



## Thèse de Doctorat en cotutelle

Présenté pour l'obtention du grade de :

**Docteur en Sciences de l'Université de Liège (Belgique)**

**Spécialité : Energie et Gestion de l'Environnement**

&

**Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin)**

**Spécialité : Energétique et Mécanique**

---

**AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES BATIMENTS PUBLICS  
DU SUD DU BENIN PAR UTILISATION DES MATERIAUX BIOSOURCES LOCAUX**

Rédigé par :

**Gratien Jesugo Diudonné KIKI**

Ingénieur de conception en Génie Mécanique et Energétique, Master de recherche en Efficacité  
Energétique et Energies Renouvelables

Soutenu publiquement le 29 mars 2023 à Arlon (Belgique)

Membres de jury

---

- <b>Anne-Claude ROMAIN</b>	Université de Liège	Présidente
- <b>Luc COURARD</b>	Université de Liège	Secrétaire
- <b>Adamah MESSAN</b>	Institut 2iE	Rapporteur
- <b>Clément KOUCHADE</b>	Université d'Abomey-Calavi	Rapporteur
- <b>Romain REMOND</b>	Université de Lorraine	Rapporteur
- <b>Malahimi ANJORIN</b>	Université d'Abomey-Calavi	Examineur
- <b>Philippe ANDRE</b>	Université de Liège	Promoteur Nord
- <b>Comlan Aristide HOUNGAN</b>	UNSTIM / Université d'Abomey-Calavi	Promoteur Sud



*Dédicace*

*A mon père Donatien KIKI et ma mère Agnès KINTOYETON*

## Remerciements

La rédaction de ce travail n'aurait pu se faire sans la contribution de plusieurs personnes que je tiens à remercier avec la certitude que mes mots ne rendront que vaguement compte de ma gratitude. Mes plus sincères remerciements vont à l'endroit :

- de mon Directeur de thèse, le Professeur Philippe ANDRE, pour avoir accepté porter mon projet de recherche et m'avoir soutenu et accompagné de près dans mes travaux de recherche ;
- de mon co-Directeur de thèse, le Professeur Aristide Comlan HOUNGAN, pour son soutien, ses conseils et l'efficacité de son encadrement ;
- de mon encadrant sud, le Professeur Clément KOUCHADE, pour son accompagnement tout le long de ce travail de recherche ;
- de mon encadrant nord, le Professeur Luc COURARD, qui a accepté apporter son expérience au bon déroulement de notre thèse et nous a ouvert les portes de son laboratoire ;
- de la Directrice du Collège Doctoral du département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège, la Professeur Anne-Claude ROMAIN ;
- du Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de l'Université d'Abomey-Calavi, le Professeur Mohammed GIBIGAYE ;
- du Professeur Romain REMOND qui a été l'un des tous premiers artisans de ce projet de recherche et qui m'a accueilli dans son Laboratoire (LERMAB) pour un stage doctoral. Ce fut un honneur et un grand plaisir de travailler avec vous ;
- du Professeur Adamah MESSAN et du Dr Philbert NSHIMIYIMANA pour l'accueil, le soutien et tout l'encadrement dont j'ai bénéficié durant tout mon séjour au LEMHaD ;
- du Professeur Malahimi ANJORIN pour son regard extérieur et constructif sur nos travaux de recherche ;
- du Professeur Latif FAGBEMI pour son soutien et ses conseils ;
- du Dr (MC) Armand DJOSSOU pour sa disponibilité et ses apports scientifiques en vue d'une amélioration continue du travail ;
- du Dr Toussaint KOSSOU pour son soutien et ses conseils ;
- de tous les membres de mon équipe de recherche BEMS, particulièrement Elisabeth DAVIN, Pauline ABRAHAMS et Oussama AYED pour la bonne ambiance de travail et leur contribution dans la réalisation des travaux de recherche ;
- de tous les membres du laboratoire VEB au Bénin, en particulier Berléo APOVO, Raimi ALAKOUKO, Safiou BOURAIMA et Faïssolath MIGAN ;
- de mes fidèles compagnons de tous les jours Karol EKOUEJEN, Junior ZANNOU-TCHOKO et Jihane BAKOUNOURE. A vous mes frères, je vous dis merci pour le soutien sans faille que vous m'avez porté ;
- de mes proches, Clarisse ATTOLOU, Tauzi DEKOUN, Kofi AKOUETE, Sylvana SEWA, Gloria TOVIEGBE, Roméo ADEGOKE et en particulier ma chère Champoléonne DAVI ;
- de tous les membres de ma famille, particulièrement Françoise HODONOU, Hortense KIKI, Estelle KIKI et Yolande KIKI.

Cette page ne saurait suffire à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Infiniment MERCI.

## Résumé

L'efficacité énergétique des bâtiments est un moyen fiable de lutte contre le réchauffement climatique de la planète. Dans ce registre, l'enveloppe de bâtiment représente un élément essentiel dans la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Cependant, les enveloppes en matériaux conventionnels généralement utilisées, particulièrement au Bénin, présentent de mauvaises performances hygrothermiques et énergétiques au vu du contexte climatique du pays. Pour y remédier, les matériaux en terre biosourcée se présentent comme une solution efficace et écologique dans la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Ainsi, un matériau en argile – paille de chiendent a été proposé dans la présente étude pour la construction de bâtiments durables. Il se compose en masse par rapport à la masse totale d'échantillon d'environ 55% d'argile, 36% de concassé 0/5, 8% de ciment, 0 à 1,5% de paille de chiendent et 12 à 14% d'eau. Il a été réalisé en blocs de terre comprimée (BTC). Au total, quatre formulations ont été mises en œuvre par variation de la teneur en paille de chiendent. Il s'agit des  $BTC_8 - 0$  (BTC contenant 8% de ciment et 0% de paille de chiendent),  $BTC_8 - 0,5$ ,  $BTC_8 - 1$  et  $BTC_8 - 1,5$ . La caractérisation physique de ces blocs a principalement permis de déterminer leurs masses volumiques qui varient de  $1932 \text{ kg/m}^3$  à  $1692 \text{ kg/m}^3$  et leurs porosités accessibles comprises entre 27,1% et 33% lorsque la teneur en paille de chiendent passe respectivement de 0 à 1,5%. Leur employabilité dans l'enveloppe du bâtiment a été vérifiée en effectuant des essais de résistance à la compression et de durabilité sur les matériaux. Pour des teneurs en paille de 0 à 1%, les blocs fabriqués présentent des propriétés mécaniques (résistances aux compressions sèche 'DCS' et humide 'WCS') supérieures aux seuils normatifs. En revanche, pour le  $BTC_8 - 1,5$  les DCS et WCS obtenues sont en dessous des limites tolérables dans la construction de bâtiment ( $DCS = 1,76 \text{ MPa} < 2 \text{ MPa}$  et  $WCS = 0,56 \text{ MPa} < 1 \text{ MPa}$ ). Bien que cette dernière formulation présente de bons indices de durabilité (résistance à l'abrasion et à l'érosion), tout comme les autres formulations, elle a été en partie écartée dans la suite de l'étude. La détermination des propriétés thermiques des BTC a permis d'observer une décroissance de la conductivité thermique en fonction de la teneur en paille quel que soit l'humidité des blocs. Par exemple, pour les BTC soumis à une humidité relative de 85% (humidité relative moyenne de l'air dans la région d'étude), les conductivités thermiques mesurées varient de  $0,82 \text{ W/m.K}$  à  $0,67 \text{ W/m.K}$  pour les teneurs en paille allant de 0 à 1,5%. Sur le plan hygrique, la présence dominante de la kaolinite dans l'argile et sa stabilisation physique avec le concassé 0/5 ont limité le taux d'absorption d'eau des blocs. A 88% d'humidité relative, les teneurs en humidité d'équilibre sont égales à 2,92% pour le  $BTC_8 - 0$  et 2,6% pour le  $BTC_8 - 1$ . Avec des capacités tampons d'humidité allant de 1,98 ( $BTC_8 - 0$ ) à  $2,14 \text{ g/m}^2 \cdot \%RH$  ( $BTC_8 - 1$ ), les blocs se sont montrés relativement plus hygroscopiques que les matériaux conventionnels de construction. Par ailleurs, les performances hygrothermiques et énergétiques des blocs ont été évaluées à travers des simulations WUFI un bâtiment de bureaux situé dans la ville de Cotonou au Bénin. A cet effet, une enquête de confort réalisée auprès des occupants dudit bâtiment a permis de déterminer les conditions de confort intérieur à simuler que sont : une température de confort de  $26,1^\circ\text{C}$  et une humidité relative comprise entre 40 et 70%. Ainsi, le remplacement de l'enveloppe conventionnelle du bâtiment d'étude par une enveloppe en BTC argile – paille de chiendent a



permis des économies respectives de 3 et 8,2% des charges de déshumidification et de climatisation du bureau simulé. Pour finir, les comportements affichés par les BTC en argile – paille de chiendent lors des simulations ont été remarqués pendant des expérimentations de transfert couplé de chaleur et d'humidité à travers des parois en argile – paille de chiendent et en blocs de bétons creux en chambre climatique.

**Mots clés :** efficacité énergétique, confort thermique, BTC en argile – paille de chiendent, enveloppe du bâtiment, performance hygrothermique, performance énergétique.

## Abstract

The energy efficiency of buildings is a reliable way to fight global warming. In this context, the building envelope is an essential element in reducing the energy consumption of buildings. However, the envelopes in conventional materials generally used, particularly in Benin, present poor hygrothermal and energetic performances considering the climatic context of the country. To remedy this, biosourced earth materials are an effective and ecological solution in reducing the energy consumption of buildings. This being the case, a clay – quack grass straw material was proposed in the present study for the construction of sustainable buildings. It consists of about 55% clay, 36% crushed 0/5, 8% cement, 0 to 1.5% couch grass straw and 12 to 14% water in relation to the total sample mass. It was made of compressed earth blocks (CEB). A total of four formulations were implemented by varying the content of quackgrass straw. These were  $CEB_8 - 0$ ,  $CEB_8 - 0.5$ ,  $CEB_8 - 1$  and  $CEB_8 - 1.5$ . The physical characterisation of these blocks mainly determined their densities which varied from 1932 kg/m<sup>3</sup> to 1692 kg/m<sup>3</sup> and their accessible porosities ranging from 27.1% to 33% when the quackgrass straw content increased from 0 to 1.5% respectively. Their suitability in the building envelope was verified by performing compressive strength and durability tests on the materials. For straw contents from 0 to 1% the manufactured blocks present mechanical properties (dry compressive strength 'DCS' and wet compressive strength 'WCS') higher than the normative thresholds. On the other hand, for the  $CEB_8 - 1.5$  the obtained DCS and WCS are below the tolerable limits in building construction ( $DCS = 1.76 \text{ MPa} < 2 \text{ MPa}$  and  $WCS = 0.56 \text{ MPa} < 1 \text{ MPa}$ ). Although the latter formulation shows good durability indices (abrasion and erosion resistance), as do the other formulations, it was partially discarded in the rest of the study. The determination of the thermal properties of the CEB allowed to observe a decrease of the thermal conductivity according to the content of straw whatever is the humidity of the blocks. For example, for the CEB subjected to a relative humidity of 85% (average relative humidity of the air in the study area) the thermal conductivity measured vary from 0.82 W/m.K to 0.67 W/m.K for straw contents ranging from 0 to 1.5%. On the hygric level, the dominant presence of kaolinite in the clay and its physical stabilization with the 0/5 crushed clay limited the water absorption rate of the blocks. At 88% relative humidity, the equilibrium moisture contents are equal to 2.92% for the  $CEB_8 - 0$  and 2.6% for the  $CEB_8 - 1$ . With moisture buffering capacities ranging from 1.98 ( $CEB_8 - 0$ ) to 2.14 g/m<sup>2</sup>.%RH ( $CEB_8 - 1$ ), the blocks were shown to be relatively more hygroscopic than conventional building materials. In addition, the hygrothermal and energetic performances of the blocks were evaluated through WUFI simulations on an office building located in the city of Cotonou in Benin. To this end, a comfort survey conducted with the occupants of the building has determined the conditions of indoor comfort to be simulated which are: a comfort temperature of 26.1 ° C and a relative humidity between 40 and 70%. Thus, the replacement of the conventional envelope of the study building by an envelope made of BTC clay - quackgrass straw allowed savings of 3 and 8.2% respectively of the dehumidification and air conditioning loads of the simulated office. Finally, the behaviours displayed by the clay - quackgrass CEB during the simulations were noticed during experiments of coupled heat and humidity transfer through clay - quackgrass walls and hollow concrete blocks in a climatic chamber.

**Key words:** energy efficiency, thermal comfort, CEB clay - quack grass straw, building envelope, hygrothermal performance, energy performance.

