., Azalam, Y., Bendada, E. M., & Mabrouki, M. (2024b). Effect of straw fibers addition on hygrothermal and mechanical properties of carbon-free adobe bricks: From material to building scale in a semi-arid climate. *Building and Environment*, 111380. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111380>
- Alwani, M. S., Khalil, H. A., Sulaiman, O., Islam, M. N., & Dungani, R. (2013). An approach to using agricultural waste fibres in biocomposites application: thermogravimetric analysis and activation energy study. *BioResources*, 9(1), 218-230.
- Ameh, E. (2019). A review of basic crystallography and x-ray diffraction applications. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 105, 3289-3302. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04508-1>
- Anger, R. (2011). *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction* (Lyon, INSA).
- Anglade, E., Aubert, J.-E., Sellier, A., & Papon, A. (2022). Physical and mechanical properties of clay–sand mixes to assess the performance of earth construction materials. *Journal of Building Engineering*, 51, 104229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104229>
- ANSI/ASHRAE 55. (2004). *ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers... doi: http://www.ditar.cl/archivos/Normas_ASHRAE/T0080ASHRAE-55-2004-ThermalEnviromCondiHO.pdf

- Aouinti, M. (2023). *Sorption du produit de traitement de bois par l'argile dans la construction en terre : cas de l'octaborate disodique tétrahydraté (DOT)* (École de technologie supérieure).
- Apine, I., Birjukovs, M., & Jakovics, A. (2019). Comparative assessment of mould growth risk in lightweight insulating assemblies via analysis of hygrothermal data and in situ evaluation. *Journal of Ecological Engineering*, 20(11). doi: <http://dx.doi.org/10.12911/22998993/113147>
- Arafat, S., Wasiuddin, N. M., & Mohammad, L. N. (2023). Evaluation of bio-based and petroleum-based rejuvenator based on cracking susceptibility of hot mix asphalt with high RAP content. *Construction and Building Materials*, 371, 130725. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130725>
- Araya-Letelier, G., Concha-Riedel, J., Antico, F. C., & Sandoval, C. (2019). Experimental mechanical-damage assessment of earthen mixes reinforced with micro polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 198, 762-776.
- Arianpour, A. Ç., & Arianpour, F. (2022). Characterization, technological properties, and ceramic applications of Kastamonu alluvial clays (Northern Turkey) in building materials. *Construction and Building Materials*, 356, 129304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129304>
- Arman, N. S. N., Chen, R. S., & Ahmad, S. (2021). Review of state-of-the-art studies on the water absorption capacity of agricultural fiber-reinforced polymer composites for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 302, 124174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124174>
- Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings*, 104, 139-146.
- Asli, M., Brachelet, F., Sassine, E., & Antczak, E. (2021). Thermal and hygroscopic study of hemp concrete in real ambient conditions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102612>
- ASTM C39/C39M. (2020). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM international. Repéré à https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0039_C0039M-20%7Cen-US
- ASTM C78/C78M. (2021). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. Dans *American society for testing and materials* (Vol. 100, pp. 19428-12959). Repéré à

https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0078_C0078M-22%7Cen-US

ASTM C157 / C157M-17. (2017a). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA*. Repéré à www.astm.org

ASTM C157 / C157M-17. (2017b). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017*.

ASTM C518-21. (2021). Standard Test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. *Annual book of ASTM Standards, 04.06, American Society for testing and material, 1916 Race Street, Philadelphia, PA, 16 p.* Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0518-21%7Cen-US>

ASTM C1498. (2016). Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials. ASTM International. *100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.* .

ASTM D2654-22. (2022). Standard Test Method for Moisture in Textile. ASTM; West Conshohocken, PA, USA. 10., 10 p doi: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20D2654&item_s_key=00016807

ASTM D2654-89a. (1989). Standard Test Method for Moisture in Textile. ASTM D2654–89a, ASTM; West Conshohocken, PA, USA. 10. Repéré à https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20D2654&item_s_key=00016807

ASTM D7984. (2021). Méthode d'essai standard pour la mesure de l'effusivité thermique des tissus à l'aide d'un instrument à source plane transitoire modifiée (MTPS). *ASTM International* 5 p. Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD7984-21%7Cen-US>

ASTM E96. (2017). *Standard test methods for water vapor transmission of materials*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States. Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0096-00%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true>

ASTMD2654-89a. (1989). Standard Test Method for Moisture in Textile. ASTM D2654–89a, ASTM; West Conshohocken, PA, USA. 10. Repéré à

https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20D2654&item_s_key=00016807

- ASTME96-95. (1995). *Standard test methods for water vapor transmission of materials*. ASTM committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Repéré à https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0096_E0096M-16%7Cen-US
- Atmaca, A., & Atmaca, N. (2022). Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey. *Journal of cleaner production*, 340, 130691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130691>
- Aubert, J.-E. (2013). Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées. *Institut National des sciences Appliquées-Université Paul SABATIER Toulouse III, Toulouse*, 15.
- Aubert, J.-E., Faria, P., Maillard, P., Ouedraogo, K. A. J., Ouellet-Plamondon, C., & Prud'homme, E. (2022). Characterization of Earth Used in Earth Construction Materials. Dans A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli & B. V. V. Reddy (Éds.), *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE* (pp. 17-81). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-83297-1_2. Repéré à https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_2
- Aubert, J.-E., Marcom, A., Oliva, P., & Segui, P. (2015). Chequered earth construction in south-western France. *Journal of Cultural Heritage*, 16(3), 293-298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.07.002>
- Avila, F., Puertas, E., & Gallego, R. (2021). Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review. *Construction and Building Materials*, 270, 121435. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435>
- Aymerich, F., Fenu, L., Francesconi, L., & Meloni, P. (2016). Fracture behaviour of a fibre reinforced earthen material under static and impact flexural loading. *Construction and Building Materials*, 109, 109-119.
- Azil, A., Le Guern, M., Touati, K., Sebaibi, N., Boutouil, M., Streiff, F., . . . Gomina, M. (2022). Earth construction: Field variabilities and laboratory reproducibility. *Construction and Building Materials*, 314, 125591.
- Azil, A., Touati, K., Sebaibi, N., Le Guern, M., Streiff, F., Goodhew, S., . . . Boutouil, M. (2023). Monitoring of drying kinetics evolution and hygrothermal properties of new earth-based materials using climatic chamber simulation. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01798.

- Bachar, M., Azzouz, L., Rabehi, M., & Mezghiche, B. (2015). Characterization of a stabilized earth concrete and the effect of incorporation of aggregates of cork on its thermo-mechanical properties: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*, 74, 259-267.
- Bah, E.-H. M., Faye, I., & Geh, Z. (2018a). *Housing market dynamics in Africa*. Springer Nature.
- Bah, E.-h. M., Faye, I., & Geh, Z. F. (2018b). *Housing market dynamics in Africa*. Springer Nature.
- Bal, H., Jannot, Y., Gaye, S., & Demeurie, F. (2013). Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium: Laterite based bricks with millet waste additive. *Construction and Building Materials*, 41, 586-593. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.032>
- Balo, F. (2015). Feasibility study of " green" insulation materials including tall oil: Environmental, economical and thermal properties *Energy and Buildings* 86 161-175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.027>
- Bart, M., Moissette, S., Ait Oumeziane, Y., & Lanos, C. (2014). Transient hygrothermal modelling of coated hemp-concrete walls. *European journal of environmental and civil engineering*, 18(8), 927-944. doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.911122>
- Bastien, D., Winther-Gaasvig, M., Zhang Andersson, J., Xiao, Z., & Ge, H. (2023). Hygrothermal performance of natural building materials: Simulations and field monitoring of a case study home made of wood fiber insulation and clay. *Journal of building physics*, 47(3), 249-283.
- Bekkouche, S., Benouaz, T., Cherier, M., Hamdani, M., Benamrane, N., & Yaiche, M. (2014). Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region. *Construction and Building Materials*, 52, 59-70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.052>
- Belabid, A., Akhzouz, H., Elminor, H., & Elminor, H. (2023). Characteristics of traditional building materials and techniques based on earth, stone and timber: An overview and focus on Morocco. *Journal of Engineering*, 10(3).
- Belabid, A., Elminor, H., & Akhzouz, H. (2022). Hybrid construction technology, towards a mix that satisfies the requirements of the 21st century: state of the art and future prospects. *Future Cities and Environment*, 8(1). doi: <https://doi.org/10.5334/fce.159>

- Belarbi, Y. E., Ferroukhi, M. Y., Issaadi, N., Poullain, P., & Bonnet, S. (2024). Assessment of hygrothermal performance of raw earth envelope at overall building scale. *Energy and Buildings*, 114119.
- Belloum, R., Agoudjil, B., Chennouf, N., & Boudenne, A. (2022). Hygrothermal performance assessment of a bio-based building made with date palm concrete walls. *Building and Environment*, 223, 109467. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109467>
- Bendouma, M. (2018a). *Systemes d'isolation thermique par l'exterieur : etudes experimentales et numeriques des transferts de chaleur et d'humidite* (Université de Bretagne Sud).
- Bendouma, M. (2018 b). *Systèmes d'isolation thermique par l'extérieur : études expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité* (Université de Bretagne Sud). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01975115>
- Benkhaled, M., Ouldboukhitine, S.-E., Bakkour, A., & Amziane, S. (2022). Sensitivity analysis of the parameters for assessing a hygrothermal transfer model HAM in bio-based hemp concrete material. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 132, 105884. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105884>
- Bennai, F. (2017). *Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé* (Université de La Rochelle). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01865834>
- Bennai, F., Ferroukhi, M. Y., Benmahiddine, F., Belarbi, R., & Nouviaire, A. (2022). Assessment of hygrothermal performance of hemp concrete compared to conventional building materials at overall building scale. *Construction and Building Materials*, 316, 126007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126007>
- Betené, A. D. O., Betené, F. E., Ngali, F. E., Noah, P. M. A., Ndiwé, B., Soppie, A. G., . . . Moukené, R. (2022). Influence of sampling area and extraction method on the thermal, physical and mechanical properties of Cameroonian Ananas comosus leaf fibers. *Heliyon*, 8(8), e10127. Repéré à [https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440\(22\)01415-3.pdf](https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(22)01415-3.pdf)
- Boffoue, M. O., Kouadio, K. C., Kouakou, C. H., Assande, A. A., Dauscher, A., Lenoir, B., & Emeruwa, E. (2015). Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 11(2), 35-43.
- Borderon, J., Cantin, R., & Virgone, J. (2008). Etude du comportement thermique dynamique de l'enveloppe non isolée du bâtiment : cas des murs inertes. Dans *proceeding of Conférence IBPSA France-Lyon* (pp. 8).

- Bothara, J., Ingham, J., & Dizhur, D. (2022). Qualifying the earthquake resilience of vernacular masonry buildings along the Himalayan arc. *Journal of Building Engineering*, 52, 104339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104339>
- Bouasker, M., Belayachi, N., Hoxha, D., & Al-Mukhtar, M. (2014). Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications. *Materials*, 7(4), 3034-3048. doi: <https://doi.org/10.3390/ma7043034>
- Bouasria, M., El Mendili, Y., Benzaama, M.-H., Pralong, V., Bardeau, J.-F., & Hennequart, F. (2021). Valorisation of stranded *Laminaria digitata* seaweed as an insulating earth material. *Construction and Building Materials*, 308, 125068.
- Bouckaert, S., Pales, A. F., McGlade, C., Remme, U., Wanner, B., Varro, L., . . . Spencer, T. (2021). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector.
- Bouhicha, M., Aouissi, F., & Kenai, S. (2005). Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and concrete composites*, 27(5), 617-621. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013>
- Boumediene, N., Collet, F., Prétot, S., & Elaoud, S. (2022). Hygrothermal Behavior of a Washing Fines–Hemp Wall under French and Tunisian Summer Climates: Experimental and Numerical Approach. *Materials*, 15(3), 1103. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15031103>
- Brial, V. (2022). *Étude de la valorisation des brasques traitées comme liants cimentaires* (École de technologie supérieure). Repéré à https://scholar.google.com/scholar?cluster=149252591732819069&hl=fr&as_sdt=0,5
- Bruno, A. W., & Gallipoli, D. (2016). *Hygro-mechanical characterisation of hypercompacted earth for building construction* (Université de Pau et des Pays de l'Adour-Laboratoire SIAME). Repéré à <https://univ-pau.hal.science/tel-02366888>
- Bühler, M. M., Hollenbach, P., Michalski, A., Meyer, S., Birle, E., Off, R., . . . Fritz, O. (2023). The Industrialisation of Sustainable Construction: A Transdisciplinary Approach to the Large-Scale Introduction of Compacted Mineral Mixtures (CMMs) into Building Construction. *Sustainability*, 15(13), 10677. doi: <https://doi.org/10.3390/su151310677>
- Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., & Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54, 163-169.
- Bui, R., Labat, M., & Aubert, J.-E. (2017). Comparison of the Saturated Salt Solution and the Dynamic Vapor Sorption techniques based on the measured sorption isotherm of barley straw. *Construction and Building Materials*, 141, 140-151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.005>

- Bunaciu, A. A., UdrișTioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), 289-299. doi: <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., & Fernández, A. I. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 536-542.
- Cabeza, L. F., Boquera, L., Chàfer, M., & Várez, D. (2021). Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis. *Energy and Buildings*, 231, 110612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110612>
- Cagnon, H., Aubert, J.-E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>
- CAHF, C. f. A. H. F. i. A. (2017). Financement du logement en Afrique : Examen des marchés de financement de certains pays d'Afrique 290. Repéré à www.housingfinanceafrica.org
- CAN/BNQ-2501-090. (2011). *Sols - Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande et de la limite de plasticité*.
- CAN/ULC S135. (2020). Commission Canadienne des Codes national du bâtiment et de Prévention des Incendies du Canada (CNB) *Volume 1*, 1623.
- Cérézo, V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique* (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon). (2005ISAL0037).
- Chabaud, C. (2015). Les filières lin et chanvre au cœur des enjeux des matériaux biosourcés émergents. *Journal Officiel de la République Française*, 16.
- Chabriac, P.-A. (2014). *Mesure du comportement hygrothermique du pisé* (ENTPE; CNRS-LTDS (UMR 5513)).
- Chakchouk, A., Samet, B., & Mnif, T. (2006). Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science*, 33(2), 79-88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.03.009>
- Charai, M., Mezrhab, A., & Moga, L. (2022). A structural wall incorporating biosourced earth for summer thermal comfort improvement: Hygrothermal characterization and building

- simulation using calibrated PMV-PPD model. *Building and Environment*, 212, 108842. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108842>
- Charai, M., Salhi, M., Horma, O., Mezrhab, A., Karkri, M., & Amraqui, S. (2022). Thermal and mechanical characterization of adobes bio-sourced with Pennisetum setaceum fibers and an application for modern buildings. *Construction and Building Materials*, 326, 126809. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126809>
- Charai, M., Sghiouri, H., Mezrhab, A., Karkri, M., Elhammouti, K., & Nasri, H. (2020). Thermal performance and characterization of a sawdust-clay composite material. *Procedia Manufacturing*, 46, 690-697.
- Chbani Idrissi, Y., Belarbi, R., Allam, R., Feddaoui, M. B., Bennai, F., & Agliz, D. (2021). Experimental and numerical validation of hygrothermal transfer in brick wall. *Heat Transfer*, 50(6), 6300-6327. doi: <https://doi.org/10.1002/htj.22173>
- Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2011). Investigation on strength of fiber reinforced clay. Dans *Advanced Materials Research* (Vol. 261, pp. 957-963). Trans Tech Publ.
- Chen, C., Zhou, Y., Xie, W., Meng, T., Zhao, X., Pang, Z., . . . Yang, V. (2023). Lightweight, thermally insulating, fire-proof graphite-cellulose foam. *Advanced Functional Materials*, 33(6), 2204219. doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202204219>
- Chinnasamy, Y., Joanna, P. S., Kothanda, K., Gurupatham, B. G. A., & Roy, K. (2022). Behavior of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Polymer Beam-Columns Infilled with Engineered Cementitious Composites under Cyclic Loading. *Journal of Composites Science*, 6(11), 338. doi: <https://doi.org/10.3390/jcs6110338>
- Colinart, T., Bendouma, M., & Glouannec, P. (2019). Simulation du comportement hygrothermique d'une façade opaque ventilée de bâtiment. Dans *Congrès SFT*. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/334202332>
- Colinart, T., Bendouma, M., & Glouannec, P. (2019). Simulation du comportement hygrothermique d'une façade opaque ventilée de bâtiment. Dans *Congrès SFT*.
- Colinart, T., Lelièvre, D., & Glouannec, P. (2016). Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall. *Energy and Buildings*, 112, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.027>
- Collet, F., & Pretot, S. (2012). Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 36, 58-65.
- Collet, F., Serres, L., Miriel, J., & Bart, M. (2006). Study of thermal behaviour of clay wall facing south. *Building and Environment*, 41(3), 307-315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.024>