## Table des matières

<i>Dédicace</i> .....	i
<i>Remerciements</i> .....	ii
Résumé .....	iii
Abstract .....	v
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux .....	xv
Nomenclature .....	xvi
Liste des sigles et abréviations .....	xx
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
Introduction .....	7
1.1 Efficacité énergétique et enveloppe du bâtiment.....	7
1.2 Rôle des éco-matériaux dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments 12	
1.3 Choix d'une technique de construction en terre .....	14
1.4 Caractérisation structurelle et hygrothermique des BTC biosourcées.....	16
1.4.1 Caractérisation structurelle.....	16
1.4.2 Caractérisation thermique.....	21
1.4.3 Caractérisation hygrique .....	22
1.5 Mécanisme de transfert hygrothermique à travers un matériau hygroscopique .....	29
1.5.1 Transfert hygrique .....	30
1.5.2 Transfert thermique .....	32
1.5.3 Transfert aéraulique.....	32
1.5.4 Couplage des transferts de chaleur et de masse .....	33
1.6 Modélisation physique du transfert couplé de chaleur et de masse.....	34
1.7 Etude du confort hygrothermique dans les bâtiments .....	37
Conclusion.....	48
2. CONCEPTION ET CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DU MATERIAU TERRE BIOSOURCEE .....	51
Introduction .....	51
2.1 Conception de l'éco-matériau.....	51
2.1.1 Choix des matières premières : matériau terre .....	51
2.1.2 Stabilisant physique.....	52
2.1.3 Stabilisant chimique .....	53

2.1.4	Agrégat végétal .....	54
2.2	Caractérisation physico-mécanique et durabilité des matériaux .....	54
2.2.1	Caractérisation physique des matières premières.....	54
2.2.2	Formulation des éprouvettes .....	55
2.3	Caractérisation des éprouvettes .....	57
2.3.1	Caractérisation physique .....	58
2.3.2	Caractérisation mécanique .....	61
2.4	Durabilité des éco-matériaux.....	62
2.5	Résultats.....	62
2.5.1	Propriétés physiques des matières premières .....	62
2.5.2	Masse volumique et porosité accessible des éprouvettes.....	64
2.5.3	Absorption d'eau .....	65
2.5.4	Variation dimensionnelle .....	67
2.5.5	Résistance à la compression.....	68
2.5.6	Durabilité des BTC.....	70
Conclusion.....		74
3.	CARACTERISATION HYGROTHERMIQUE DES BTC EN ARGILE – PAILLE DE CHIENDENT .....	77
Introduction .....		77
3.1	Matériel et méthodes .....	77
3.1.1	Caractérisation thermique des BTC en argile – paille de chiendent .....	77
3.1.2	Caractérisation hygrique des BTC en argile – paille de chiendent .....	79
3.1.3	Essai de perméabilité à l'air .....	86
3.2	Résultats et discussion .....	87
3.2.1	Propriétés thermiques .....	87
3.2.2	Isothermes de sorption .....	91
3.2.3	Perméabilité à la vapeur / facteur de résistance à la vapeur d'eau / MBV.....	99
3.2.4	Perméabilité à l'air .....	102
Conclusion.....		103
4.	MONITORING ET EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE DANS UN BÂTIMENT DE BUREAU .....	106
Introduction .....		106
4.1	Monitoring du bâtiment d'étude .....	106
4.1.1	Présentation de la zone d'étude et du bâtiment témoin.....	106
4.1.2	Campagne de mesure des données énergétiques et climatiques.....	107
4.2	Evaluation du confort thermique dans le bâtiment.....	114

4.2.1	Matériel et méthodes .....	114
4.2.2	Résultats .....	117
	Conclusion.....	124
5.	PERFORMANCE HYGROTHERMIQUE ET ENERGETIQUE DES ENVELOPPES EN ARGILE – PAILLE DE CHIENDENT .....	127
	Introduction .....	127
5.1	Description de l’approche de simulation des performances des enveloppes en argile – paille de chiendent .....	127
5.2	Optimisation des paramètres thermo-physiques de l’enveloppe conventionnelle... 128	
5.2.1	Simulations TRNSYS .....	130
5.2.2	Calibration du modèle de simulation .....	131
5.2.3	Précision du modèle de simulation.....	132
5.2.4	Résultats .....	133
5.3	Evaluation de la performance hygrothermique de l’enveloppe en argile – paille de chiendent.....	134
5.3.1	Validation expérimentale des modèles HAM utilisés dans WUFI .....	134
5.3.2	Performance hygrothermique des enveloppes en argile – paille de chiendent 138	
5.3.3	Performance énergétique des enveloppes en argile – paille de chiendent .....	142
5.3.4	Résultats et discussions .....	143
	Conclusion.....	152
6.	ESSAIS EN CHAMBRE CLIMATIQUE .....	155
	Introduction .....	155
6.1	Choix des matières premières .....	155
6.2	Fabrication des BTC en argile – paille de chiendent.....	156
6.3	Construction et instrumentation des parois .....	157
6.4	Déroulement des tests .....	161
6.5	Résultats et discussion .....	162
6.5.1	Conditions hygrothermiques de réalisation des tests .....	162
6.5.2	Analyse du transfert couplé de chaleur et de masse à travers les parois .....	164
6.5.3	Conditions hygrothermiques dans l’enceinte climatique .....	168
6.5.4	Impact du <i>BTC8_Bel</i> – 1 sur le confort thermique .....	169
6.5.5	Performances énergétiques des parois.....	170
	Conclusion.....	171
	CONCLUSION GENERALE .....	173
	BIBLIOGRAPHIE .....	176
	ANNEXES .....	xvi

Annexe 1 .....	xvi
<i>Annexe 1.1</i> : Questionnaire pour enquête de confort thermique .....	xvi
<i>Annexe 1.2</i> : Caractéristiques des instruments de mesure pour l'évaluation du confort thermique (extrait de la norme ISO 7726_2001).....	xix
Annexe 2 .....	xx
<i>Annexe 2.1</i> .....	xx
<i>Annexe 2.2</i> .....	xxi

## Liste des figures

<b>Figure 1.1:</b> Façade avec système de protection solaire dynamique (Kolding Campus en Danemark).....	10
<b>Figure 1.2:</b> Enveloppe bio-inspirée à architecture météosensible fondée sur le transfert biomimétique de l'actionnement hygroscopique des cônes végétaux ( <i>Pinophyta</i> ) (Reichert et al., 2015).....	10
<b>Figure 1.3:</b> (a) Auto-actionnement de structures Kirigami programmables et adaptatives par différence de température (Kyu et al., 2018) ; (b) Tours al bahr à façade dynamique informatisée (structure Origami).....	11
<b>Figure 1.4:</b> (a) Hilo à Dübendorf en Suisse, (b) façade solaire adaptative .....	11
<b>Figure 1.5:</b> Essai d'érosion de Geelong (NZS, 1998) .....	20
<b>Figure 1.6:</b> Essai d'érosion par pulvérisation (NZS, 1998) .....	20
<b>Figure 1.7:</b> Essai d'abrasion ; (a) brosse métallique ; (b) dispositif ; (c) surface de brossage (AFNOR, 2001).....	21
<b>Figure 1.8:</b> Schématisation des isothermes de sorption suivant les zones d'humidité (Issaadi et al., 2015).....	24
<b>Figure 1.9:</b> Les types d'isothermes de sorption (Ferroukhi, 2016).....	25
<b>Figure 1.10:</b> Schéma du dispositif DVS des mesures de sorption (Bui et al., 2017) .....	27
<b>Figure 1.11:</b> Schéma de principe des essais de perméabilité à la vapeur d'eau en 'coupelle humide' et en 'coupelle sèche' (Labat et al., 2016) .....	29
<b>Figure 1.12:</b> Paramètres d'entrée et de sortie de WUFI Plus.....	37
<b>Figure 1.13:</b> L'interaction thermique entre l'homme et son environnement (Batier, 2016)...	39
<b>Figure 1.14:</b> Evolution des normes de confort thermique au fil des années (Carlucci et al., 2018) .....	40
<b>Figure 1.15:</b> Répartition du pourcentage prévu d'insatisfaits en fonction du vote moyen prévisible (Batier, 2016).....	42
<b>Figure 2.1:</b> Analyse minéralogique de l'argile de Zogbodomey.....	52
<b>Figure 2.2:</b> Formulation des éprouvettes.....	56
<b>Figure 2.3:</b> BTC en argile contenant différentes proportions de paille de chiendent (0% ; 0,5% ; 1% ; 1,5%).....	56
<b>Figure 2.4:</b> Aspects des BTC éliminés.....	57
<b>Figure 2.5:</b> (a) BTC emballés pour cure de 28 jours ; (b) BTC refroidis en laboratoire après séchage à l'étuve .....	57
<b>Figure 2.6:</b> Essais d'absorption capillaire .....	60
<b>Figure 2.7:</b> Plots en acier inoxydable fixés sur les blocs pour les essais de variation dimensionnelle .....	61
<b>Figure 2.8:</b> (a) Essai de résistance en compression sèche ; (b) Essai de résistance en compression humide.....	61
<b>Figure 2.9:</b> Essais de durabilité des éprouvettes : (a) Abrasion ; (b) Erodabilité.....	62
<b>Figure 2.10:</b> (a) Courbes granulométriques des mélanges argile – concassé 0/5 ; (b) Indice de plasticité des mélanges, (c) Nature des mélanges .....	64
<b>Figure 2.11:</b> Evolution de la masse volumique et de la porosité en fonction de la teneur en paille.....	65
<b>Figure 2.12:</b> Relation entre la porosité et la masse volumique des BTC .....	65
<b>Figure 2.13:</b> Absorption d'eau capillaire des composites exposés à une immersion partielle prolongée.....	66



<b>Figure 2.14:</b> Evolution de l'absorption total d'eau en fonction : (a) du temps ; (b) de la teneur en paille .....	67
<b>Figure 2.15:</b> Résistance à la compression sèche et humide des éprouvettes en fonction de la teneur en paille .....	70
<b>Figure 2.16:</b> Evolution du coefficient (Ca) d'abrasion des blocs en fonction de la teneur en paille .....	71
<b>Figure 2.17:</b> Relation entre le coefficient d'abrasion et la résistance à la compression à sec .	71
<b>Figure 2.18:</b> Profondeur d'érosion en fonction de la teneur en paille des CEB.....	73
<b>Figure 2.19:</b> Relation entre la résistance à l'érosion et les résistances à la compression et à l'abrasion.....	73
<b>Figure 2.20:</b> Aperçu des blocs après le test d'érodabilité à 500 kPa : (A) CEB-0 non stabilisé ; (B) BTC8 – 0; (C) BTC8 – 0,5 ; (D) BTC8 – 1 ; (E) BTC8 – 1,5.....	74
<b>Figure 3.1:</b> Dispositif Hot Disk pour la mesure des propriétés thermiques des BTC.....	79
<b>Figure 3.2:</b> Essai de détermination des isothermes de sorption ; (a) dispositif V-GA2; (b) nacelle contenant du BTC écrasé .....	81
<b>Figure 3.3:</b> Essai de perméabilité à la vapeur des BTC argile – paille de chiendent : (a) vérification de l'effet de bord ; (b) coupelles et systèmes de maintien des échantillons ; (c) assemblages dans l'enceinte climatique.....	84
<b>Figure 3.4:</b> Schéma descriptif de l'assemblage coupelle – échantillon – PVC-CHA (inspiré de la représentation de Redman et al. (2012).....	85
<b>Figure 3.5:</b> Mesure de la perméabilité à l'air des BTC argile – paille de chiendent ; (a) dispositif ALU-CHA ; (b) porte échantillon .....	87
<b>Figure 3.6:</b> Evolution de la conductivité thermique des BTC en fonction de la teneur en paille .....	89
<b>Figure 3.7:</b> Conductivité thermique des BTC à différentes humidités relatives .....	89
<b>Figure 3.8:</b> Evolution de la conductivité thermique des BTC en fonction de la teneur en eau .....	90
<b>Figure 3.9:</b> Choix de la formulation thermiquement et mécaniquement efficace.....	91
<b>Figure 3.10:</b> Evolution de l'humidité et de la masse de l'argile .....	93
<b>Figure 3.11:</b> Evolution de l'humidité et de la masse de la paille de chiendent.....	93
<b>Figure 3.12:</b> Isothermes de sorption à 35°C de l'argile et de la paille de chiendent.....	94
<b>Figure 3.13:</b> Evolution de l'humidité, de la température et de la masse du et de la masse du BTC8 – 0.....	96
<b>Figure 3.14:</b> Evolution de l'humidité, de la température et de la masse du BTC8 – 1.....	97
<b>Figure 3.15:</b> Les isothermes de sorption des BTC8 – 0 et BTC8 – 1.....	97
<b>Figure 3.16:</b> ajustement des isothermes de sorption : (a) BTC <sub>8-0</sub> ; (b) BTC <sub>8-1</sub> .....	99
<b>Figure 3.17:</b> Essais de perméabilité à la vapeur .....	101
<b>Figure 3.18:</b> Perméabilité à l'air des BTC argile – paille de chiendent .....	102
<b>Figure 4.1:</b> (a) Vue de face du bâtiment d'étude ; (b) Vue de dessus (Google Map) .....	107
<b>Figure 4.2:</b> (a) Mini station météorologique, (b) Capteur de température et d'humidité de l'air intérieur, (c) Enregistreur de consommation électrique ; (d) Enregistreur de puissance .....	108
<b>Figure 4.3:</b> Plan du 7ème étage du bâtiment d'étude .....	110
<b>Figure 4.4:</b> Evolution des paramètres météorologiques pendant le mois le plus chaud (novembre 2020) : (a) température et humidité de l'air extérieur ; (b) rayonnement solaire global .....	112
<b>Figure 4.5:</b> Conditions hygrothermiques des bureaux de (a) l'aile A ; (b) aile B ; (c) tour circulaire.....	113

<b>Figure 4.6:</b> (a) Vue d'ensemble d'un bureau collectif ; (b) Capteur de température et d'humidité ; (c) Anémomètre .....	116
<b>Figure 4.7:</b> (a) Vote de sensation thermique en fonction de la température opérative ; (b) Répartition du vote sensation thermique et préférence thermique des occupants.....	118
<b>Figure 4.8:</b> (a) Résistance vestimentaire des occupants en fonction de la température intérieure ; (b) Courbe de régression .....	119
<b>Figure 4.9:</b> Evolution du PMV et du TSV en fonction de la température de fonctionnement prédite.....	120
<b>Figure 4.10:</b> Détermination de la température de confort par régression linéaire.....	121
<b>Figure 4.11:</b> TSV, PMV, PMVnew , aPMV en fonction de la température de fonctionnement .....	123
<b>Figure 4.12:</b> TSV, PMVnew_1, PMVnew_2 en fonction de la température de fonctionnement .....	124
<b>Figure 5.1:</b> Composition des parois, (a) externes ; (b) internes .....	129
<b>Figure 5.2:</b> Etapes de la simulation dans TRNSYS 18.....	131
<b>Figure 5.3:</b> Approche de calibration du modèle de simulation thermique du bureau surveillé .....	132
<b>Figure 5.4:</b> Comparaison entre les températures simulées et mesurées .....	134
<b>Figure 5.5:</b> (a) Echantillon comportant un hygro-bouton ; (b) Assemblage échantillon + hygro-bouton.....	135
<b>Figure 5.6:</b> Scénario hygrothermique de validation .....	135
<b>Figure 5.7:</b> Comportements hygrothermiques des assemblages de BTC8 – 0 .....	137
<b>Figure 5.8:</b> Comportements hygrothermiques des assemblages de BTC8 – 1 .....	137
<b>Figure 5.9:</b> Comparaison entre les comportements hygrothermiques expérimentaux et simulés du BTC8 – 0.....	138
<b>Figure 5.10:</b> Comparaison entre les comportements hygrothermiques expérimentaux et simulés du BTC8 – 1 .....	138
<b>Figure 5.11:</b> Représentation 3D dans WUFI du bureau surveillé .....	139
<b>Figure 5.12:</b> Variation de la teneur en eau des BTC en argile – paille de chiendent en fonction de l'humidité relative .....	141
<b>Figure 5.13:</b> Comparaison entre les données météorologiques mesurées sur site et celles générées par Meteororm ; (a) Température ; (b) Température Meteororm ajustée ; (c) Humidité relative ; (d) Rayonnement solaire global .....	145
<b>Figure 5.14:</b> Variation de la température intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 1 .....	146
<b>Figure 5.15:</b> Variation de l'humidité relative intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 1 .....	146
<b>Figure 5.16:</b> Variation de la température intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 2. ....	147
<b>Figure 5.17:</b> Variation de l'humidité relative intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 2. ....	147
<b>Figure 5.18:</b> Comparaison entre les données de température et d'humidité relative entre les simulations hygrothermiques et thermiques avec les enveloppes (a) conventionnelle ; (b) BTC8 – 0 ; (c) BTC8 – 0,5 ; (d) BTC8 – 1 .....	150
<b>Figure 5.19:</b> Impact de l'inertie thermique sur les conditions thermiques de l'ambiance intérieure.....	152