- Commission de Coopération Environnementale. (2013). Le bâtiment écologique en Amérique du Nord : Débouchés et Défis. 80. Repéré à <http://www.cec.org/files/documents/publications/2335-green-building-in-north-america-opportunities-and-challenges-fr.pdf>
- Cuitiño Rosales, M. G., Maldonado, N. G., & Esteves Miramont, A. (2014). Analysis of the Mechanical Behavior of Prefabricated Wattle and Daub Walls. doi: <http://dx.doi.org/10.7492/IJAEC.2014.019>
- D854-14, A. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnomete*. ASTM international, 100Barr Harbor Orive, PO Box C700, West Conshohocken.
- D2654-22, A. (2022). Standard Test Method for Moisture in Textile. ASTM; West Conshohocken, PA, USA. 10. *ASTM International*, 10 p. doi : https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20D2654&item_s_key=00016807
- Dallel, M. (2012). *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil* (Université de Haute Alsace-Mulhouse). Repéré à <https://theses.hal.science/tel-00844129/>
- Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101, 797-809.
- Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J.-E., & Gomina, M. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials*, 158, 84-96.
- De Mets, T., Tilmans, A., & Loncour, X. (2017). Hygrothermal assessment of internal insulation systems of brick walls through numerical simulation and full-scale laboratory testing. *Energy Procedia*, 132, 753-758. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.022>
- Defo, M., Lacasse, M., & Laouadi, A. (2022). A comparison of hygrothermal simulation results derived from four simulation tools. *Journal of building physics*, 45(4), 432-456.
- Dejeant, F., Garnier, P., & Joffroy, T. (2021). *Matériaux locaux, matériaux d'avenir*. CRAterre. Repéré à <https://hal.science/hal-03293589>
- Delgado-Sanchez, C., Santiago-Medina, F., Fierro, V., Pizzi, A., & Celzard, A. (2018). Optimisation of “green” tannin-furanic foams for thermal insulation by experimental

design. *Materials & Design*, 139, 7-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.064>

Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of cleaner production*, 142, 3655-3664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>

Di Bella, G., Fiore, V., Galtieri, G., Borsellino, C., & Valenza, A. (2014). Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene). *Construction and Building Materials*, 58, 159-165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.026>

Dick, K., & Krahn, T. (2015). Preparing regulatory challenges and opportunities for small to medium residential scale stabilized rammed earth buildings in Canada. *Rammed Earth Construction*, D. Ciancio, C. Beckett (Eds.), 93-96.

Douzane, O., Promis, G., Roucoult, J.-M., Le, A.-D. T., & Langlet, T. (2016). Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations. *Journal of Building Engineering*, 8, 91-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.10.002>

Dubois, S., Evrard, A., & Lebeau, F. (2014). Modeling the hygrothermal behavior of biobased construction materials. *Journal of building physics*, 38(3), 191-213.

Dubois, S., & Lebeau, F. (2014). Impact des matériaux biosourcés sur le climat intérieur : Un outil de calcul flexible à l'échelle de la pièce. Dans *Ecobat Sciences et Techniques*. doi : <https://hdl.handle.net/2268/164979>

Dubois, S., McGregor, F., Evrard, A., Heath, A., & Lebeau, F. (2014). An inverse modelling approach to estimate the hygric parameters of clay-based masonry during a Moisture Buffer Value test. *Building and Environment*, 81, 192-203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.018>

El-Mahdy, D., Gabr, H. S., & Abdelmohsen, S. (2021). SaltBlock as a 3D printed sustainable construction material in hot arid climates. *Journal of Building Engineering*, 43, 103134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103134>

El Azhary, K., Chihab, Y., Mansour, M., Laaroussi, N., & Garoum, M. (2017). Energy efficiency and thermal properties of the composite material clay-straw. *Energy Procedia*, 141, 160-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.030>

EN ISO 15148. (2016). Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment — Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle. *International standard*, 10 p.

- Environment and International Energy Agency. (2017). Global Status Report 2017, Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. Global Alliance for Buildings and Construction. *International Energy Agency secure Sustainable Together*, P. 47. Repéré à https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf
- Epp, J. (2016). X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. Dans *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods* (pp. 81-124). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00004-3>
- Evangelisti, L., Guattari, C., & Asdrubali, F. (2019). On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review. *Energy and Buildings*, 183, 607-625.
- Fabbri, A., Aubert, J.-E., Jean-claude, M., Quoc-Bao, B., Domenico, G., & Venkatarama, R. (2022). *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE*. Springer Nature.
- Fabbri, A., Morel, J.-C., Aubert, J.-E., Bui, Q.-B., Gallipoli, D., & Reddy, B. V. (2021). Testing and Characterisation of Earth-Based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>
- Falana, J., Osei-Kyei, R., & Tam, V. W. (2024). Towards achieving a net zero carbon building: A review of key stakeholders and their roles in net zero carbon building whole life cycle. *Journal of Building Engineering*, 108223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108223>
- Fang, A., Chen, Y., & Wu, L. (2021). Modeling and numerical investigation for hygrothermal behavior of porous building envelope subjected to the wind driven rain. *Energy and Buildings*, 231, 110572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110572>
- Farouk, S., El-Desoky, H., Heikal, M., El-Mahallawy, M., & Wahid, A. (2020). Egyptian Cretaceous clay deposits: Insights on Mineralogy, Geochemistry, and Industrial uses. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(13), 1-22. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05557-7>
- Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R., & Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of cleaner production*, 241, 118286.
- Fontaine, L., Anger, R., Doat, P., Van Damme, H., & Houben, H. (2017). *de la source Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. distributeur Belin; Cité des sciences et de l'industrie.

- Fouchal, F., Gouny, F., Maillard, P., Ulmet, L., & Rossignol, S. (2015). Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame. *Building and Environment*, 87, 234-243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.036>.
- François, S., Radanne, P., & Diaz, E. (2012). NECTAR :Étude sur les bâtiments pour les négociations sur le changement climatique dans le cadre du régime post 2012. *Organisation internationale de la francophonie*, pp.27.
- Gallaud, D., & Laperche, B. (2016). *Économie circulaire et développement durable : écologie industrielle et circuits courts* (Vol. 5). ISTE Group.
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., Corrêa, A. A. R., Rodrigues, M. C., & Mendes, R. F. (2019). Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Construction and Building Materials*, 222, 168-182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>
- Gao, Q., Wu, T., Liu, L., Yao, Y., & Jiang, B. (2022). Prediction of wall and indoor hygrothermal properties of rammed earth folk house in Northwest Sichuan. *Energies*, 15(5), 1936. doi: <https://doi.org/10.3390/en15051936>
- Gerlich, V., Sulovská, K., & Zálešák, M. (2013). COMSOL Multiphysics validation as simulation software for heat transfer calculation in buildings: Building simulation software validation. *Measurement*, 46(6), 2003-2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.02.020>
- Giada, G., Caponetto, R., & Nocera, F. (2019). Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review. *Sustainability*, 11(19), 5342. doi: <https://doi.org/10.3390/su11195342>
- Giroudon, M., Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., & Magniont, C. (2019). Comparison of barley and lavender straws as bioaggregates in earth bricks. *Construction and Building Materials*, 202, 254-265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.126>
- Giuffrida, G., Caponetto, R., & Cuomo, M. (2019). An overview on contemporary rammed earth buildings: technological advances in production, construction and material characterization. Dans *IOP conference series: Earth and Environmental Science* (Vol. 296, pp. 012018). IOP Publishing. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012018>
- Giuffrida, G., Ibos, L., Boudenne, A., & Allam, H. (2024). Exploring the integration of bio-based thermal insulations in compressed earth blocks walls. *Construction and Building Materials*, 418, 135412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135412>

- Goffart, J., Rabouille, M., & Mendes, N. (2017). Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate. *Journal of Building Performance Simulation*, 10(1), 37-57. doi: <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1112430>
- Gomaa, M., Carfrae, J., Goodhew, S., Jabi, W., & Veliz Reyes, A. (2019). Thermal performance exploration of 3D printed cob. *Architectural Science Review*, 62(3), 230-237. doi: <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1606776>
- Gomaa, M., Schade, S., Bao, D. W., & Xie, Y. M. (2023). Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect. *Journal of cleaner production*, 398, 136569. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>
- Gomaa, M., Vaculik, J., Soebarto, V., Griffith, M., & Jabi, W. (2021). Feasibility of 3DP cob walls under compression loads in low-rise construction. *Construction and Building Materials*, 301, 124079. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124079>
- Gómez, I., Guths, S., Souza, R., Millan, J., Martín, K., & Sala, J. (2011). Moisture buffering performance of a new pozolanic ceramic material: Influence of the film layer resistance. *Energy and Buildings*, 43(4), 873-878. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.007>
- Gonzalez-Lopez, L., Claramunt, J., Haurie, L., Ventura, H., & Ardanuy, M. (2021). Study of the fire and thermal behaviour of façade panels made of natural fibre-reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 302, 124195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124195>
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, 8, 626-637. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.280>
- Goodhew, S., Boutouil, M., Streiff, F., Le Guern, M., Carfrae, J., & Fox, M. (2021). Improving the thermal performance of earthen walls to satisfy current building regulations. *Energy and Buildings*, 240, 110873.
- Gounni, A., & Louahlia, H. (2019). Thermal performance analysis of a residential house equipped with Phase Change Material. Dans *E3S Web of Conferences* (Vol. 128, pp. 05004). EDP Sciences. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912805004>
- Gounni, A., & Louahlia, H. (2020). Dynamic behavior and economic analysis of sustainable building integrating cob and phase change materials. *Construction and Building Materials*, 262, 12. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120795

- Gounni, A., & Louahlia, H. (2020). Dynamic behavior and economic analysis of sustainable building integrating cob and phase change materials. *Construction and Building Materials*, 262, 120795. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120795>
- Grimard, C., Lapalme, V., Wagner-Lapierre, S., & Blank, S. (2024). The Well-Being of People Experiencing Homelessness: Sharing Space Examined Through the Lenses of Architecture and Social Work. *International Journal on Homelessness*, 4(1).
- Guizzardi, M., Derome, D., & Carmeliet, J. (2016). Water uptake in clay brick at different temperatures: experiments and numerical simulations. *Journal of building physics*, 39(4), 373-389.
- Gupta, R., Burrell, B., Garg, M., Gupta, A., Krayenhoff, M., & Krayenhoff, J. (2021). Historical Development of Rammed Earth Construction and Its Use in Canada. Dans *Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference* (pp. 327-341). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-0503-2_27
- Haddad, K., Lannon, S., & Latif, E. (2024). Investigation of Cob construction: Review of mix designs, structural characteristics, and hygrothermal behaviour. *Journal of Building Engineering*, 108959.
- Hakkoum, S., Kriker, A., & Mekhermeche, A. (2017). Thermal characteristics of Model houses Manufactured by date palm fiber reinforced earth bricks in desert regions of Ouargla Algeria. *Energy Procedia*, 119, 662-669.
- Hall, M., & Swaney, W. (2012). European modern earth construction. Dans *Modern Earth Buildings* (pp. 650-687). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096166.5.650>
- Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., & Morel, J.-C. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment*, 106, 103-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>
- Hamid, A. A., & Wallentén, P. (2017). Hygrothermal assessment of internally added thermal insulation on external brick walls in Swedish multifamily buildings. *Building and Environment*, 123, 351-362.
- Hammiche, D., Boukerrou, A., Djidjelli, H., Kervoëlen, A., & Grohens, Y. (2015). Etude des Propriétés Physico-chimiques, Thermiques et Mécaniques des Fibres d'Alfa Grasses. *Revue des Composites et des Matériaux avancés. J. compost. Adv. Mat*, 25, 7-24.
- Hamza, S., Saad, H., Charrier, B., Ayed, N., & Charrier-El Bouhtoury, F. (2013). Physico-chemical characterization of Tunisian plant fibers and its utilization as reinforcement for plaster based composites. *Industrial Crops and Products*, 49, 357-365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.052>

- Hema, C., Messan, A., Lawane, A., Soro, D., Nshimiyimana, P., & Van Moeseke, G. (2021). Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: An experimental investigation. *Journal of Building Engineering*, 38, 102148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102148>
- Himouri, K., Hamouine, A., & Guettatfi, L. (2023). Compressive Creep and Ultrasonic Characterization of Adobe Bricks Stabilized with Quicklime, Portland Cement, and Date Palm Fibers. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-20.
- Ho Thi, T. N. (2008). *Étude de l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco* (École de technologie supérieure). Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/128>
- Holm, D., & Engelbrecht, F. (2005). Practical choice of thermal comfort scale and range in naturally ventilated buildings in South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering= Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese*, 47(2), 9-14.
- Hu, X., Xie, L., Chen, Z., Lei, P., Chen, H., & Tan, T. (2023). Study on the uniaxial compression constitutive relationship of modified yellow mud from minority dwelling in western Sichuan, China. *Reviews on Advanced Materials Science*, 62(1), 20220291.
- Huang, H., Wu, Y., Li, Z., Sun, Z., & Chen, Z. (2018). Seismic behavior of Chuan-Dou type timber frames. *Engineering Structures*, 167, 725-739. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.072>
- Ibrahim, M., Bianco, L., Ibrahim, O., & Wurtz, E. (2018). Low-emissivity coating coupled with aerogel-based plaster for walls' internal surface application in buildings: energy saving potential based on thermal comfort assessment. *Journal of Building Engineering*, 18, 454-466.
- Ige, O., & Danso, H. (2021). Physico-mechanical and thermal gravimetric analysis of adobe masonry units reinforced with plantain pseudo-stem fibres for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 273, 121686.
- Ikelle, I. I., & Ivoms, O. S. P. (2014). Determination of the heating ability of coal and corn cob briquettes. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 7(2), 77-82.
- ISO 5660. (2015). *Reaction-to-fire tests : Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1, Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement) Essais de réaction au feu : débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse - Partie 1, Lignes directrices relatives au mesurage* (Third edition éd.). Geneva, Sitzerland : ISO.

- ISO 12571. (2021). 12571–Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment–Détermination des propriétés de sorption hygroscopique. *22p Troisième édition : Octobre*.
- ISO 15148. (2002). Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water absorption coefficient by partial immersion 11p. Repéré à <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5ab182e2-a7ad-428c-87e1-40fe97b42300/iso-15148-2002>
- Jannat, N., Hussien, A., Abdullah, B., & Cotgrave, A. (2020). Application of agro and non-agro waste materials for unfired earth blocks construction: A review. *Construction and Building Materials*, *254*, 119346.
- Jiang, B., Wu, T., Xia, W., & Liang, J. (2020). Hygrothermal performance of rammed earth wall in Tibetan Autonomous Prefecture in Sichuan Province of China. *Building and Environment*, *181*, 107128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107128>
- Kabore, A. (2020). *Modélisation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment avec le matériau de chanvre* (École de technologie supérieure).
- Kabore, A., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2024). Improved insulation with fibres in heavy cob for building walls. *Industrial Crops and Products*, *215*, 118626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118626>
- Kabore, A., Laghdir, A., & Ouellet-Plamondon, C. (2024). Natural thermal and hygrothermal regulation with heavy cob for low carbon construction. *Construction and Building Materials*, *451*, 138832. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138832>
- Kaboré, A., Maref, W., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2024). Hygrothermal Performance of the Hemp Concrete Building Envelope. *Energies*, *17*(7), 1740. doi: <https://doi.org/10.3390/en17071740>. Repéré à <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/7/1740>
- Kabore, A., Maref, W., & Ouellet-Plamondon, C. (2021). Hygrothermal performance of the building envelope with low environmental impact: case of a hemp concrete envelope. Dans *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2069, pp. 012006). IOP Publishing. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012006>
- Kaboré, A., & Ouellet-Plamondon, C. (2021). Characterization of the clay and fibres for hygrothermal modelling. Dans *Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference* (pp. 345-356). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-1004-3_29
- Kabore, A., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2024a). The impact of vegetable fibres on the shrinkage and mechanical properties of cob materials. *Materials*, *17*(3), 736.

- Kabore, A., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2024b). Improved insulation with fibres in heavy cob for building walls. *Industrial Crops and Products*, 215, 118626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118626>
- Kadir, A. A., Mohajerani, A., Roddick, F., & Buckeridge, J. (2009). Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light-weight fired clay bricks incorporating cigarette butts. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 53, 1035-1040.
- Kagonbé, B., Tsozué, D., Nzeukou, A., & Ngos III, S. (2021). Mineralogical, Geochemical and Physico-Chemical Characterization of Clay Raw Materials from Three Clay Deposits in Northern Cameroon. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9(6), 86-99. doi: <https://doi.org/10.4236/gep.2021.96005>
- Kang, Y., Jo, H. H., Yang, S., Wi, S., & Kim, S. (2022). Numerical evaluation of indoor hygrothermal behavior with heat and moisture transfer in walls by analytical conditions. *Applied Thermal Engineering*, 216, 119150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119150>
- Keefe, L. (2012). *Earth building: methods and materials, repair and conservation*. Routledge.
- Khaled, S., Collet, F., Prétot, S., & Bart, M. (2023). Effect of Air Velocity and Initial Conditioning on the Moisture Buffer Value of Four Different Building Materials. *Materials*, 16(8), 3284. doi: <https://doi.org/10.3390/ma16083284>
- Khoshnava, S. M., Rostami, R., Mohamad Zin, R., Štreimikienė, D., Mardani, A., & Ismail, M. (2020). The role of green building materials in reducing environmental and human health impacts. *International journal of environmental research and public health*, 17(7), 2589. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17072589>
- Khoudja, D., Taallah, B., Izemmouren, O., Aggoun, S., Herihiri, O., & Guettala, A. (2021). Mechanical and thermophysical properties of raw earth bricks incorporating date palm waste. *Construction and Building Materials*, 270, 121824.
- Kittiworrawatt, S., & Devahastin, S. (2009). Improvement of a mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial. *Chemical Engineering Science*, 64(11), 2644-2650. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.02.036>
- Krahn, T. J., & Dick, K. J. (2019). Engineering design of rammed earth in Canada. *Earthen dwellings and structures: current status in their adoption*, 449-455. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5883-8_38
- Kreiger, B. K., & Srubar III, W. V. (2019). Moisture buffering in buildings: A review of experimental and numerical methods. *Energy and Buildings*, 202, 109394.