<b>Figure 6.1:</b> Les différentes étapes de production des BTC8_Bel – 1.....	157
<b>Figure 6.2:</b> Vue d'ensemble du laboratoire Jacques Geelen .....	158
<b>Figure 6.3:</b> Plan du rez de chaussée du laboratoire Jacques Geelen sans son extension .....	158
<b>Figure 6.4:</b> Instrumentation des parois en BTC8_Bel – 1 et en blocs de béton creux .....	159
<b>Figure 6.5:</b> Schéma descriptif de l'installation .....	160
<b>Figure 6.6:</b> Cellules .....	160
<b>Figure 6.7:</b> Schéma descriptif de l'instrumentation d'une paroi testée.....	161
<b>Figure 6.8:</b> Scénario de température et d'humidité relative de l'air extérieur .....	162
<b>Figure 6.9:</b> Scénario de gains internes sur une semaine.....	162
<b>Figure 6.10:</b> Comparaison entre les températures et humidités de consigne et celles mesurées dans la cellule de BTC8_Bel – 1 .....	163
<b>Figure 6.11:</b> Conditions hygrothermiques dans les différentes enceintes au cours des tests	164
<b>Figure 6.12:</b> Evolution de la température à travers la paroi BTC8_Bel – 1.....	165
<b>Figure 6.13:</b> Evolution de la température à travers la paroi BBC.....	166
<b>Figure 6.14:</b> Evolution de température au sein des parois à des profondeurs de : (a) 12 cm ; (b) 10 cm ; (c) 6 cm ; (d) 0 cm .....	167
<b>Figure 6.15:</b> Taux d'amortissement et déphasage en fonction de la profondeur d'implantation des capteurs dans les parois.....	167
<b>Figure 6.16:</b> Evolution de l'humidité relative au sein des parois.....	168
<b>Figure 6.17:</b> Humidité relative de l'enceinte climatique au cours des deux tests .....	169
<b>Figure 6.18:</b> Thermomètre à globe noir .....	170
<b>Figure 6.19:</b> Comparaison entre les températures opératives obtenues avec les deux parois	170
<b>Figure 6.20:</b> Energies de refroidissement pendant les tests .....	171

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1:</b> Valeurs de DCS et WCS requise pour différentes utilisations des BTC ( <i>Compressed earth blocks standards</i> , 1998) .....	17
<b>Tableau 1.2 :</b> Détermination de l'indice d'érosion d'un matériau en terre par les méthodes de Geelong et de pulvérisation (NZS, 1998).....	19
<b>Tableau 1.3 :</b> Normes prenant en compte les tests d'érosion par goutte à goutte (Geelong) et/ou par pulvérisation (Cid-Falceto et al., 2012).....	19
<b>Tableau 1.4 :</b> Quelques équations d'ajustement des isothermes de sorption (Bui et al., 2017) .....	26
<b>Tableau 1.5:</b> Outils de simulation HAM et BES .....	36
<b>Tableau 1.6 :</b> Echelle de sensation thermique .....	40
<b>Tableau 1.7 :</b> Equations de confort adaptatif dans les bâtiments .....	46
<b>Tableau 2.1:</b> Composition des éprouvettes .....	57
<b>Tableau 2.2:</b> Taille et nombre d'échantillons par type essai.....	58
<b>Tableau 2.3 :</b> Propriétés physiques des matières premières.....	63
<b>Tableau 2.4:</b> Variation dimensionnelle des BTC en argile – paille de chiendent.....	68
<b>Tableau 2.5:</b> Propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des BTC en argile – paille de chiendent .....	74
<b>Tableau 3.1:</b> Propriétés thermiques des différentes formulations de BTC argile – paille de chiendent à 40% d'humidité relative.....	91
<b>Tableau 3.2:</b> Paramètres d'ajustement des isothermes de sorption.....	99
<b>Tableau 3.3:</b> Autres propriétés hygriques des BTC argile – paille de chiendent.....	101
<b>Tableau 3.4:</b> Propriétés physiques, mécaniques, hygrothermiques et de durabilité des BTC en argile – paille de chiendent.....	103
<b>Tableau 4.1:</b> Spécifications techniques des appareils de mesure.....	108
<b>Tableau 4.2 :</b> Consommation énergétique des appareils de bureau .....	110
<b>Tableau 4.3:</b> Informations sur les participants .....	115
<b>Tableau 4.4:</b> Echelle à sept points de l'ASHRAE .....	116
<b>Tableau 4.5:</b> Spécifications techniques des instruments .....	116
<b>Tableau 4.6:</b> Analyse statistique de l'ACM.....	122
<b>Tableau 5.1:</b> Propriétés thermo-physiques des différentes couches composants les parois du bureau .....	129
<b>Tableau 5.2:</b> Propriétés physiques et hygrothermiques des enveloppes .....	141
<b>Tableau 5.3:</b> Gains internes.....	143
<b>Tableau 6.1:</b> Comparaison entre les propriétés géotechniques des argiles de Zogbodomey et d'Andenne .....	156

## Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$a$	Diffusivité thermique	$m^2/s$
$a_j$	Paramètre d'ajustement du modèle GAB	—
$aPMV$	Vote moyen prévisible adaptatif	—
$b_m$	Effusivité de l'humidité	$kg/m^2.Pa.s^{1/2}$
$b_j$	Paramètre d'ajustement du modèle GAB	—
$C$	Densité de flux de chaleur par convection	$W/m^2$
$Ca$	Coefficient d'abrasion	$cm^2/g$
$C_b$	Coefficient d'absorption d'eau	$g/cm^2.min^{0,5}$
$C_p$	Capacité thermique massique	$J/kg.K$
$CPMV$	Vote moyen prévu corrigé	—
$C_v$	Concentration molaire de vapeur	$mol/m^3$
$CV(RMSE)$	Coefficient de variation de l'erreur moyenne quadratique (Coefficient of Variation of Root Mean Square Error)	%
$d$	Diamètre des pores	$m$
$D_c$	Coefficient de diffusion moléculaire	$m^2/s$
$D_K$	Coefficient de diffusion de Knüdsen	$m^2/s$
$D_w$	Diffusivité de l'humidité	$m^2/s$
$D(\tau_c)$	Fonction adimensionnelle de temps spécifique	—
$DCS$	Résistance à la Compression Sèche (Dry Compressive Strength)	$MPa$
$e$	Épaisseur	$m$
$E$	Effusivité thermique	$J/K.m^2.s^{1/2}$
$e_a$	Épaisseur de la couche d'air	$m$
$e_p$	Facteur d'espérance	—
EMC	Teneur en humidité d'équilibre (Equilibrium Moisture Content)	% $kg/kg$
EMPD	Profondeur de pénétration effective de l'humidité (Effective Moisture Penetration Depth)	$cm$
$f_{cl}$	Facteur de la zone vestimentaire	—
$F_{sa}$	Facteur de tolérance spécial (lighting special allowance factor)	—
$F_{ul}$	Facteur d'utilisation (lighting use factor)	—
$fit$	Coefficient de qualité de l'ajustement	%
$G$	Pente de droite de régression entre masse et temps de pesée	$kg/s$
$h_c$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W/m^2.C$
$h_l$	Enthalpie massique de l'eau liquide	$J/kg$
HR	Humidité relative	%
$\Delta h_{vap,eau}$	Enthalpie spécifique d'évaporation de l'eau	$J/g$

$I_{cl}$	Vêtture	<i>clo</i>
$I_0$	Fonction de Bessel modifiée	—
$j_a$	Densité de flux massique d'air sec	$kg.m^2/s^1$
$j_{cond}$	Densité de flux de chaleur par conduction	$W/m^2$
$j_l$	Densité de flux massique du liquide	$kg/m^2.s$
$j_m$	Densité de flux massique totale	$kg/m^2.s$
$j_q$	Densité totale de flux de chaleur	$W/m^2$
$j_v$	Densité de flux massique de vapeur d'eau	$kg/m^2.s$
$K$	Perméabilité à l'air de l'échantillon	$m^2$
$K_b$	Constante de Boltzmann	$kg.m^2/s^2.K^1$
$k_f$	Coefficient d'infiltration totale	$kg/m.s.Pa$
$k_{fl}$	Coefficient d'infiltration liquide	$kg/m.s.Pa$
$k_{fv}$	Coefficient d'infiltration de vapeur d'eau	$kg/m.s.Pa$
$k_l$	Conductivité hydraulique	$kg/m.s.Pa$
$L$	Charge thermique du corps humain	$W/m^2$
$l_0$	Distance initiale entre les plots	<i>mm</i>
$l_1$	Distance entre les plots après mouillage	<i>mm</i>
$l_2$	Distance entre les plots après séchage	<i>mm</i>
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation	<i>J/kg</i>
$\Delta l_c/l$	Amplitude de variation dimensionnelle entre les états conventionnels extrêmes	<i>mm/m</i>
$\Delta l_g/l$	Amplitude de gonflement conventionnel	<i>mm/m</i>
$\Delta l_r/l$	Amplitude de retrait conventionnel	<i>mm/m</i>
$m$	Masse	<i>g</i>
$M$	Taux métabolique du corps humain	$W/m^2$
$M_1$	Masse molaire de l'eau	<i>g/mol</i>
$M_{dry}$	Masse sèche	<i>kg</i>
$M_{sat.air}$	Masse humide de l'échantillon dans l'air	<i>kg</i>
$M_{sat.wat}$	Masse de l'échantillon dans l'eau	<i>kg</i>
$\dot{m}_{eau,vap}$	Gain d'humidité	<i>g/s</i>
$MBV_{ideal}$	Valeur tampon théorique d'humidité (ideal Moisture Buffer Value)	$g/m^2.\%RH$
$n$	Quantité	—
$N$	Nombre de données	—
$N_A$	Nombre d'Avogadro	$mol^{-1}$
$N_c$	Taux de diffusion de l'humidité moléculaire	$mol/m^2.s$
$N_K$	Taux de diffusion de l'humidité de Knüdsen	$mol/m^2.s$
$NMBE$	Erreur de biais moyenne normalisée (Normalised Mean Bias Error)	<i>%</i>
$p$	Pression	<i>Pa</i>
$p_0$	Pression atmosphérique	<i>Pa</i>
$P_0$	Puissance de sortie de la sonde	<i>W</i>

$p_a$	Pression d'air	$Pa$
$p_c$	Pression capillaire	$Pa$
$P_{el}$	Puissance électrique des luminaires	$W$
$p_l$	Pression de l'eau liquide	$Pa$
$p_{sat}$	Pression de saturation de vapeur d'eau	$Pa$
$p_v$	Pression de vapeur d'eau	$Pa$
$p_{va}$	Pression de la vapeur d'eau de l'air ambiant	$kPa$
$\bar{p}$	Pression moyenne	$Pa$
$PMV$	Vote moyen prédit (Predicted Mean Vote)	–
$PMVe$	Vote moyen prédit étendu	–
$PMV_{new}$	PMV adapté à la région du Sud Bénin	–
$PPD$	Predicted Percentage Dissatisfied	%
$\Delta p$	Différence de pression	$Pa$
$Q$	Flux d'air traversant l'échantillon	$m^2/s$
$\dot{q}_{ec}$	Gain de chaleur interne dû à l'éclairage	$W$
$\dot{q}_{latent}$	Gain de chaleur latente	$W$
$r$	Rayon de la source annulaire la plus extérieure de la sonde de conductivité thermique	$m$
$R$	Constante des gaz parfaits	$J/mol.K$
$R_1$	Densité de chaleur transférée par rayonnement infrarouge entre l'homme et son environnement	$W/m^2$
$R_2$	Charge thermique du rayonnement solaire humain par surface corporelle	$W/m^2$
$R_{cl}$	Résistance thermique du vêtement	$m^2.°C/W$
$R^2$	Coefficient de détermination	–
$RSS$	Somme résiduelle des carrés (Residual Sum of Squares)	–
$s$	Fonction objective de la méthode des moindres carrés pondérés	–
$S$	Surface	$cm^2 ; m^2$
$S_E$	Erreur standard de l'estimation	–
$S_{GAB}$	Surface spécifique de l'échantillon	$m^2$
$S_w$	Surface d'une molécule d'eau adsorbée	$m^2$
$t$	Durée	$s ; min$
$T$	Température	$K$
$T_0$	Température de référence	$K$
$t_a$	Température de l'air	$°C$
$T_c$	Température de confort	$°C$
$t_{cl}$	Température moyenne de la surface extérieure du corps vêtu	$°C$
$T_{od}$	Température moyenne quotidienne de l'air extérieur	$°C$
$t_p$	Période	$s$
$T_{rm}$	Température extérieure moyenne courante	$°C$
$t_r$	Température radiante moyenne	$°C$