- Kumar, A., Walia, B. S., & Mohan, J. (2006). Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials*, 20(10), 1063-1068.
- Künzel, H., Holm, A., Zirkelbach, D., & Karagiozis, A. (2005). Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy*, 78(4), 554-561. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.002>
- Künzel, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. *One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB-Verlag Stuttgart, 65.
- Künzel, H. M., & Germany, F. I. (2012a). Modeling Air Leakage in Hygrothermal Envelope Simulation. Dans *Building Enclosure Science & Technology (BEST3) Conference, Atlanta, USA*.
- Künzel, H. M., & Germany, F. I. (2012b). Modeling Air Leakage in Hygrothermal Envelope Simulation. Dans *BEST 3 Conference Atlanta* (pp. 26).
- Laaroussi, N., Lauriat, G., Garoum, M., Cherki, A., & Jannot, Y. (2014). Measurement of thermal properties of brick materials based on clay mixtures. *Construction and Building Materials*, 70, 351-361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.104>
- Labat, M., Magniont, C., Oudhof, N., & Aubert, J.-E. (2016). From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Building and Environment*, 97, 69-81.
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Maillard, P., & Poirier, C. (2017). Effect of plant aggregates on mechanical properties of earth bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(12), 04017244. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000209](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000209)
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719-734.
- Laborel-Préneron, A., Magniont, C., & Aubert, J.-E. (2018). Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy and Buildings*, 178, 265-278.
- Lahbabi, S., Bouferra, R., Saadi, L., & Khalil, A. (2024). Study of the physicochemical, mineralogical, and geotechnical properties of clayey soils to improve the durability of eco-construction materials in the rural region. *Construction and Building Materials*, 411, 134304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134304>

- Laibi, A. B., Poullain, P., Leklou, N., Gomina, M., & Sohounhloué, D. K. (2018). Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of Compressed Earth Blocks (CEB). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 785-793.
- Lalicata, L. M., Bruno, A. W., & Gallipoli, D. (2023). Hygro-thermal coupling in earth building materials. Dans *E3S Web of Conferences* (Vol. 382, pp. 23003). EDP Sciences. doi : <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338223003>
- Lamalle, M. (2016). *Bloc de béton de bois, une alternative au bloc traditionnel?—Étude des caractéristiques mécaniques, thermiques et écologiques d'un bloc de coffrage en béton de bois.* (1283).
- Lamrani Alaoui, A., Amrani, A.-i., Alami Merrouni, A., Daoudia, A., El Hassouani, Y., Chaabelasri, E., & Halimi, M. (2022). Assessing the Thermal Performance of Traditional and Modern Building Materials for Hot and Arid Climate. Case Study: Er-Rachidia, Morocco. Dans *International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy Systems* (pp. 719-726). Springer.
- Laou, L. (2017a). *Evaluation du comportement mécanique sous sollicitations thermohydriques d'un mur multimatériaux (bois, terre crue, liants minéraux) lors de sa construction et de son utilisation* (Université de Limoges).
- Laou, L. (2017 b). *Evaluation du comportement mécanique sous sollicitations thermohydriques d'un mur multimatériaux (bois, terre crue, liants minéraux) lors de sa construction et de son utilisation* (Université de Limoges).
- Laou, L., Ulmet, L., Yotte, S., Aubert, J.-E., & Maillard, P. (2023). Simulation of the Hygro-Thermo-Mechanical Behavior of Earth Brick Walls in Their Environment. *Buildings*, 13(12), 3061. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13123061>
- Le, A. D. T. (2010). *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous titre : simulation numérique et approche expérimentale)* (Université de Reims-Champagne Ardenne).
- Lelièvre, D. (2015). *Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés* (Lorient).
- Lelievre, D., Colinart, T., & Glouannec, P. (2014). Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses. *Energy and Buildings*, 84, 617-627. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>
- Lertwattananaruk, P., & Choksiriwanna, J. (2011). The physical and thermal properties of adobe brick containing bagasse for earth construction. *International Journal of Building*,

Urban, Interior and Landscape Technology (BUILT), 1, 57-66. doi: <https://doi.org/10.56261/built.v1.170319>

- Limami, H., Manssouri, I., Noureddine, O., Erba, S., Sahbi, H., & Khaldoun, A. (2023). Thermal study of clay bricks reinforced by dry-grass fibers. *Journal of Energy Engineering*, 149(1), 04022052. doi: <https://doi.org/10.1061/JLEED9.EYENG-4613>
- Liuzzi, S., Rubino, C., & Stefanizzi, P. (2017). Use of clay and olive pruning waste for building materials with high hygrothermal performances. *Energy procedia*, 126, 234-241.
- Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., Petrella, A., Boghetich, A., Casavola, C., & Pappalettera, G. (2018). Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. *Construction and Building Materials*, 158, 24-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817320445>
- Maia, J., Pedroso, M., Ramos, N., Pereira, P., Flores-Colen, I., Gomes, M. G., & Silva, L. (2021). Hygrothermal performance of a new thermal aerogel-based render under distinct climatic conditions. *Energy and Buildings*, 243, 111001.
- Maia, J., Ramos, N. M., & Veiga, R. (2018). Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems. *Building and Environment*, 144, 437-449.
- Maillard, P., & Aubert, J.-E. (2014). Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials*, 63, 56-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.001>
- Majale, M., Tipple, G., & French, M. (2011). Affordable land and housing in Africa. *United Nations Human Settlements Programme*, 3, 101. Repéré à <http://www.unhabitat.org>
- Makomra, V., Tapsia, L. K., Ndiwe, B., Kaoutoing, M. D., Konai, N., Njom, A., . . . Raidandi, D. (2022). Physico-Mechanical Properties of Bio-Based Bricks. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 10(4), 16-29.
- Maniatidis, V., & Walker, P. (2003). A review of rammed earth construction for DTi partners in innovation project. *Natural building technology group, University of Bath*, 118. Repéré à <https://people.bath.ac.uk/abspw/rammedearth/review.pdf>
- Mansour, M. B., Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 44-51.
- Maskell, D., Thomson, A., Walker, P., & Lemke, M. (2018). Determination of optimal plaster thickness for moisture buffering of indoor air. *Building and Environment*, 130, 143-150.

- Mayandi, K., Rajini, N., Pitchipoo, P., Sreenivasan, V., Jappes, J. W., & Alavudeen, A. (2015). A comparative study on characterisations of *Cissus quadrangularis* and *Phoenix reclinata* natural fibres. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(4), 269-280. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684415570045>
- McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment*, 75, 11-18. doi: <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00035>
- McGregor, F., Heath, A., Maskell, D., Fabbri, A., & Morel, J.-C. (2016). A review on the buffering capacity of earth building materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 169(5), 241-251. doi: <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00035>
- McGregor, F., Heath, A., Shea, A., & Lawrence, M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82, 599-607. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>
- Medjelekh, D. (2015a). *Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscopiques* (Université de Limoges).
- Medjelekh, D. (2015 b). *Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscopiques* (Université de Limoges).
- Mellaikhafi, A., Ouakarrouch, M., Benallel, A., Tilioua, A., Ettakni, M., Babaoui, A., . . . Hamdi, M. A. A. (2021). Characterization and thermal performance assessment of earthen adobes and walls additive with different date palm fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00693.
- Mendonca, P., & Vieira, C. (2022). Embodied carbon and economic cost analysis of a contemporary house design using local and reused materials. *Sustainable Futures*, 4, 100100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100100>
- Meng, B., Xiong, Y., Zhong, W., Duan, S., & Li, H. (2023). Progressive collapse behaviour of composite substructure with large rectangular beam-web openings. *Engineering Structures*, 295, 116861. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116861>
- Mesa, A., & Arengi, A. (2019). Hygrothermal behaviour of straw bale walls: experimental tests and numerical analyses. *Sustainable Buildings*, 4. Repéré à <https://hdl.handle.net/11379/524968>
- Meyer, E. (2010a). Temperature stability of traditional and low-cost modern housing in the Eastern Cape, South Africa. 13.

- Meyer, E. (2010b). Temperature stability of traditional and low-cost modern housing in the Eastern Cape, South Africa. 13p. doi: <https://doi.org/10.1177/1744259106065674>
- Miccoli, L., Müller, U., & Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61, 327-339.
- Millogo, Y., Morel, J.-C., Aubert, J.-E., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71-78.
- Ministères Territoriales Écologie Logement. (2020). Matériaux de construction biosourcés et géosourcés. Repéré à https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/les_materiaux_de_construction_biosources_geosources.pdf
- Mohana Krishnudu, D., Sreeramulu, D., & Reddy, P. V. (2020). Alkali treatment effect: Mechanical, thermal, morphological, and spectroscopy studies on abutilon indicum fiber-reinforced composites. *Journal of Natural Fibers*, 17(12), 1775-1784.
- Moudjari, M., Marouf, H., Muhamad, H., Chaalal, O., Mequignon, M., Maherzi, W., & Benzerzour, M. (2021). Using local materials to optimize the eco-design of a resilient urban environment in sustainable urban project process.
- Moujalled, B., Oumeziane, Y. A., Moissette, S., Bart, M., Lanos, C., & Samri, D. (2018). Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study. *Building and Environment*, 136, 11-27.
- Muazu, A. G., & Alibaba, H. Z. (2017a). The use of traditional building materials in modern methods of construction (a case study of northern Nigeria). *International Journal of Engineering Science Technology and Research*, 2(6), 30-40.
- Muazu, A. G., & Alibaba, H. Z. (2017b). The use of Traditional Building Materials in Modern Methods of Construction (A Case Study of Northern Nigeria). *International Journal of Engineering Science Technology and Research*, 2(6), 30-40.
- Muñoz, P., Letelier, V., Muñoz, L., & Zamora, D. (2021). Assessment of technological performance of extruded earth block by adding bottom biomass ashes. *Journal of Building Engineering*, 39, 102278.
- Myint, N. N., & Shafique, M. (2024). Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03024.

- Navi, P., & Frederic, H. (2005). *Comportement Thermo-Hydrromécanique du bois: Applications technologiques et dans les structures* (Universitaires romandes).
- Nelson, A. P. (2020). *Etude de matériaux biosourcés pour l'isolation thermique des bâtiments en climat tropical humide* (Antilles). Repéré à <https://theses.fr/2020ANTI0517>
- NF ISO 5017. (2013). Dense-shaped refractory products - Determination of bulk density, apparent porosity and true porosity, NF ISO 5017. Repéré à <https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Notice/1400375?directFromSearch=true>.
- Nguyen, Q., Ngo, T., Tran, P., Mendis, P., Zobec, M., & Aye, L. (2016). Fire performance of prefabricated modular units using organoclay/glass fibre reinforced polymer composite. *Construction and Building Materials*, 129, 204-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.100>
- O'Farrell, M., Wild, S., & Sabir, B. (2001). Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar. *Cement and concrete composites*, 23(1), 81-91. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00070-6)
- Olivier, M., & Mesbah, A. (2016). Construction en terre, focus sur la fabrication et la construction en blocs de terre compressée. 88. Repéré à http://www.guyane.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/7-construction_durable_techniques-terre-detaillees.pdf
- Openweather. (s.d). Current & Forecast weather data collection. Repéré à <https://openweathermap.org/api>
- Ouakarrouch, M., El Azhary, K., Mansour, M., Laaroussi, N., & Garoum, M. (2020). Thermal study of clay bricks reinforced by sisal-fibers used in construction in South of Morocco. *Energy Reports*, 6, 81-88.
- Ouattara, S., Boffoue, M. O., Assande, A. A., & Kouadio, K. C. (2016). Use of Vegetable Fibers as Reinforcement in the Structure of Compressed Ground Bricks: Influence of Sawdust on the Rheological Properties of Compressed. *American Journal of Materials Science and Engineering*, 4(1), 13-19. doi: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1057.3575&rep=rep1&type=pdf>
- Ouedraogo, B., Palm, K., Ouedraogo, E., Bathiebo, D. J., & Kam, S. (2016). Experimental Study of Thermophysical and Mechanical Properties of Refractory Clay Tilled into Straw-fiber Stabilized Blocks. *Physical Science International Journal*, 8. doi: 10.9734/PSIJ/2016/29586. Repéré à <https://journalpsij.com/index.php/PSIJ/article/view/24204/45244>

- Ouedraogo, K. A. J. (2019). *Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux* (Université Paul Sabatier-Toulouse III). Repéré à <https://theses.hal.science/tel-02628530/#:~:text=https%3A//theses.hal.science/tel%2D02628530>
- Ouedraogo, K. A. J., Aubert, J.-E., Tribout, C., & Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236, 117578.
- Ouellet-Plamondon, C., & Kabore, A. (2023). Hygrothermal Measurement of Heavy Cob Materials. Dans *International RILEM Conference on Synergising expertise towards sustainability and robustness of CBMs and concrete structures* (pp. 1243-1252). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_111
- Ouellet-Plamondon, C., & Kabore, A. (2023). Hygrothermal Measurement of Heavy Cob Materials. Dans (pp. 1243-1252). Springer Nature Switzerland. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_111
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512-519.
- Palumbo, M., McGregor, F., Heath, A., & Walker, P. (2016). The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plasters. *Building and Environment*, 105, 245-252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.004>
- Pan, Y., Ventura, C. E., & Tannert, T. (2020). Damage index fragility assessment of low-rise light-frame wood buildings under long duration subduction earthquakes. *Structural Safety*, 84, 101940. doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.101940>
- Paquet, L. (2020). *Enhancing mechanical properties of CEB (compressed earth blocks) with natural fibres* (Architectural Engineering).
- Park, J. H., Kim, Y. U., Jeon, J., Yun, B. Y., Kang, Y., & Kim, S. (2021). Analysis of biochar-mortar composite as a humidity control material to improve the building energy and hygrothermal performance. *Science of The Total Environment*, 775, 145552. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145552>
- Patenaude, M. (2010). Évaluation environnementale de systèmes de construction de cloisons résidentielles : réflexions sur l'adaptabilité et la flexibilité.
- Patrick Brisebois, Meriam Aouinti, Maziar Jafari, Mohamed Siaj, & Claudiane Ouellet-Plamondon. (2024). Adsorption Dynamics of Disodium Octaborate Tetrahydrate on Clay Minerals: Implications for Construction Wood Protection. doi: <https://doi.org/10.1002/smt.202400753>

- Paulus, J. (2015a). *Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales- application à un cas pratique : Ouagadougou* (Université de Liège). Repéré à <https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2355/1/TFE%20Jehanne%20Paulus.pdf>
- Paulus, J. (2015 b). *Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales-Application à un cas pratique : Ouagadougou. Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées, 227.*
- Phung, T. A. (2018). *Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge* (Normandie Université). Repéré à <https://theses.hal.science/tel-01938827>
- Phung, T. A., Guern, M. L., Boutouil, M., & Louahia, H. (2019). Hygrothermal behaviour of cob material. Dans *Earthen Dwellings and Structures* (pp. 345-356). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5883-8_30
- Přikryl, R., Török, Á., Theodoridou, M., Gomez-Heras, M., & Miskovsky, K. (2016). Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society. *Special Publications, 416*(1), 1-22. doi: <https://doi.org/10.1144/SP416.21>
- Quagliarini, E., & Maracchini, G. (2018). Experimental and FEM investigation of cob walls under compression. *Advances in Civil Engineering, 2018*.
- Quagliarini, E., Stazi, A., Pasqualini, E., & Fratolocchi, E. (2010). Cob construction in Italy: Some lessons from the past. *Sustainability, 2*(10), 3291-3308.
- Raavi, S. S. D., & Tripura, D. D. (2023). Compressive and shear behavior of cement stabilized rammed earth wallettes reinforced with coir, bamboo splints and steel bars. Dans *Structures* (Vol. 53, pp. 1389-1401). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.005>
- Rabbat, C., Awad, S., Villot, A., Rollet, D., & Andrès, Y. (2022). Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 156*, 111962. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111962>
- Rafi, M. M., & Lodi, S. H. (2017). Comparison of dynamic behaviours of retrofitted and unretrofitted cob material walls. *Bulletin of Earthquake Engineering, 15*(9), 3855-3869.
- Rafi, M. M., Lodi, S. H., & Qazi, S. A. (2021). Dynamic testing of seismic resistant cob structure for post-earthquake reconstruction. *Journal of Earthquake Engineering, 25*(6), 1009-1030. doi: <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1531092>

- Rahim, M., Douzane, O., Le, A. T., Promis, G., Laidoudi, B., Crigny, A., . . . Langlet, T. (2015). Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings*, 88, 91-99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043>
- Rai, D. C. (2005). Structural use of unreinforced masonry. *IITK-GSDMA EQ*, 12, 19.
- Ramakrishna, S., Pervaiz, M., Tjong, J., Ghisellini, P., & Sain, M. M. (2021). Low-carbon materials: genesis, thoughts, case study, and perspectives. *Circular Economy and Sustainability*, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00135-9>
- Randazzo, L., Montana, G., Hein, A., Castiglia, A., Rodonò, G., & Donato, D. (2016). Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics. *Applied Clay Science*, 132, 498-507. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.021>
- RB299-19_IRC. (2019). 2018 International Residential Code : APPENDIX U Cob Construction (Monolithic Adobe). *ICC COMMITTEE ACTION HEARINGS*, 36. Repéré à https://cobcode.s3.amazonaws.com/RB299-19_IRC_ProposedAppendixU_CobConstruction.pdf
- Reddy, B. V., & Kumar, P. P. (2010). Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. *Energy and Buildings*, 42(3), 380-385.
- Reddy, B. V., Leuzinger, G., & Sreeram, V. (2014). Low embodied energy cement stabilised rammed earth building—A case study. *Energy and Buildings*, 68, 541-546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.051>
- Reuge, N., Collet, F., Pretot, S., Moissette, S., Bart, M., Style, O., . . . Lanos, C. (2020). Hygrothermal effects and moisture kinetics in a bio-based multi-layered wall: Experimental and numerical studies. *Construction and Building Materials*, 240, 117928. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117928>
- RG, E., Mabiala, B., Ahouet, L., Goma-Maniongui, J., & GF, D. (2011). Characterization of clayey soils from congo and physical properties of their compressed earth blocks reinforced with post-consumer plastic wastes. *Geomaterials*, 2011.
- Rios, A. J., & O'Dwyer, D. (2020). Experimental validation for the application of the flat jack test in cob walls. *Construction and Building Materials*, 254, 119148.
- Rode, C., & Grau, K. (2008). Moisture buffering and its consequence in whole building hygrothermal modeling. *Journal of Building physics*, 31(4), 333-360.