$t_{sk}$	Température cutanée moyenne	$^{\circ}C$
$\Delta T_s(\tau)$	Gradient de température à la surface des échantillons	$K$
$u$	Teneur en eau massique	$kg/kg$
$U$	Incertitude étendue	–
$u_a$	Teneur en air sec du matériau	$kg/m^3$
$u_A$	Incertitude de type A	–
$u_B$	Incertitude de type B	–
$W$	Taux de travail mécanique effectué par une personne	$W/m^2$
$w_i$	Poids des mesures expérimentales	–
$WCS$	Résistance à la Compression Humide (Wet Compressive Strength)	$MPa$
$Z$	Résistance à la vapeur d'eau	$m^2.s.Pa/kg$
<b>Symboles</b>		
<b>grecs</b>		
$\alpha$	Constante	–
$\varepsilon$	Porosité	%
$\eta$	Viscosité dynamique	$Pa.s$
$\delta$	Perméabilité à la vapeur de l'échantillon	$kg/m.s.Pa$
$\delta_a$	Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air	$kg/m.s.Pa$
$\xi$	Capacité de sorption	$kg/kg$
$\lambda$	Conductivité thermique	$W/m.K$
$\lambda_a$	Coefficient adaptatif	–
$\mu$	Facteur de résistance à la vapeur d'eau	–
$\varphi$	Humidité relative	%
$\Phi$	Humidité relative	–
$\rho$	Masse volumique	$kg/m^3$
$\rho_s$	Masse volumique sèche	$kg/m^3$
$\sigma$	Variable d'intégration	–
$\tau_c$	Temps caractéristique corrigé	$s$
$\theta$	Température	$^{\circ}C$



## Liste des sigles et abréviations

<b>Sigle ou abréviation</b>	<b>Désignation</b>
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ACM	Adaptative Comfort Model
BBC	Bloc de Béton Creux
BEMS	Building Monitoring Energy and Simulation
BTC	Bloc de Terre Comprimé
$BTC_8 - 0$	Bloc de Terre Comprimé stabilisé avec 8% de ciment et contenant 0% de paille de chiendent
$BTC_8 - 0,5$	Bloc de Terre Comprimé stabilisé avec 8% de ciment et contenant 0,5% de paille de chiendent
$BTC_8 - 1$	Bloc de Terre Comprimé stabilisé avec 8% de ciment et contenant 1% de paille de chiendent
$BTC_8 - 1,5$	Bloc de Terre Comprimé stabilisé avec 8% de ciment et contenant 1,5% de paille de chiendent
$BTC_8 - 1,75$	Bloc de Terre Comprimé stabilisé avec 8% de ciment et contenant 1,75% de paille de chiendent
$BTC_8 - 2$	Bloc de Terre Comprimé stabilisé avec 8% de ciment et contenant 2% de paille de chiendent
$BTC_{8-Bel} - 1$	Bloc de Terre Comprimé stabilisé avec 8% de ciment et contenant 1% de paille de chiendent (réalisé avec les matières premières belges)
CBE	Center for the Built Environment
DVS	Dynamic Vapor Sorption
GAB	Guggenheim-Anderson-De Boer
HAM	Heat Air and Moisture
HR	Humidité Relative
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
LEMHaD	Laboratoire d'Eco-Matériaux et Habitats Durables
LMC	Laboratoire des Matériaux de Construction
MBV	Moisture Buffer Value
OSB	Oriented Strand Board
PAG	Programme d'Actions du Gouvernement
SET	Standard Effective Temperature
SSS	Solutions Salines Saturées
TSV	Thermal Sensation Vote
VBS	Valeur au Bleu d'éthylène
VEB	Valorisation Energétique de la Biomasse
VG	Van Genuchten
VSA	Vapor Sorption Analyser
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär (chaleur et humidité transitoire)

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Le secteur des bâtiments représente le premier consommateur d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre dans le monde devant les secteurs de l'industrie et du transport. En 2019, 35% de la production mondiale d'énergie a été consommée par le secteur des bâtiments qui, en retour, a généré près de 40% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (UNEP, 2020). Une telle consommation s'explique par l'utilisation excessive des systèmes de Chauffage, de Ventilation et de Climatisation pour assurer un environnement confortable aux occupants. En tenant compte de l'évolution démographique et des effets du changement climatique, cette consommation sera en constante évolution dans les années à venir. Pour preuve, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit une augmentation de 50% de la consommation énergétique mondiale dans le secteur de bâtiments à l'horizon 2050 si des mesures pertinentes d'amélioration de l'efficacité énergétique de bâtiments ne sont pas prises (Chai & Fan, 2022). Cette consommation, dominée actuellement par les besoins de chauffage devrait être rééquilibrée dans les prochaines années. A l'horizon 2100, Wilhelm A Friess & Rakhshan (2017) prévoient une baisse de 34% des besoins énergétiques pour le chauffage, contre une augmentation de 72% pour le refroidissement, ce qui laisse présager un réchauffement rapide de l'ensemble de la planète avec des conséquences dévastatrices dans les régions chaudes telle que l'Afrique subsaharienne. Selon le dernier rapport des Nations Unies sur l'état du climat en Afrique (Organisation météorologique mondiale, 2020), le continent africain se réchauffe relativement plus vite que le reste de la planète avec des conséquences déjà visibles. Par exemple, l'année 2020 a été marquée par d'importantes inondations, des glissements de terrain, l'augmentation du niveau de la mer, des sécheresses et surtout l'élévation continue de la température (Organisation météorologique mondiale, 2020). L'urgence actuelle n'est plus seulement de lutter contre la hausse planétaire de la température, mais surtout de trouver des solutions pertinentes et adéquates à l'adaptation des personnes aux conséquences du réchauffement climatique.

A cet effet, l'AIE a exprimé sa vive préoccupation face à la lenteur de la transition énergétique. Selon l'institution, la neutralité carbone ne sera atteinte à l'horizon 2050 que si les investissements dans les énergies vertes sont triplés. Or 40% de ces investissements peuvent être autofinancés par l'adoption des mesures d'efficacité énergétique. En d'autres termes, l'efficacité énergétique est au cœur de la lutte et de l'adaptation aux changements climatiques. Cette stratégie, appliquée au secteur des bâtiments réduirait considérablement la consommation énergétique du secteur et son impact environnemental. Bien que des efforts louables soient faits dans ce sens (fabrication et utilisation des équipements d'éclairage et de conditionnement économes, optimisation de la performance par intégration des énergies renouvelables), la réduction durable des consommations énergétiques se fait toujours attendre. D'où la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en adoptant des mesures complémentaires pour une meilleure performance énergétique.

Outre l'esthétique, un bâtiment sera principalement jugé en fonction du niveau de confort qu'il offre à ses occupants et de sa performance énergétique. En effet, la performance énergétique d'un bâtiment traduit la qualité de sa consommation énergétique (S. Wang et al., 2012). Elle

peut être définie par l'interaction de six facteurs que sont : le climat, l'enveloppe du bâtiment, les services énergétiques du bâtiment, son fonctionnement, le comportement des occupants et la qualité de l'environnement intérieur fourni (Energy in Buildings and Communities, 2016). Ceci étant, Horne & Hayles (2008) affirment que la performance énergétique de l'enveloppe et sa durabilité sont les facteurs les plus importants dans la quête de performance énergétique optimale des bâtiments. Selon Hu & Yu (2019), l'énergie utilisée par les bâtiments est principalement dictée par le gain et/ou la perte d'énergie par les enveloppes des bâtiments. Certaines études estiment que plus de 60% de la charge thermique dans les bâtiments peut être liée aux transferts de chaleur à travers l'enveloppe (Chai & Fan, 2022; Halhoul et al., 2021; Homod et al., 2021; Qing Li et al., 2021; Shahcheraghian et al., 2021). Pour Homod et al. (2021), la consommation énergétique d'un bâtiment est principalement liée à la nature des matériaux qui constituent son enveloppe. Ainsi, Ahmadi et al. (2020) considèrent la performance thermique des matériaux de construction comme l'un des facteurs les plus importants dans la recherche d'économie d'énergie et de la protection de l'environnement. Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments revient donc à s'intéresser de près aux matériaux de construction.

En raison des besoins énergétiques énormes pour chauffer ou refroidir les bâtiments, il est évident que les matériaux conventionnels (comme le béton) utilisés actuellement pour la construction des bâtiments ne répondent pas au défi climatique auquel le monde est confronté. Plus encore, la fabrication de ces matériaux repose sur une utilisation intensive de ressources naturelle (le sable de construction) et synthétique (le ciment) dont la production a des effets néfastes sur l'environnement. D'ailleurs, en tant que deuxième ressource la plus utilisée après l'eau, le sable marin extrait pour la construction perturbe dangereusement l'écosystème et facilite l'érosion côtière à cause de son caractère non renouvelable. Associé à la fabrication très énergivore du ciment, il ne fait aucun doute que le recours excessif à ces matériaux pour la construction des bâtiments va à l'encontre des objectifs de développement durable. Pour ces faits, plusieurs études jugent nécessaire l'utilisation des éco-matériaux, notamment ceux en terre, pour réduire l'empreinte environnementale des bâtiments et améliorer leur efficacité énergétique (Aranda-Jimenez & Suarez-Dominguez, 2020; Aubert et al., 2016; Ben-Alon et al., 2019; Giroudon, Laborel-préneron, et al., 2019).

Autrefois utilisés dans la construction des bâtiments, puis délaissés après la seconde guerre mondiale pour des constructions en béton, les matériaux en terre suscitent à nouveau un regain d'intérêt. Leurs propriétés hygrothermiques très intéressantes, leur mise en œuvre très peu énergivore et leur grande disponibilité font d'eux des matériaux de construction écologiques et accessibles à tous. Pour Niroumand et al. (2017), la terre crue est un matériau de construction durable qui prend en compte les critères sanitaires, de confort thermique et économique. Selon Homod et al. (2021), les éco-matériaux sont la clé d'une bonne santé et de longévité. Ils représentent une solution efficace et durable dans l'amélioration de l'efficacité énergétique, du confort thermique et dans la réduction de l'impact environnemental du secteur des bâtiments.

La plupart des travaux liés aux matériaux en terre se concentrent principalement sur la caractérisation mécanique des éco-matériaux et leurs propriétés thermiques en occultant très souvent les propriétés hygriques de ces derniers. Cette tendance a été confirmée par les travaux

de Turco et al. (2021) qui, après avoir passé en revue 86 articles affirment que 77,8% de ces derniers étaient consacrés à la caractérisation mécanique des éco-matériaux contre 33,3% qui se sont intéressés à leurs propriétés thermiques et 0% à leurs propriétés hygriques. Et pourtant, ces matériaux sont pour la plupart hygroscopiques. Ils possèdent donc la capacité de réguler sans aucun apport d'énergie, l'humidité relative à l'intérieur des bâtiments et par conséquent limiter leur consommation énergétique. En effet, l'humidité de l'air a une influence bien connue sur la performance énergétique (Benkhaled et al., 2022; Choi et al., 2021; Hamdaoui et al., 2021; Rafidiarison & Nicolas, 2013), la qualité de l'air intérieur (Ferroukhi et al., 2016; Kwiatkowski et al., 2009; Steeman et al., 2010), le confort thermique et la durabilité (Janssen, 2014) des bâtiments. Un environnement intérieur trop humide provoque l'apparition de moisissures sur les parois, une gêne auprès des occupants (allergies, difficultés respiratoires, etc.) et une surconsommation des systèmes CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation). Cependant, Qin & Yang (2016) affirment que de l'énergie peut être économisée si une caractérisation (par la modélisation) précise du transfert couplé de chaleur et de masse à travers l'enveloppe hygroscopique est réalisée. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments par utilisation de matériaux biosourcés (hygroscopiques) impose donc la prise en compte du transfert hygrothermique au sein de ce type d'enveloppe. Une telle approche assure une estimation précise des conditions hygrothermiques intérieures, un choix optimal des systèmes CVC et contribue à l'évaluation réelle du niveau de confort intérieur (Künzel et al., 2008).

Par ailleurs, l'évaluation précise du confort thermique joue un rôle important dans le bien-être des personnes, mais également dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Cui et al. (2013) affirment que l'évaluation du confort thermique intérieur est cruciale pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Z. Wu et al. (2019) affirment que la plupart des études liées à l'efficacité énergétique des bâtiments se concentrent sur l'analyse des économies d'énergie des bâtiments et des systèmes CVC au détriment d'une évaluation concrète du niveau de confort réellement recherché par les occupants, ce qui peut conduire à d'importants gaspillages énergétiques. En effet, la quête indispensable du confort thermique dans les bâtiments exerce une pression énorme sur la consommation d'énergie à cause de l'utilisation des systèmes CVC. D'ailleurs, Nasrollahzadeh (2021) estime qu'environ 30% de la consommation totale d'énergie à travers le monde est dédiée à ces systèmes. Cette consommation dépasse largement les 50% dans le secteur des bâtiments (Z. Wu et al., 2019). Ainsi, une optimisation efficace de la consommation énergétique des bâtiments, passe également par une évaluation correcte du niveau de confort thermique recherché par les occupants. Outre le volet énergétique, le confort thermique influence le bien-être des personnes et leur productivité. Un environnement inconfortable peut entraîner des maux de tête, de gorge, la fatigue, le manque de concentration, etc. Maykot et al. (2018) mettent ainsi en évidence l'importance de l'étude du confort thermique dans les bâtiments de bureaux aussi bien pour les économies d'énergie, mais surtout pour améliorer la productivité des personnes. Cette action combinée du confort sur le bien-être des personnes et la performance énergétique des bâtiments justifie alors le fort intérêt porté par la communauté scientifique à cette thématique.

Pour toutes ces raisons, il est primordial de proposer des solutions durables pour une amélioration effective de l'efficacité énergétique des bâtiments et du confort thermique de ses occupants. C'est à cela qu'ont été consacrés nos travaux de thèse centrés sur l'utilisation des matériaux biosourcés pour une amélioration combinée de l'efficacité énergétique et du confort thermique dans les bâtiments, en particulier les bâtiments de bureau.

## **Contexte et objectifs de l'étude**

Les statistiques publiées par la Direction Générale des Ressources Energétiques du Bénin (DGRE, 2021) montrent que le secteur des bâtiments a consommé 68,53% de l'énergie électrique fournie au pays en 2020 dont 31,32% consommée par les bâtiments de bureaux et services. Une telle consommation par les bâtiments de bureaux peut s'expliquer par un usage important des systèmes de climatisation, preuve de la mauvaise performance énergétique des enveloppes de ces bâtiments. Il paraît donc évident que les matériaux conventionnels de construction utilisés (brique, mortiers, et béton en ciment) ne sont pas adaptés aux spécifications climatiques de la région. Plus encore, ces matériaux ont un impact négatif sur les plans environnemental et socioéconomique. Fort de ces constats, des recherches ont été menées pour développer des matériaux de construction écologiques avec de meilleures performances thermiques. C'est ainsi que Labintan et al. (2019) procèdent à la caractérisation thermo-physique et mécanique du banco (composite de terre argileuse, de tige de riz et de néré) traditionnellement utilisé dans les constructions rurales. Ils en sont arrivés à la conclusion que le matériau étudié peut être utilisé pour la construction de bâtiments avec de meilleures performances thermiques. En associant de la sciure de bois à de la terre comprimée, Toukourou et al. (2016) observent une amélioration de la performance d'isolation thermique. Il en est de même pour le BTC contenant du kénaf mis en œuvre par Laibi et al. (2018). Agossou et al. (2022) ont quant à eux étudié la mise en œuvre d'une dalle à corps creux en béton latéritique armé de bois de palmyre et de rotin. Plusieurs autres études ont abouti au développement et caractérisation d'autres éco-matériaux tels que les blocs d'argile cuite contenant des cendres de bois (Milohin et al., 2018), du polystyrène expansé (Anjorin et al., 2018) et de particules de verre (Milohin et al., 2017) ; le composite argile – paille de riz (Labintan et al., 2019) ; le béton compacté contenant de la latérite et des déchets de verre (Christian et al., 2020).

Parmi tous les travaux cités, aucun éco-matériau développé n'a subi une caractérisation complète, c'est à dire la détermination simultanée de l'ensemble des propriétés physiques, thermiques, hygriques, mécaniques et de durabilité. Plus encore, seuls les travaux de (Houngan et al., 2015) se sont intéressés au comportement hygrique de l'éco-matériau mis en œuvre. Or ces matériaux de construction sont censés être utilisés au Bénin où règne principalement un climat tropical humide. Tout ceci justifie donc la non-vulgarisation des éco-matériaux développés dans le pays pour la construction de bâtiments durables.

Aussi, l'absence de normes de confort thermique spécifiques au pays ou à la région conduit à une utilisation abusive des systèmes de climatisation, notamment dans les bâtiments de bureaux. Pour exemple, le guide d'efficacité énergétique du Bénin recommande un fonctionnement des bureaux à une température de 24,5°C (Direction Générale de l'Energie Bénin & ECONOLER, 2011). Une telle température est jugée relativement basse pour des personnes vivant dans des

régions chaudes et humides comme le Sud Bénin. Pour preuve, (Jowkar et al., 2020), suite à une enquête de confort sur 3452 étudiants au Royaume-Uni, ont montré que les personnes enquêtées ayant un historique thermique chaud étaient moins tolérantes aux températures intérieures relativement basses que les personnes ayant un passé climatique similaire à celui du Royaume-Uni. Par exemple, une étude de confort réalisée par Olissan et al. (2016) dans le Sud Bénin a montré que les personnes enquêtées étaient plus favorables à des températures relativement élevées. Ainsi, rechercher une température de 24,5°C dans un bâtiment, même avec une enveloppe biosourcée conduirait probablement à un gaspillage énergétique, d'où la nécessité d'une étude de confort.

Ainsi, pour répondre aux aspirations de bien-être et d'économie d'énergie dans les bâtiments, notre étude se consacre principalement à l'évaluation du comportement hygrothermique d'une enveloppe biosourcée en argile – paille de chiendent sur le confort et la consommation énergétique d'un bâtiment de bureaux situé dans la ville de Cotonou au Bénin.

De façon spécifique, il sera question de :

- concevoir un composite biosourcé argile – paille de chiendent et de déterminer ses propriétés hygrothermiques, mécaniques et de durabilité ;
- évaluer le confort thermique dans un bâtiment de bureaux (bâtiment d'étude) situé au sud du Bénin ;
- étudier l'influence du transfert couplé de chaleur et de masse à travers l'enveloppe en argile – paille de chiendent sur les conditions de confort thermique et la consommation énergétique du bâtiment d'étude.

Pour se faire, l'étude a été subdivisée en 6 chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art sur le rôle de l'enveloppe et des éco-matériaux en terre biosourcée, sur le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments. Le chapitre 2 quant à lui se consacre à la mise en œuvre et la caractérisation de l'éco-matériau en argile – paille de chiendent. Dans ce chapitre, la technique de fabrication en terre la mieux adaptée à la mise en œuvre du matériau a été identifiée, suivie d'une étude de ses propriétés physiques, mécaniques et de durabilité. Les performances hygrothermiques du matériau ont par la suite été évaluées dans le chapitre 3. Dans le chapitre 4, il a été question de déterminer les conditions de confort réellement souhaitées par les occupants du bâtiment témoin afin d'en faire des éléments de référence dans la suite de l'étude. Sur la base de ces résultats, les performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes en argile – paille de chiendent ont été évaluées à travers des simulations dans le chapitre 5. Ainsi, l'importance du couplage des transferts de chaleur et d'humidité à travers les enveloppes hygroscopiques a été mise en évidence. Pour finir, le chapitre 6 retrace les expérimentations effectuées en chambre climatique pour une analyse comparative des performances hygrothermiques et énergétiques de deux parois en argile – paille de chiendent et en blocs de béton creux.

# CHAPITRE 1

## Revue de littérature

---

Introduction .....	7
1.1 Efficacité énergétique et enveloppe du bâtiment.....	7
1.2 Rôle des éco-matériaux dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments .....	12
1.3 Choix d'une technique de construction en terre .....	14
1.4 Caractérisation structurelle et hygrothermique des BTC biosourcées.....	16
1.5 Mécanisme de transfert hygrothermique à travers un matériau hygroscopique .....	29
1.6 Modélisation physique du transfert couplé de chaleur et de masse.....	34
1.7 Etude du confort hygrothermique dans les bâtiments .....	37
Conclusion.....	48

# 1. REVUE DE LITTÉRATURE

---

## Introduction

De nos jours, l'énergie est au centre de toutes les attentions en raison de sa production qui génère d'importantes quantités de gaz à effet de serres (GES) dans l'atmosphère. Dans ce contexte, le secteur des bâtiments se positionne comme le plus grand consommateur d'énergie avec une consommation estimée à près de 35% de la production mondiale et une émission de GES de l'ordre de 40% (UNEP, 2020). Ainsi, face aux séquences du réchauffement climatique de la planète, il urge de trouver des solutions pertinentes pour limiter l'impact de ce secteur sur l'environnement. L'efficacité énergétique représente donc l'une des meilleures stratégies pour assurer le développement durable de la planète. Elle consiste à réduire la consommation énergétique des bâtiments sans compromettre le bien-être des occupants. Or dans la plupart des bâtiments, le confort des occupants est principalement assuré par les systèmes CVC. Selon Shamsi et al. (2020), ces systèmes consomment plus de 60% de l'énergie totale des bâtiments. Le défi serait donc de limiter la consommation de ces appareils et dans le meilleur des cas de s'en passer. Pour ce faire, une attention particulière doit être portée aux principaux facteurs affectant le fonctionnement de ces systèmes. Il s'agit notamment de la performance énergétique de ces propres systèmes, du comportement des occupants par rapport à l'utilisation de ces appareils, de la qualité recherchée de l'ambiance intérieure, du climat et de l'enveloppe du bâtiment. Parmi ces éléments, l'enveloppe du bâtiment est considérée comme le facteur le plus impactant dans la consommation énergétique des systèmes CVC (Chai & Fan, 2022; Halhoul et al., 2021; Homod et al., 2021; Qing Li et al., 2021; Shahcheraghian et al., 2021).

Ainsi, le présent chapitre passe en revue différents travaux scientifiques réalisés sur l'enveloppe des bâtiments en vue d'améliorer leur efficacité énergétique et le confort hygrothermique des occupants. Les solutions proposées dans la littérature, allant des technologies les plus innovantes aux constructions en terre, ont été présentées. Cependant, l'accent a été mis sur les constructions en terre en raison de leur aspect écologique et de leur accessibilité. Les différentes techniques de construction en terre de même que les méthodes de détermination des propriétés mécaniques, hygrothermiques et de durabilité de ces types de matériau y sont abordées. Pour finir, l'évaluation du confort thermique dans les bâtiments a été analysée suivant différentes approches.

### 1.1 Efficacité énergétique et enveloppe du bâtiment

L'efficacité énergétique des bâtiments peut être définie comme étant la réduction de la consommation énergétique par élimination de l'utilisation inutile de l'énergie, sans toutefois compromettre la bonne fonctionnalité du bâtiment. Elle est indispensable pour limiter l'impact du secteur des bâtiments sur l'environnement. Elle peut être appliquée et améliorée en adoptant les quatre (4) approches que voici :

- l'utilisation d'équipements économes en énergie ;
- l'optimisation des performances opérationnelles grâce à des contrôles, une détection et un diagnostic optimal ;



- la conception ou la rénovation d'enveloppes thermiquement performantes ;
- la sensibilisation des occupants pour une utilisation efficace de l'énergie.

Dans la présente étude, l'attention ne sera portée que sur l'enveloppe du bâtiment pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. A ce sujet, bon nombre de travaux ont été identifiés dans la littérature. Tout d'abord, Aslani et al. (2019) définissent l'enveloppe du bâtiment comme un séparateur physique entre les environnements extérieur et intérieur. Elle est le siège des transferts de chaleur et de masse entre les deux environnements. L'enveloppe a pour rôle de protéger les personnes et les biens contre les aléas du climat extérieur tels que la pluie, le vent, la chaleur, le bruit, etc. Elle se compose principalement des murs extérieurs, des fenêtres, des portes, du toit et du plancher (El-Darwish & Gomaa, 2017). En fonction de sa qualité, l'enveloppe a un impact direct sur le confort des occupants et les besoins énergétiques du bâtiment. D'ailleurs, Tian et al. (2021) considèrent les enveloppes de bâtiments comme des systèmes passifs dont dépendent les demandes de chauffage et de refroidissement, les coûts de construction et la consommation d'énergie opérationnelle des bâtiments. Une enveloppe mal conçue (choix des matériaux, ponts thermiques, etc.) engendre une ambiance intérieure inconfortable et des dépenses énergétiques excessives. Pour cela, Friess & Rakhshan (2017a) proposent un certain nombre de mesures passives liées à l'enveloppe pour l'amélioration de l'efficacité énergétique lors de la conception ou la rénovation des bâtiments. A travers cette étude, il a été montré que plus de 20% d'économie d'énergie pouvait être réalisée par isolation de l'enveloppe dans les bâtiments. Cette économie pourrait atteindre les 55% avec une bonne orientation et l'utilisation des fenêtres en double vitrage. Sur huit stratégies passives de réduction de la consommation, Taleb (2014) en a appliqué six liées à l'enveloppe du bâtiment (isolation thermique des murs, double vitrage, dispositifs d'ombrages, toitures vertes, etc.) et a obtenu une économie moyenne de 23% de la consommation énergétique. Friess et al. (2012) se sont quant à eux concentrés sur l'élimination des ponts thermiques par l'isolation des enveloppes de villas dans la région chaude et humide de Dubaï. En appliquant 50 mm de polystyrène expansé sur les parois opaques, une réduction de 23,3% de la charge thermique à travers l'enveloppe a été obtenue. Dans une perspective de modernisation de l'enveloppe en vue de réduire la consommation énergétique, El-Darwish & Gomaa (2020) adoptent des stratégies similaires à celles précédemment citées et obtiennent jusqu'à 33% d'économie d'énergie.

Toujours pour répondre aux besoins d'économie d'énergie et de confort thermique intérieur, Ge et al. (2021) simulent sept (7) stratégies d'optimisation énergétique des enveloppes de bâtiment en fonction du comportement intermittent des occupants. En améliorant par exemple les performances thermiques de l'enveloppe, des économies d'énergie allant jusqu'à 37,3% peuvent être observées. Elles varient entre 9,6% et 47,6% lorsque l'étanchéité à l'air de l'enveloppe est améliorée. Dans le même sens, Hwang et al. (2021) proposent des stratégies de gestion thermique liées à la conception de l'enveloppe dans des salles de classe de Taiwan. En effectuant une analyse multi-objectifs avec les variables d'enveloppe (isolation des parois, ratio mur/fenêtre, dispositifs d'ombrage) d'une maison duplex, Nasrollahzadeh (2021) observe des améliorations de 36% de l'intensité d'utilisation de l'énergie, de 5% de l'éclairage par la lumière du jour et de 14% du pourcentage d'insatisfaction prévu (PPD). Des études similaires

ont également été identifiées dans la littérature, mais cette fois-ci, les auteurs n'ont recherché que l'optimisation du facteur de lumière du jour et de l'énergie (Fang & Cho, 2019; Motamedi & Liedl, 2017; Pilechiha et al., 2020), ou du confort thermique et de l'énergie (Amoruso et al., 2018), ou encore des confort thermique et visuel (Rizi & Eltaweel, 2021).