- Rode, C., Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., . . . Arfvidsson, J. (2005). *Moisture buffering of building materials*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.
- Roos, Y. H. (2024). Water sorption modeling and monolayer of biological and food materials. *LWT*, 116271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116271>
- Ruiz, G., Zhang, X., Edris, W. F., Cañas, I., & Garijo, L. (2018). A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 176, 566-572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.077>
- Saba, L. A., Ahmad, M. H., Majid, R. A., & Yahaya, A. (2018). Material and assembly selection: Comparative analysis of embodied energy and carbon as an index for environmental performance. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 44(1), 1-24. Repéré à www.akademiabaru.com/arms.html
- Saffari, M., Piselli, C., De Gracia, A., Pisello, A. L., Cotana, F., & Cabeza, L. F. (2018). Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM). *Energy and Buildings*, 158, 1097-1105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.068>
- Saidi, M., Cherif, A. S., Zeghmami, B., & Sediki, E. (2018). Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. *Construction and Building Materials*, 167, 566-577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063>
- Sameh, S. H. (2014). Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. *Journal of cleaner production*, 65, 362-373. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.046>
- Samuel, D. L., Dharmasastha, K., Nagendra, S. S., & Maiya, M. P. (2017). Thermal comfort in traditional buildings composed of local and modern construction materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 463-475. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.08.001>
- Sangma, S., & Tripura, D. D. (2020). Experimental study on shrinkage behaviour of earth walling materials with fibers and stabilizer for cob building. *Construction and Building Materials*, 256, 119449.
- Sangma, S., & Tripura, D. D. (2021). Flexural strength of cob wallettes reinforced with bamboo and steel mesh. *Construction and Building Materials*, 272, 121662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119449>
- Sanou, I., Ouedraogo, M., Bamogo, H., Meité, N., Seynou, M., Aubert, J.-E., & Millogo, Y. (2024). Microstructural, physical, and mechanical characteristics of adobes amended with cement-metakaolin mixtures. *Emergent Materials*, 1-15.

- Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings—past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617-638. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- Sarikanat, M., Seki, Y., Sever, K., & Durmuşkahya, C. (2014). Determination of properties of *Althaea officinalis* L.(Marshmallow) fibres as a potential plant fibre in polymeric composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 57, 180-186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.041>
- Sathish, T., Jagadeesh, P., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2022). Mechanical and thermal analysis of coir fiber reinforced jute/bamboo hybrid epoxy composites. *Polymer Composites*, 43(7), 4700-4710. doi: <https://doi.org/10.1002/pc.26722>
- Sawadogo, M., Benmahiddine, F., Godin, A., Duquesne, M., Belarbi, R., & Hamami, A. (2023). Development and hygrothermal performance analysis of a novel eco-friendly insulating wall under various climatic conditions. *Building and Environment*, 245, 110841.
- Sayouba, S., Kayaba, H., Téré, D., Souleymane, S., Oumar, S., Jean, K., & Antoine, B. (2023). Formulation and Thermomechanical Characterization of Earth-based Biosourced Composites: Cases of Clay-Hibiscus *cannabinus* L. Fiber, Clay-sawdust and Clay-*Oryza sativa* Husk. *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences*, 11(3), 30-44.
- Schmidt, W., Commeh, M., Olonade, K., Schiewer, G. L., Dodoo-Arhin, D., Dauda, R., . . . Thiedeitz, M. (2021). Sustainable circular value chains: From rural waste to feasible urban construction materials solutions. *Developments in the Built Environment*, 6, 100047. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100047>
- Schroeder, H. (2018). The new DIN standards in earth building—the current situation in Germany. *J. Civ. Eng. Archit*, 12, 113-120.
- Schweiker, M., Endres, E., Gosslar, J., Hack, N., Hildebrand, L., Creutz, M., . . . Mehnert, J. (2021). Ten questions concerning the potential of digital production and new technologies for contemporary earthen constructions. *Building and Environment*, 206, 108240. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108240>
- Sen, B., & Saha, R. (2022). Experimental and numerical investigation of mechanical strength characteristics of natural fiber retrofitted rammed earth walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5), 970-993. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.06.004>
- Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-polyethylene (Bio-PE), Bio-polypropylene (Bio-PP) and Bio-poly (ethylene terephthalate)(Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers*, 12(8), 1641. doi: <https://doi.org/10.3390/polym12081641>

- Smith, A. (2024). Housing policy in bc (no. 1): an overview of provincial policy.
- Spišáková, M., & Mačková, D. (2015). The use potential of traditional building materials for the realization of structures by modern methods of construction. *Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering*, 10(2), 127-138.
- Srinivasan, H., Arumugam, H., Krishnasamy, B., MI, A. A., Murugesan, A., & Muthukaruppan, A. (2023). Desert cotton and areca nut husk fibre reinforced hybridized bio-benzoxazine/epoxy bio-composites: Thermal, electrical and acoustic insulation applications. *Construction and Building Materials*, 363, 129870. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129870>
- Stachowiak, T., & Łukasik, K. (2021). The management of polymer and biodegradable composite waste in relation to petroleum-based thermoplastic polymer waste—In terms of energy consumption and processability. *Sustainability*, 13(7), 3701. doi: <https://doi.org/10.3390/su13073701>
- Steele, J., Cameron, A., Revington, J., & Director, G. T. (2024). Quebec’s “soft rent cap” model as a policy tool to address Alberta’s student housing crisis.
- Surajarusarn, B., Traiperm, P., & Amornsakchai, T. (2019). Revisiting the morphology, microstructure, and properties of cellulose fibre from pineapple leaf so as to expand its utilization. *Sains Malaysiana*, 48(1), 145-154. doi : <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4801-17>
- Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., & Kriker, A. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 59, 161-168.
- Taffese, W. Z., & Abegaz, K. A. (2019). Embodied energy and CO2 emissions of widely used building materials: the Ethiopian context. *Buildings*, 9(6), 136.
- Tang, A.-M., Cui, Y.-J., & Le, T.-T. (2008). A study on the thermal conductivity of compacted bentonites. *Applied Clay Science*, 41(3-4), 181-189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.11.001>
- Taourte, Y., Tiffonnet, A.-L., Marion, M., Louahlia, H., El Alami, M., Gounni, A., . . . Voicu, I. (2023). Effect of Temperature on Moisture Migration in Earth and Fiber Mixtures for Cob Materials. *Energies*, 16(14), 5526. doi : <https://doi.org/10.3390/en16145526>
- Tchiotsop, J., Issaadi, N., Poullain, P., Bonnet, S., & Belarbi, R. (2022). Assessment of the natural variability of cob buildings hygric and thermal properties at material scale: Influence of plants add-ons. *Construction and Building Materials*, 342, 127922. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127922>

- Teixeira, E. R., Machado, G., P. Junior, A. d., Guarnier, C., Fernandes, J., Silva, S. M., & Mateus, R. (2020). Mechanical and thermal performance characterisation of compressed earth blocks. *Energies*, 13(11), 2978. doi: <https://doi.org/10.3390/en13112978>
- Teslík, J., Zdražilová, N., & Vodičková, M. (2014). Air-tightness and acoustic properties of SuperAdobe system. Dans *Advanced Materials Research* (Vol. 899, pp. 365-368). Trans Tech Publ. doi : www.scientific.net/AMR.899.365
- Tlajji, G., Pennec, F., Ouldboukhite, S., Ibrahim, M., & Biwole, P. (2022). Hygrothermal performance of multilayer straw walls in different climates. *Construction and Building Materials*, 326, 126873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126873>
- Toguyeni, D. Y., Lawane, A., Zoma, F., & Khamis, G. (2018). Formulation of Compressed Earth Blocks Stabilized with Lime and Hibiscus sabdariffa Fibres Showcasing Good Thermal and Mechanical Properties. *Journal of Materials Science & Surface Engineering (JMSSE)*, 6, 817-824. doi: <https://doi.org/10.jmsse/2348-8956/6-4.1>
- Tomovska, R., & Radivojević, A. (2017). Tracing sustainable design strategies in the example of the traditional Ohrid house. *Journal of cleaner production*, 147, 10-24.
- Tonini de Araújo, M., de Souza, H. A., & Gomes, A. P. (2022). Computer simulation of moisture transfer in walls: impacts on the thermal performance of buildings. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(4), 453-472. doi: <https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1916426>
- Touati, K., Benzaama, M.-H., El Mendili, Y., Le Guern, M., Streiff, F., & Goodhew, S. (2023). Hygrothermal and Economic Analysis of an Earth-Based Building Using In Situ Investigations and Artificial Neural Network Modeling for Normandy's Climate Conditions. *Sustainability*, 15(18), 13985. doi: <https://doi.org/10.3390/su151813985>
- Toufigh, V., & Samadianfard, S. (2022). Experimental and numerical investigation of thermal enhancement methods on rammed-earth materials. *Solar Energy*, 244, 474-483. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.049>
- Touré, P. M. (2018). *Éconconstruction dans le contexte du climat tropical : de l'échelle du matériau à l'échelle du bâtiment* (Université Cheikh Anta Diop de Dakar).
- Toure, P. M., Dieye, Y., Gueye, P. M., Faye, M., & Sambou, V. (2020). Influence of envelope thickness and solar absorptivity of a test cell on time lag and decrement factor. *Journal of building physics*, 43(4), 338-350. doi: <https://doi.org/10.1177/1744259119863446>