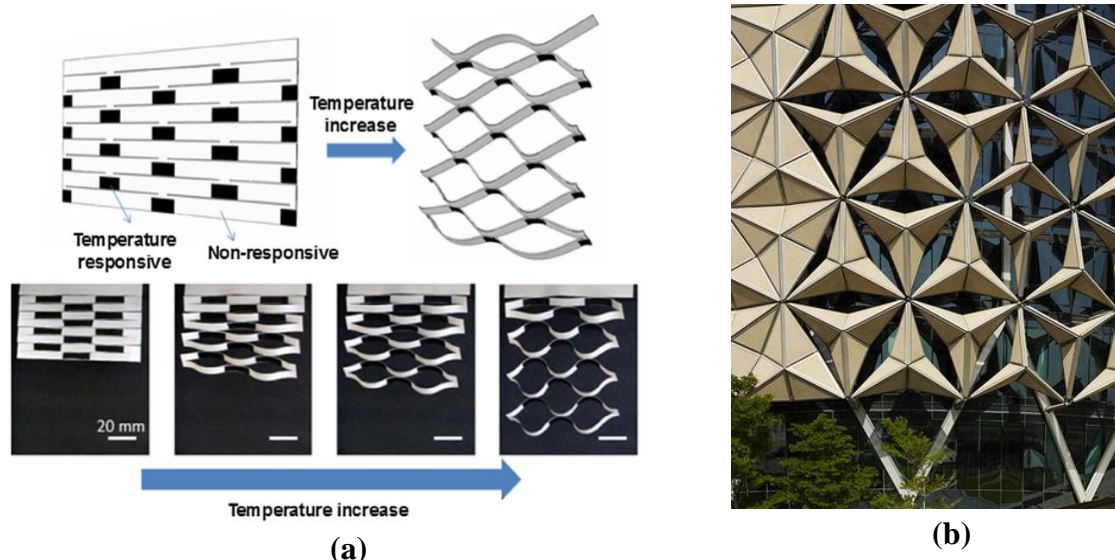
Pour associer l'évolution technologique à la recherche d'économie d'énergie dans les bâtiments à travers l'enveloppe, des matériaux et systèmes avancés ont été mis en œuvre pour une meilleure régulation de l'environnement thermique intérieur. A cet effet, Chai & Fan (2022) identifient deux stratégies principales de régulation de l'énergie thermique dans les bâtiments. La première concerne l'isolation de l'enveloppe du bâtiment avec des isolants et systèmes de haute performance et la seconde fait référence à l'usage de matériaux et systèmes avancés sur l'enveloppe du corps humain. En s'intéressant uniquement à la première stratégie, Friess & Rakhshan (2017), Sozer (2010) ont proposé l'utilisation de revêtements hautement réfléchissants sur les parois extérieures des bâtiments pour limiter le transfert de chaleur par rayonnement solaire à travers l'enveloppe. De l'aérogel a par ailleurs été utilisé par Baetens et al. (2011), Berardi (2018) pour améliorer considérablement l'isolation thermique des murs. D'autres matériaux et systèmes tels que les matériaux de refroidissement radiatif diurne (Jeong et al., 2020; Li et al., 2019), les matériaux à changement de phase (Faraj et al., 2020; Liu et al., 2018), les murs Trombe (Hu et al., 2017; Wang et al., 2020) ont également été développés. Dans la même dynamique, Y. Li et al. (2021) passent en revue les enveloppes écoénergétiques à changement de forme. Elles ont été conçues pour répondre de façon optimale aux variations climatiques du milieu extérieur dans le but d'améliorer les confort thermique et visuel des occupants et par conséquent, réduire la consommation énergétique des bâtiments. Les différentes enveloppes recensées par les auteurs ont été classées en deux grandes catégories. La première, composée des structures à façade dynamique conventionnelles (Figure 1.1), bio-inspirées (Figure 1.2), Kirigami/Origami (Figure 1.3) et de fenêtres intelligentes, concerne les structures à transformation de forme sans conversion d'énergie. La seconde catégorie quant à elle prend en compte les structures d'enveloppe à changement de forme avec récupération d'énergie solaire (figure 1.4). Au-delà des parois opaques de l'enveloppe, les systèmes d'isolation transparente ont été conçus pour augmenter la résistance thermique des vitrages (Paneri et al., 2019; Sun et al., 2018). Par exemple, Chai & Fan (2022) et El-Darwish & Gomaa (2017) proposent des fenêtres intelligentes pour contrôler le transfert du flux solaire à travers les vitrages. Ces fenêtres offrent la possibilité de moduler de façon dynamique la transmission des rayonnements solaires en fonction des besoins.



**Figure 1.1:** Façade avec système de protection solaire dynamique (Kolding Campus en Danemark)



**Figure 1.2:** Enveloppe bio-inspirée à architecture météo-sensible fondée sur le transfert biomimétique de l'actionnement hygroscopique des cônes végétaux (*Pinophyta*) (Reichert et al., 2015)



**Figure 1.3:** (a) Auto-actionnement de structures Kirigami programmables et adaptatives par différence de température (Kyu et al., 2018) ; (b) Tours al bahr à façade dynamique informatisée (structure Origami)



**Figure 1.4:** (a) Hilo à Dübendorf en Suisse, (b) façade solaire adaptative

Il ne fait aucun doute que ces différentes technologies améliorent l'efficacité énergétique des bâtiments ; mais en réalité, participent-elles véritablement à la durabilité du secteur des bâtiments ? Quels sont leurs réels impacts sur l'environnement ? Les techniques innovantes précitées sont-elles accessibles à la grande majorité de la population ? Par exemple, la réalisation des enveloppes intelligentes nécessite des technologies et matériaux avancés qui, en dépit des gains énergétiques effectifs et de l'esthétique exceptionnelles qu'ils offrent aux bâtiments, les rendent relativement coûteuses et peu accessibles. D'un autre côté, l'usage des isolants conventionnels tels que la laine de verre, le polystyrène expansé, etc, en dehors de l'énergie intrinsèque liée à leur fabrication, suscite la polémique autour de leur probable effet néfaste sur la santé. Pour preuve, Rakhshan et al. (2013) restent perplexes quant aux risques de santé encourus par les occupants des bâtiments isolés intérieurement avec du polystyrène expansé. D'autres études communiquent sur l'effet cancérigène du styrène sur la santé des occupants (Plastics Europe, 2012). Dans le même temps, d'autres travaux affirment que le



polystyrène expansé ne présente aucun risque pour la santé et est entièrement recyclable (EPS Packaging Group, 2012). Cependant Kremer (2003) souligne le temps mis par le polystyrène expansé pour se décomposer totalement dans l'environnement (environ 500 ans). Autant de préoccupations qui, associées à l'urgence climatique, ont poussé la communauté scientifique à intensifier les recherches dans le sens de la construction et la rénovation écologiques des bâtiments.

C'est ainsi que Al-Sallal et al. (2013) adoptent des techniques d'aménagement paysager telles que les palmiers, les arbres d'ornement et autres et des couvertures végétales en herbe pour une amélioration écologique de l'efficacité énergétique d'une villa résidentielle à Abu Dhabi. Selon les auteurs, des économies de 8% et 6% ont été obtenues respectivement sur les énergies de ventilation et de refroidissement par réduction de 18,4% des charges thermiques à travers le mur et de 31,4% à travers les fenêtres. Haggag et al. (2014) ont quant à eux testé l'utilisation des murs verts comme enveloppe de bâtiment dans une école à Al Ain aux Emirats Arabes Unis. Les résultats obtenus révèlent une différence de 5 à 13°C de la température diurne entre les murs nus et ceux végétalisés avec pour conséquence la réduction de la charge de climatisation d'environ 20%. Les recherches menées par Musy et al. (2017) sur l'impact de la végétation sur le confort des bâtiments ont révélé que les murs végétaux ont un effet direct favorable sur le confort d'ensemble des bâtiments non isolés tandis que l'effet des toits verts se limite principalement à l'étage supérieur. Cependant, les différentes approches précitées pour verdir le secteur des bâtiments ont un impact limité sur les économies d'énergie. Cela peut s'expliquer par le fait que ces solutions ne viennent généralement qu'en complément à des bâtiments initialement construits en matériaux conventionnels. Elles sont donc bénéfiques pour la rénovation écologique des bâtiments existants. Mais pour les nouvelles constructions, il est nécessaire de repenser l'enveloppe structurelle des bâtiments afin de répondre aux défis climatiques. Dans cette logique, les éco-matériaux, notamment ceux en terre, se présentent comme une solution durable dans la lutte et l'adaptation aux effets du changement climatique.

## **1.2 Rôle des éco-matériaux dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments**

Dans le manuel des bâtiments (*Manuel des bâtiments « Les Bâtiments : efficacité énergétique et énergies renouvelables »*), l'efficacité énergétique est définie comme étant toute action agissant positivement sur la consommation de l'énergie, quelle que soit l'activité du secteur considéré, et tendant à :

- la gestion optimale des ressources énergétiques ;
- la maîtrise de la demande énergétique ;
- l'utilisation rationnelle de l'énergie ;
- l'augmentation de la compétitivité de l'activité économique ;
- la maîtrise des choix technologiques d'avenir économiquement viable.

A ce titre, l'utilisation des éco-matériaux pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments représente un défi technologique durable et économiquement viable. En effet, les éco-matériaux sont définis comme étant des matériaux contribuant à la réduction de l'impact environnemental lié aux activités humaines (Verne & Innovantes, 2009). Pour qu'un matériau soit alors considéré comme écologique et pouvant être utilisé dans l'écoconception des

bâtiments, Peuportier (2003) et Cripps (2004) ont défini quatre critères auxquels ce dernier doit répondre ; à savoir :

- limiter les impacts environnementaux durant tout son cycle de vie ;
- procurer des conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation ;
- ne présenter aucun danger pour la santé, tant pendant la phase de mise en œuvre que d'utilisation du bâtiment ;
- apporter un bénéfice économique et social.

Bon nombre de matériaux ont alors été spécifiquement développés et étudiés pour contribuer à l'écoconception des bâtiments. La terre étant un matériau peu coûteux, écologique, abondamment disponible et autrefois utilisé pour la construction (Ren & Kagi, 1995), plusieurs chercheurs se sont intéressés à son impact énergétique et environnemental dans le secteur des bâtiments. Duffin & Knowles (1981) ont montré que les parois en matériau terre de grande épaisseur agissaient comme des filtres, entraînant un retard de phase d'environ 12 heures par rapport aux variations de température extérieure. Les maisons en terre construites dans des climats chauds et arides, présentaient alors la vertu d'être fraîches le jour et légèrement chaude la nuit. Chel & Tiwari (2009) ont évalué la performance thermique de la terre en tant que matériau de construction des maisons à énergie solaire passive en Inde. Leur étude révèle que la température de l'air intérieur du local considéré, variait entre 14 et 16°C en hiver contre 1 à 15°C et de 24 à 28°C en été contre 28 à 50°C pour les bâtiments en béton à New Delhi. Un gain d'environ 1800 kWh/an a été obtenu dans la maison construite en terre avec une réduction d'environ 5,2 tonnes de CO<sub>2</sub> émis par an. El Fgaier et al. (2015) ont quant à eux étudié les propriétés thermo-physiques des briques en argile non cuites par des tests en laboratoire et in situ. Ils ont montré qu'avec une paroi en argile d'épaisseur 400 mm, les valeurs optimales d'inertie thermique étaient atteintes avec un impact significatif sur le facteur d'amortissement et le déphasage thermique. Les fluctuations de la température extérieure et le risque de surchauffe étant de ce fait réduits. Les auteurs en sont arrivés à la conclusion que l'utilisation de l'argile non cuite contribue au confort thermique dans les bâtiments. D'autres études (Barnaure et al., 2021; Liuzzi et al., 2013; McGregor, Heath, Fodde, et al., 2014; Gernot Minke, 2006) ont également montré que les matériaux en terre possèdent une bonne capacité de régulation hygrothermique du climat intérieur comparativement aux matériaux de construction conventionnels et contribuent de ce fait à l'amélioration passive du confort thermique intérieur.

Cependant, Gonzalez (2015), Laborel-Préneron et al. (2018) jugent la capacité d'isolation thermique des matériaux en terre relativement faible et préconisent l'ajout de matériaux biosourcés pour améliorer leur performance hygrothermique. Labat et al. (2016) mettent en évidence la complémentarité entre les matériaux en terre et les matériaux biosourcés ; le premier servant au maintien d'une ambiance intérieure confortable et le second assurant une isolation thermique efficace grâce à sa grande porosité. Plus encore, l'utilisation de matériaux biosourcés ou bio-agrégats dans les matrices en terre pour la construction des bâtiments contribue à l'amélioration du bien-être des personnes et à la préservation de l'environnement (Aubert et al., 2016; Binici et al., 2014; Doost-Hoseini et al., 2014). Ainsi, pour améliorer la capacité d'isolation des briques en terre, Laborel-Préneron et al. (2018) y incorporent 0%, 3% et 6% de

paille d'orge, de chènevotte ou de rafle de maïs. Comme attendu, une diminution de la conductivité thermique des matériaux a été observée au fur et à mesure que la teneur en agrégat végétal augmentait, passant de  $0,57 W/m.K$  pour le matériau sans agrégat à  $0,14 W/m.K$  lorsque la teneur en matière végétale atteint 6%. La baisse de conductivité la plus remarquable a été observée avec la paille d'orge, soit une diminution de 75% à 6% de teneur en paille contre 65,8% avec la chènevotte et 55% avec les rafles de maïs. Ahmadi et al. (2020) quant à eux ont rempli les briques creuses en terre cuite avec de la paille de blé pour améliorer leur isolation thermique. Comparé aux briques creuses sans paille, cette stratégie a permis d'obtenir des réductions pouvant atteindre les 69% du flux de chaleur traversant les matériaux composites en fonction du taux de compactage de la paille dans les briques.

Par ailleurs, vu l'influence des paramètres mécaniques dans la construction des bâtiments, plusieurs études se sont intéressées à l'impact qu'occasionne l'incorporation des matériaux biosourcés sur les propriétés mécaniques de la matrice de terre. A cet effet, Ouedraogo et al. (2019) étudie l'influence de la paille de fonio sur les propriétés thermo-physiques et mécaniques des blocs en adobe (brique en terre moulée manuellement). En mélangeant différentes teneurs (0 à 1%) de cet agrégat végétal avec la matrice de terre, les auteurs observent une amélioration des caractéristiques mécaniques atteignant des maxima de  $2,9 MPa$  et  $1,3 MPa$  respectivement pour la résistance à la compression et à la flexion des composites contenant respectivement 0,4% et 0,2% de fibre ; soit des augmentations respectives de 11,5% et 18,2% par rapport aux valeurs initiales. Des évolutions similaires ont été observées pour les propriétés thermomécaniques des composites terre-kénaf mis en œuvre par Millogo et al. (2015). En mélangeant également du kénaf (1,2%) de différentes tailles (10, 20 et 30 mm) à de la terre, Laibi et al. (2018) constatent une diminution de moitié de la conductivité thermique et une augmentation de la résistance à la compression de 47,6% du matériau avec les fibres de 20 mm de longueur. Giroudon et al. (2019) ajoutent quant à eux différentes proportions de paille d'orge et de paille de lavande dans de la matrice de terre crue. Ce qui a conduit à une réduction de la résistance à la compression passant de  $4,8 MPa$  pour les blocs en terre sans agrégat végétal à  $3,3 MPa$  pour la terre biosourcée. De pareilles observations ont également été faites après mélange de la matrice de terre avec des granulats de bois (Bouguerra et al., 1998; Rim et al., 1999; Toukourou et al., 2016), de pailles céréales (Jones & Hammond, 2008; Malbila et al., 2020), de fibres de coco (Khedari et al., 2005), fibres de gombo (Nshimiyimana et al., 2020), fibres de chanvre (Minguela, 2017), fibres de palmier dattier (Taallah & Guettala, 2016) et autres résidus agricoles (Malbila et al., 2020). Cette influence non anticipée des matériaux biosourcés sur les propriétés mécaniques de matériaux terreux incite à s'intéresser en priorité aux paramètres structurels (mécaniques et de durabilité) des terres biosourcées pour s'assurer de leur employabilité dans la construction de bâtiments durables. Cependant, les normes en la matière diffèrent selon la technique de construction en terre retenue, d'où l'importance d'un choix approprié de la technique de construction.

### **1.3 Choix d'une technique de construction en terre**

Dans cette section, seules les techniques de construction en terre crue seront passées en revue ; la fabrication des briques en terre cuite étant jugée trop énergivore et non adaptée au contexte

actuel du Bénin où la disponibilité de l'énergie constitue un problème récurrent. A ce titre, plusieurs techniques de construction en terre crue ont été identifiées dans la littérature.

Ainsi, le pisé, obtenu par pilonnage d'une matrice de terre (terre + sable) disposée verticalement en couches successives épaisses (30 à 60 cm (Hall & Djerbib, 2004; Martín-del-Rio et al., 2021)) à travers un coffrage amovible (Pavan et al., 2020), est l'une des méthodes de construction en terre la plus répandue dans le monde (Arto et al., 2021; Burroughs, 2007). Cependant, une application traditionnelle de cette technique peut s'avérer rapidement fastidieuse et longue à moins de recourir à une main d'œuvre importante. Tandis que l'approche moderne du pisé permet, à l'aide d'équipement sophistiqué tels que les malaxeurs, des bandes de transport de matières, des compresseurs d'air, des tracteurs, etc. (Easton & Easton, 2012), d'atteindre rapidement les performances structurelles requises dans le domaine de la construction. Pour contourner cette difficulté technique, Hamard et al. (2016) propose le torchis comme une alternative. En effet, le torchis est une technique de construction qui consiste à former des mottes avec un mélange plastique de terre argileuse, de paille et d'eau puis à les empiler les unes sur les autres pour former des murs porteurs monolithiques (Ben-Alon et al., 2019; Vyncke et al., 2018). Il s'agit d'un procédé ancestral bien connu dont la bonne exécution garantit la durabilité des constructions (Keefe, 2005). D'ailleurs, de nombreux édifices en torchis sont classés au patrimoine mondial de l'UNESCO dont le plus célèbre est la mosquée de Djenné construite il y a plus de 100 ans (1907). Cependant, cette durabilité ancestrale est de plus en plus remise en question à cause de la perte de ce savoir-faire (Little & Morton, 2001; Lyn, 2002). Aussi, l'absence de réglementations standardisées entraîne une grande variabilité dans la formulation du matériau et une dispersion des propriétés mécaniques qui en découlent (Jiménez & Dwyer, 2020), ce qui constitue un véritable handicap à la vulgarisation de ce type de construction.

L'adobe quant à lui est une technique simple de fabrication de brique en terre moulée manuellement et séchée à l'air libre. Il s'agit d'une technique de construction en terre humide qui tire son nom du mot arabe « attob » (brique séchée au soleil) (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). Ce procédé est souvent utilisé pour la construction de bâtiments résidentiels durables peu chargés (Morel et al., 2007; Quagliarini et al., 2015). Mais comparé aux matériaux de construction conventionnels ou briques en terre cuite, les briques en adobe sont mécaniquement peu résistantes. Des améliorations peuvent tout de même être obtenues grâce à une densification plus importante du matériau. Pour se faire, une presse mécanique ou manuelle est utilisée pour réaliser un compactage statique, vibrostatique ou dynamique du mélange de terre (Kenai, 2006). Cette approche permet de fabriquer des Blocs en Terre Comprimée (BTC) qui sont généralement utilisés pour la construction de bâtiments durables et modernes. En effet, les BTC représentent une version améliorée des adobes. Leur mise en œuvre nécessite peu d'eau et se fait grâce à une presse manuelle ou hydraulique. Le compactage mécanique du matériau rend les blocs plus denses et plus résistants que les adobes. Ils constituent une alternative moderne, écologique et économiquement viable aux matériaux de construction conventionnels. D'ailleurs, Laibi (2018) trouve que les BTC sont meilleurs que les adobes en termes de résistance mécanique et de durabilité. Ils offrent plus de possibilités dans les conceptions que les pisés et présentent de meilleures performances thermiques avec moins d'énergie intrinsèque



que les briques en terre cuite (Laibi, 2018). Selon Walker (1995), les BTC stabilisés représentent une alternative aux briques en terre cuites. Fort de tout ce qui précède, *la technique de blocs de terre comprimée sera retenue pour la mise en œuvre du matériau terre biosourcée proposée dans la présente étude.*

## **1.4 Caractérisation structurelle et hygrothermique des BTC biosourcées**

### **1.4.1 Caractérisation structurelle**

#### **❖ Propriétés mécaniques**

Pour être utilisés dans la construction, les matériaux doivent répondre à certaines exigences mécaniques afin d'assurer la performance structurelle de l'édifice et la sécurité des usagers. A cette fin, des essais de caractérisation mécanique des matériaux sont indispensables. Ces essais permettent de déterminer les propriétés telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction par fendage des matériaux. Ces propriétés mécaniques sont les plus étudiées dans la littérature liée aux éco-matériaux. Pour preuve, après avoir passé en revue 75 articles dédiés à cette question, Jannat et al. (2020) affirment que 85% de ceux-ci ont été consacrés à la détermination des propriétés mécaniques des éco-matériaux contre 28% pour les propriétés thermiques. Dans la plupart des travaux, la résistance à la compression est la propriété la plus recherchée. D'ailleurs, une autre étude bibliographique, réalisée par Turco et al. (2021) confirme cette tendance. Les auteurs révèlent que 77,8% des travaux consultés se sont intéressés à la résistance à la compression des éco-matériaux contre 33,3% pour la conductivité thermique. Morel et al. (2007) justifient cet intérêt par le fait que la résistance à la compression représente la mesure de base universelle dont dépend la qualité des éléments de maçonnerie.

A cet effet, la norme XP P 13-901 (AFNOR, 2001), consacrée aux BTC pour murs et cloisons, définit deux types de résistance à la compression que sont la résistance à la compression sèche (DCS : Dry Compressive Strength) et la résistance à la compression humide (WCS : Wet Compressive Strength). La prise en compte de ces deux résistances n'est nécessaire que si les blocs sont destinés à des régions humides. Dans les régions sèches, seule la résistance à la compression sèche est requise. Dans les deux cas, la détermination de cette propriété se fait par écrasement des éprouvettes sous une charge croissante. La norme XP P 13-901 décrit explicitement les procédures à suivre pour déterminer ces deux propriétés. La résistance à la compression sèche/humide est alors obtenue en faisant le rapport entre la charge maximale enregistrée et la surface de l'éprouvette. En fonction des valeurs obtenues pour les résistances à la compression sèche et humide, le matériau peut être classé dans l'une des trois catégories que sont (*Compressed earth blocks standards*, 1998) :

- catégorie 1 : éléments structurels non porteurs ou capables de supporter des charges externes limitées (éléments de remplissage dans une structure portante) ;
- catégorie 2 : éléments structurels capables de supporter des charges externes importantes (bâtiment à 2 étages comportant des éléments structurels porteurs minces) ;
- catégorie 3 : éléments structurels capables de supporter des charges externes élevées (bâtiment public à 3 étages comportant des éléments structurels porteurs minces).

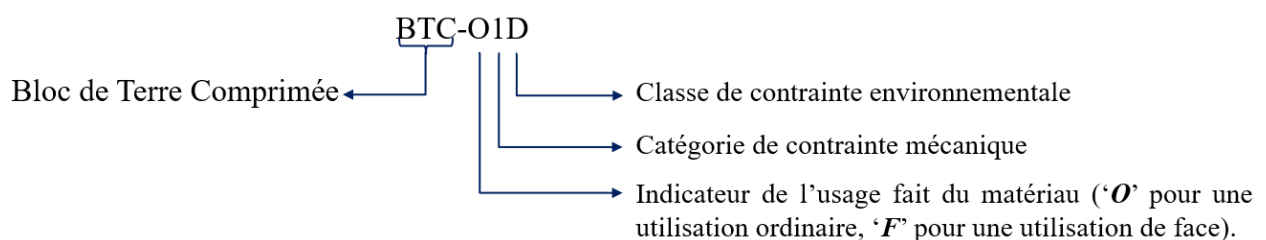
En plus des performances mécaniques, la CEB Standards (*Compressed earth blocks standards*, 1998) tient compte des contraintes environnementales dans le critère d'employabilité des BTC dans la construction des bâtiments. Ainsi, ladite norme identifie quatre classes de contraintes environnementales dont dépend l'utilisation du matériau. Il s'agit de :

- classe D : élément situé dans un environnement sec sans risque d'être mouillé (cloison intérieure, mur non apparent) ;
- classe R : élément capable de résister à un dégât d'eau par projection latérale (pluie, éclaboussures d'eau) ;
- classe C : élément capable de résister à un dégât d'eau par pénétration verticale (capillarité) ;
- classe A : élément capable de résister à l'abrasion mécanique (frottement, vent).

Le Tableau 1.1 présente les valeurs requises pour les résistances à la compression sèche (DCS) et humide (WCS) des BTC ordinaires selon le type d'utilisation et les conditions hydriques de l'environnement concerné. Ces valeurs sont les mêmes pour les BTC de face (sans enduit).

**Tableau 1.1:** Valeurs de DCS et WCS requise pour différentes utilisations des BTC (*Compressed earth blocks standards*, 1998)

Désignation	Contrainte environnementale	Contrainte mécanique	DCS (MPa)	WCS (MPa)
BTC-O1D	Environnement sec (classe D)	1	$\geq 2$	–
BTC-O2D		2	$\geq 4$	–
BTC-O3D		3	$\geq 6$	–
BTC-O1R	Effet de l'eau par pulvérisation latérale (classe R)	1	$\geq 2$	$\geq 1$
BTC-O2R		2	$\geq 4$	$\geq 2$
BTC-O3R		3	$\geq 6$	$\geq 3$
BTC-O1C	Effet de l'eau par pénétration verticale (classe C)	1	$\geq 2$	$\geq 1$
BTC-O2C		2	$\geq 4$	$\geq 2$
BTC-O3C		3	$\geq 6$	$\geq 3$



Exemple de désignation : **BTC-O2C** : bloc de terre comprimé ordinaire utilisé comme élément porteur à charge externe importante exposé à une pénétration d'eau vertical sans risque d'abrasion.

## ❖ Propriétés de durabilité

L'emploi des éco-matériaux, notamment ceux en terre, dans l'enveloppe des bâtiments suggère une bonne tenue à l'eau de ces derniers. En effet, les principaux défauts auxquels sont confrontés la plupart des habitations en terre sont l'érosion et l'effritement des surfaces de l'enveloppe (Rigassi, 1985). Ce faisant, pour s'assurer de la durabilité de ces éco-matériaux, des essais d'érosion et d'abrasion ont été initiés. Ces derniers renseignent sur la résistance à l'érosion et la résistance à l'abrasion des matériaux.

### ▪ Résistance à l'érosion

La résistance à l'érosion d'un matériau est obtenue par le test d'érosion par goutte à goutte (méthode Geelong) ou par la méthode de pulvérisation sous pression (Cid-Falceto et al., 2012). Dans le premier cas, 100 ml d'eau, disposée à 400 mm au-dessus de l'échantillon, descendent goutte à goutte sur ce dernier pendant 20 à 60 min au maximum (Figure 1.5) (NZS, 1998). La profondeur d'érosion est par la suite mesurée avec une sonde cylindrique ayant un diamètre en bout de 3,15 mm (NZS, 1998). Lorsque la profondeur d'érosion mesurée est inférieure à 5 mm, l'indice d'érosion est égal 2 et le matériau est considéré comme pas ou très peu érosif. Entre 5 et 10 mm, le matériau est considéré comme érosif et l'indice d'érosion correspondant est 3. Les profondeurs d'érosion comprises entre 10 et 15 mm correspondent à l'indice 4. Au-delà de 15 mm, l'indice d'érosion est égal à 5 et le matériau est considéré comme avoir échoué au test. Le test de Geelong, élaboré par l'University of Technology of Swinburne en Australie, simule l'effet de précipitations légères sur les matériaux de construction en terre non stabilisée (Bogas et al., 2019; Giroudon, Laborel-préneron, et al., 2019; Heathcote, 2002) et destinés aux régions peu pluvieuses (Heathcote, 2007). Il a notamment été utilisé par Giroudon et al. (2019) pour les essais de durabilité des briques terre – paille de d'orge et briques – lavande et par Lejano et al. (2019) sur différentes formulations de BTC renforcés avec des poils de porc et stabilisés au ciment et de la poudre de coquille de moule verte.

Le test de pulvérisation quant à lui consiste à soumettre la surface de parement du matériau à un jet d'eau de 50 kPa de pression pendant 1 h ; le diamètre du jet sur la face considérée étant de 150 mm (Figure 1.6). A chaque 15 min, la projection d'eau est arrêtée pour mesurer la profondeur d'érosion. Cette dernière est mesurée par l'intermédiaire d'une tige à bout plat de 10 mm de diamètre. Les indices d'érosion associés aux différentes profondeurs d'érosion après le test de pulvérisation sont présentés dans le Tableau 1.2. Ce test a été mis en place par le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) en Australie pour prédire l'effet de fortes précipitations sur les constructions en terre. Danso et al. (2015) le jugent d'ailleurs plus représentatif des conditions de terrain que l'approche de Geelong (méthode de goutte à goutte). Cependant, il est adapté aux matériaux en terre stabilisée. Cette affirmation a été confirmée par Bogas et al. (2019) et Cid-Falceto et al. (2012) qui, après des tests de pulvérisation sur des matériaux terreux non stabilisés, observent une dégradation complète des échantillons.

Par ailleurs, Cid-Falceto et al. (2012) fait le point des normes utilisant l'une et/ou l'autre des méthodes d'évaluation de la résistance à l'érosion des matériaux terreux. Ce résumé est repris dans le Tableau 1.3.