- Toure, P. M., Dieye, Y., Gueye, P. M., Sambou, V., Bodian, S., & Tiguampo, S. (2019). Experimental determination of time lag and decrement factor. *Case Studies in Construction Materials*, *11*, e00298.
- Tripura, D. D., Gupta, S., Debbarma, B., & Deep, R. S. S. (2020). Flexural strength and failure trend of bamboo and coir reinforced cement stabilized rammed earth wallttes. *Construction and Building Materials*, *242*, 117986.
- Tsozué, D., Nzeugang, A. N., Mache, J. R., Loweh, S., & Fagel, N. (2017). Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clays from Maroua (Far-North, Cameroon) for use in ceramic bricks production. *Journal of Building Engineering*, *11*, 17-24.
- Tsozué, D., Nzeukou, A. N., Kagonbé, B. P., Madi, A. B., Mache, J. R., Bitom, D. L., & Fagel, N. (2022). Genesis and assessment of clay materials suitability for earthenware production in northern Cameroon. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(16), 1-18.
- Umurigirwa, B. S. (2014). *Élaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre-amidon pour le Bâtiment* (Reims).
- Van Damme, H., & Houben, H. (2018). Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research*, *114*, 90-102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>
- Varnier, M. (2019). *Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie* (Université de Limoges).
- Venkatarama Reddy, B. (2009). Sustainable materials for low carbon buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *4*(3), 175-181.
- Verron-Guillemot, L., Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., Duc, M., Vinceslas, T., Lecompte, T. (2022). Estimating and mapping the availability of earth resource for light earth building using a soil geodatabase in Brittany (France). *Resources, Conservation and Recycling*, *184*, 106409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106409>
- Vivek, S., & Kanthavel, K. (2019). Effect of bagasse ash filled epoxy composites reinforced with hybrid plant fibres for mechanical and thermal properties. *Composites Part B : Engineering*, *160*, 170-176.
- Volhard, F. (2016). Light earth building. Dans *Light Earth Building*. Birkhäuser.
- Wafer, R.-P. (2010a). L' adobe, une solution durable pour la construction d' habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili. *Université de Sherbrooke, Québec, Canada*, 73.

- Wafer, R.-P. (2010 b). L' adobe, une solution durable pour la construction d' habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili. *Université de Sherbrooke, Québec, Canada*.
- Wakil, M., El Mghari, H., Kaitouni, S. I., & El Amraoui, R. (2024). Thermal energy performance of compressed earth building in two different cities in Moroccan semi-arid climate. *Energy and Built Environment*, 5(5), 800-816. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.06.008>
- Walker, P., Reddy, B. V., & Mani, M. (2020). Preface for SI: Modern earth building materials and technologies. *Construction and Building Materials*, 262, 120663.
- Wambersie, L., & Ouellet-Plamondon, C. (2024). Developing a comprehensive account of embodied emissions within the Canadian construction sector. *Journal of Industrial Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/jieec.13548>
- Wang, J., & Zhao, H. (2018). High performance damage-resistant seismic resistant structural systems for sustainable and resilient city: A review. *Shock and Vibration*, 2018. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/8703697>
- Wang, L., Cheng, J., Jin, Z., Sun, Q., Zou, R., Meng, Q., . . . Zhang, Q. (2023). High-pressure hydrogen adsorption in clay minerals: Insights on natural hydrogen exploration. *Fuel*, 344, 127919. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127919>
- Wang, Q., Chen, T., Wang, X., Zheng, Y., Zheng, J., Song, G., & Liu, S. (2023). Recent Progress on Moisture Absorption Aging of Plant Fiber Reinforced Polymer Composites. *Polymers*, 15(20), 4121. doi: <https://doi.org/10.3390/polym15204121>
- Waters, L. M., Bernazzani, P., & Jao, M. (2016). Optimal Proportioning, Tempering, and Testing of Adobe Brick, Compressed Stabilized Earthen Block, and Rammed Earth for Low-Cost, Sustainable Construction: A Literature Review. *Bulletin of the American Physical Society*, 61.
- Weather API. (2012-2024). Historical weather data collection. Repéré à <https://openweathermap.org/api>
- Wei, M., Wang, B., & Liu, S. (2019). Numerical Simulation of Heat and Moisture Transfer of Wall with Insulation. Dans *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1300, pp. 012029). IOP Publishing. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1300/1/012029>
- Weiler, A. M., & Caxaj, C. S. (2024). Housing, health equity, and global capitalist power: Migrant farmworkers in Canada. *Social Science & Medicine*, 354, 117067.
- Whitzman, C. (2023). A human rights-based calculation of canada's housing supply shortages.

- Woods, J., Winkler, J., & Christensen, D. (2013). *Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States). doi: <https://doi.org/10.2172/1067948>
- Wu, D., Rahim, M., El Ganaoui, M., Bennacer, R., Djedjig, R., & Liu, B. (2022). Dynamic hygrothermal behavior and energy performance analysis of a novel multilayer building envelope based on PCM and hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 341, 127739. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127739>
- Wyss, U. (2005). *La construction en " matériaux locaux" : état d'un secteur à potentiel multiple*. Suisse. Direction du développement et de la coopération. Repéré à https://jaga.afrique-gouvernance.net/docs/resource_fr_65911.pdf
- Xie, L., Hu, X., Xu, Z., Chen, Z., Wang, P., & Liang, R. (2022). Experimental study on comprehensive improvement of shear strength and erosion resistance of yellow mud in Qiang Village. *Reviews on Advanced Materials Science*, 61(1), 795-816.
- Xu, Y., & Zeng, Z. (2022). Experimental and numerical investigation on the effect of heat and moisture coupling migration of unsaturated lateritic clay for the soil thermal storage system. *Energy and Buildings*, 276, 112499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112499>
- Yang, R., Jia, A., He, S., Hu, Q., Sun, M., Dong, T., . . . Zhou, S. (2021). Experimental investigation of water vapor adsorption isotherm on gas-producing Longmaxi shale: Mathematical modeling and implication for water distribution in shale reservoirs. *Chemical Engineering Journal*, 406, 125982. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125982>
- Yang, Z., Wang, K., Wang, X., Huan, S., Yang, H., & Wang, C. (2023). Low-cost, superhydrophobic, flame-retardant sunflower straw-based xerogel as thermal insulation materials for energy-efficient buildings. *Sustainable Materials and Technologies*, 38, e00748. doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00748>
- Yetunde, O. (2014). Multi-habitation: A form of Housing in African Urban Environments. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(4), 06. doi: www.iosrjournals.org
- Yu, S., Cui, Y., Shao, Y., & Han, F. (2019). Simulation research on the effect of coupled heat and moisture transfer on the energy consumption and indoor environment of public buildings. *Energies*, 12(1), 141. doi: <https://doi.org/10.3390/en12010141>
- Zeghari, K., Gounni, A., Louahlia, H., Marion, M., Boutouil, M., Goodhew, S., & Streif, F. (2021). Novel dual walling cob building: dynamic thermal performance. *Energies*, 14(22), 7663.

- Zeghari, K., Louahlia, H., Leguern, M., Boutouil, M., Gualous, H., Marion, M., . . . Streiff, F. (2019). Comparison of the thermal performance between conventional and cob building. Dans. EDP Sciences. doi : <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103003>
- Zeghmati, B., & Sediki, E. (2016). Etude numérique du comportement thermique de brique de terre stabilisée. *Refrigeration Energy and Environment, Hammamet*, 08.
- Zhang, H., Shi, C., Pan, D., Xuan, Y., & He, X. (2020). Optimization of effective moisture penetration depth model considering airflow velocity for gypsum-based materials. *Journal of Building Engineering*, 32, 101539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101539>
- Zhang, L., Gustavsen, A., Jelle, B. P., Yang, L., Gao, T., & Wang, Y. (2017). Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 151, 504-511.
- Zhang, L., Sang, G., & Han, W. (2020). Effect of hygrothermal behaviour of earth brick on indoor environment in a desert climate. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102070. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102070>
- Zhang, M., Qin, M., Rode, C., & Chen, Z. (2017). Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption. *Applied Thermal Engineering*, 124, 337-345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.173>
- Zhao, R., Guo, H., Yi, X., Gao, W., Zhang, H., Bai, Y., & Wang, T. (2020). Research on thermal insulation properties of plant fiber composite building material: a review. *International journal of thermophysics*, 41, 1-18. doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02665-0>
- Zoma, V., & Nakanabo, N. (2022). *L'habitat informel en Afrique*. GRIN Verlag. Repéré à <https://hal.science/hal-03955100>