**Tableau 1.2** : Détermination de l'indice d'érosion d'un matériau en terre par les méthodes de Geelong et de pulvérisation (NZS, 1998)

Indice d'érosion	Profondeur d'érosion D	
	Méthode Geelong (mm)	Méthode de pulvérisation (mm/h)
1	–	$0 \leq D < 20$
2	$0 < D < 5$	$20 \leq D < 50$
3	$5 \leq D < 10$	$50 \leq D < 90$
4	$10 \leq D < 15$	$90 \leq D < 120$
5 (rejeté)	$D \geq 15$	$D \geq 120$

**Tableau 1.3** : Normes prenant en compte les tests d'érosion par goutte à goutte (Geelong) et/ou par pulvérisation (Cid-Falceto et al., 2012)

Norme	Méthode de Geelong	Méthode par pulvérisation	Types de matériaux terreux
IS1725 (Giroudon, Laborel-préneron, et al., 2019; Zoungrana et al., 2021)	–	×	Bloc de terre comprimé (BTC)
NZS (Cornaro et al., 2020; González, 2014; Zoungrana et al., 2021)	×	×	Adobe, BTC, Pisé
SAZS 724 (Jannat et al., 2020; Zoungrana et al., 2021)	×	×	Pisé
SLS 1382 (Peng et al., 2021; Sabapathy & Gedupudi, 2020; Zoungrana et al., 2021)	–	×	BTC
UNE 41410 (Azahry et al., 2017; Zoungrana et al., 2021)	×	–	BTC
ASTM E2395M-10 (Mohamed et al., 2020b) (Zoungrana et al., 2021)	×	×	Adobe, BTC, Pisé
EBAA 2001 (Rigassi, 1985; Zoungrana et al., 2021)	×	×	Adobe, BTC, Pisé
HB 195 (Abd El & Kabasy, 2013; Zoungrana et al., 2021)	×	×	Adobe, BTC, Pisé
Bulletin 5 (Costi et al., 2021; Zoungrana et al., 2021)	–	×	Adobe, BTC, Pisé

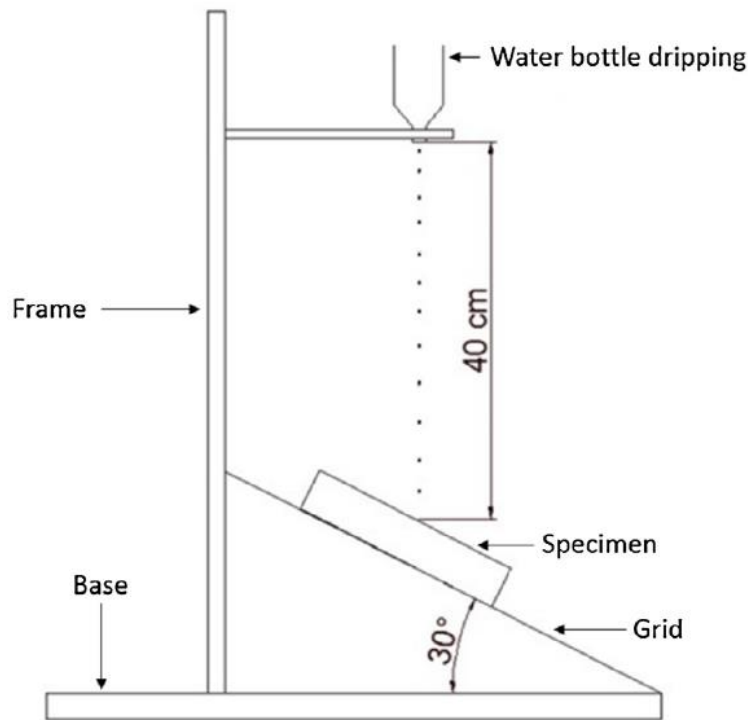


Figure 1.5: Essai d'érosion de Geelong (NZS, 1998)

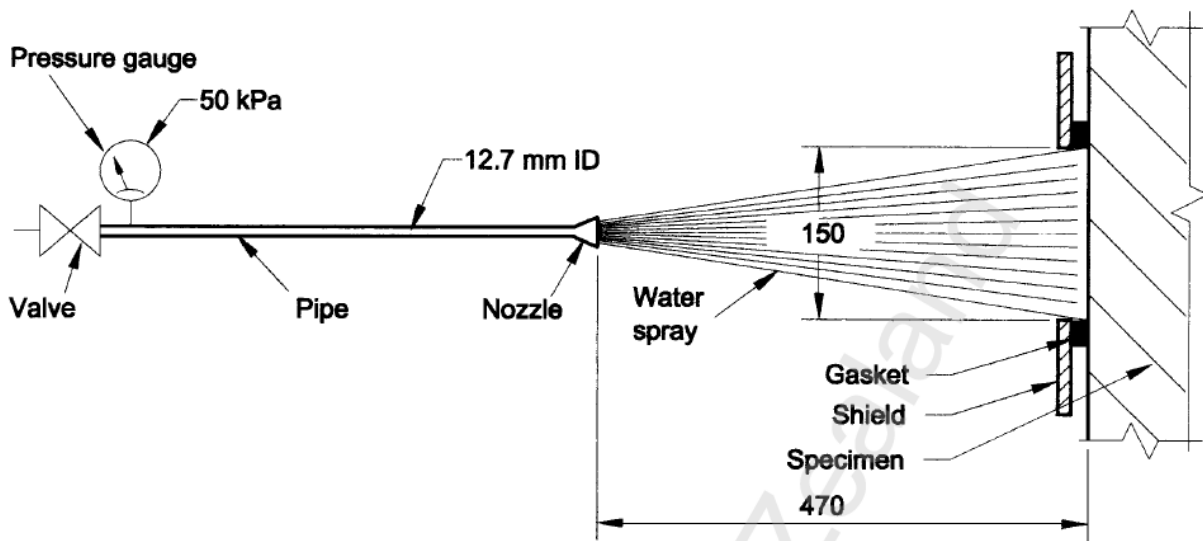


Figure 1.6: Essai d'érosion par pulvérisation (NZS, 1998)

▪ **Résistance à l'abrasion**

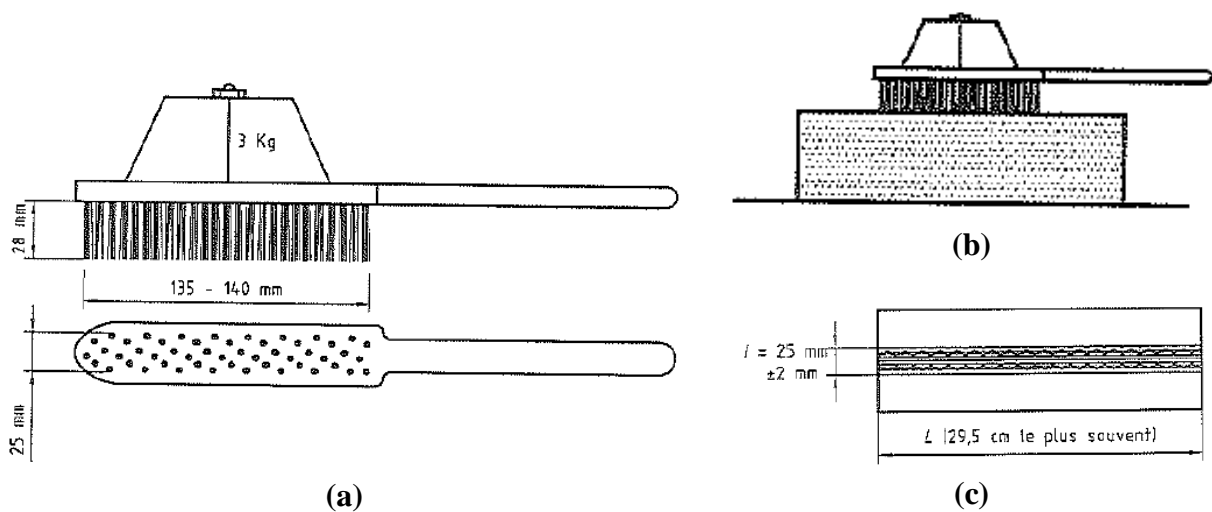
Turco et al. (2021) décrivent la résistance à l'abrasion d'un matériau comme la force qu'oppose ce dernier à toute action extérieure contribuant à son effritement. Elle est obtenue grâce à un test d'abrasion décrit dans la norme XP P 13-901 (AFNOR, 2001). Ce test consiste à soumettre la face de parement du matériau en terre étudié à 60 mouvements rectilignes de va et vient d'une brosse métallique portant une charge de 3 kg (Figure 1.7a) pendant environ 60 secondes. Les déplacements sont effectués de sorte que toute la longueur de la face soit prise en compte sur une largeur de  $25 \pm 2$  mm. Au cours du brossage, aucune charge supplémentaire ne doit être apportée à la brosse (Figure 1.7b). La quantité de matière arrachée

pendant ces déplacements est estimée en pesant l'échantillon avant et après l'essai. Ainsi, le coefficient d'abrasion ( $Ca$ ) du matériau est déterminé en appliquant l'équation (1.1). Plus ce coefficient est élevé, mieux le matériau résiste aux forces d'effritement.

$$Ca = S / (m_0 - m_1) \quad (1.1)$$

Où  $Ca$  représente le coefficient d'abrasion ( $cm^2/g$ ),  $S$  la surface brossée ( $cm^2$ ),  $m_0$  la masse initiale de l'éprouvette ( $g$ ) et  $m_1$  la masse de l'éprouvette nettoyée après brossage ( $g$ ).

En dehors de la résistance à l'érosion, la résistance à l'abrasion représente la propriété de durabilité la plus recherchée dans la littérature en raison d'une mise en œuvre du test simple et très peu coûteuse. Elle a fait l'objet de plusieurs publications (Giroudon et al., 2019; Mango-Itulamya et al., 2020; Nshimiyimana et al., 2021).



**Figure 1.7:** Essai d'abrasion ; (a) brosse métallique ; (b) dispositif ; (c) surface de brossage (AFNOR, 2001)

## 1.4.2 Caractérisation thermique

La caractérisation thermique d'un matériau consiste à déterminer expérimentalement et/ou analytiquement ses principales propriétés thermiques que sont la conductivité thermique ( $\lambda$ ), la diffusivité thermique ( $a$ ), la capacité thermique (massique ou volumique) et l'effusivité thermique ( $E$ ). La connaissance de ces dernières permet de prédire le comportement thermique du matériau. Parmi les propriétés précitées, la conductivité thermique représente la grandeur la plus recherchée. Cette grandeur, exprimée en  $W/m.K$ , caractérise la puissance thermique transmise par unité de longueur à travers un matériau soumis à un gradient de température de  $1^\circ C$  de part et d'autre de ses 2 faces. Elle traduit donc l'aptitude du matériau à transmettre de la chaleur par conduction. Par ailleurs, la vitesse de propagation de la chaleur au sein du matériau est définie par la diffusivité thermique. Cette propriété renseigne sur la capacité du matériau à transmettre plus ou moins rapidement de la chaleur. Elle s'exprime en  $m^2/s$  et est déterminée par l'équation (1.2). Enfin, l'équation (1.3) permet de calculer l'effusivité thermique qui n'est rien d'autre que la capacité d'un matériau à échanger plus ou moins rapidement de la chaleur avec son environnement. Un matériau est qualifié d'effusif s'il absorbe rapidement une quantité importante d'énergie sans une élévation conséquente de sa température de surface. Elle

dépend aussi bien de la conductivité thermique du matériau, mais aussi de sa capacité à stocker de la chaleur en son sein. Cette dernière désigne donc la capacité thermique volumique du matériau qui tient compte de sa masse volumique ( $\rho$ ) et de sa capacité thermique massique ( $C_p$ ).

Selon que l'on dispose de deux propriétés thermiques, les autres peuvent être déterminées en appliquant les équations suivantes :

$$a = \lambda / \rho C_p \quad (1.2)$$

$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (1.3)$$

Où  $a$  est la diffusivité thermique en ( $m^2/s$ ),  $\lambda$  la conductivité thermique ( $W/m.K$ ),  $\rho$  la masse volumique du matériau ( $kg/m^3$ ),  $C_p$  la capacité thermique massique ( $J/kg.K$ ),  $\rho C_p$  la capacité thermique volumique ( $J/m^3.K$ ) et  $E$  l'effusivité thermique ( $J/K.m^2.s^{1/2}$ ).

Qu'il s'agisse de  $\lambda$ ,  $C_p$ ,  $a$  et  $E$ , leur détermination expérimentale est possible. Pour ce faire, plusieurs techniques de mesure ont été développées. L'ensemble de ces méthodes peut être classé suivant trois régimes que sont : le régime permanent, le régime transitoire et le régime périodique. Le régime permanent ne tient compte que de l'état final de l'échantillon soumis à une excitation thermique. Ce régime est celui utilisé dans les méthodes de la plaque chaude gardée (ISO 8302, 1991), de la mini-plaque chaude gardée (Jannot, 2011) pour la caractérisation thermique des matériaux. Ces différentes méthodes ne permettent que la mesure de la conductivité thermique. Selon Osséni et al. (2017), l'adoption de ces méthodes est limitée par la complexité des hypothèses de base et par un temps de mesure trop long. En revanche, pour les méthodes basées sur le régime transitoire, les réponses thermiques sont mesurées sur des temps courts. Il s'agit des méthodes flash (Hay et al., 2004), du fil chaud (Coquard et al., 2006), du plan chaud (Jannot, 2010), du ruban chaud (Jannot & Meukam, 2004; Jannot et al., 2011) et du « hot disk » (Bohac et al., 2000; He, 2005). La description, les avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes sont présentés dans (Félix, 2011). Il en est de même pour les méthodes du régime périodique. Les différentes modélisations associées à ces méthodes sont résumées dans (Jannot, 2011).

### 1.4.3 Caractérisation hygrique

Plusieurs matériaux, notamment les matériaux biosourcés et la terre sont sensibles aux variations d'humidité de leur environnement. Ils sont capables de réguler les conditions hygriques d'un milieu en absorbant ou en rejetant de l'humidité. Cette capacité, appelée hygroscopicité, dépend principalement des propriétés hygriques du matériau que les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur du matériau. Ces derniers permettent d'apprécier le comportement hygrique d'un matériau.

#### ❖ *Les isothermes de sorption*

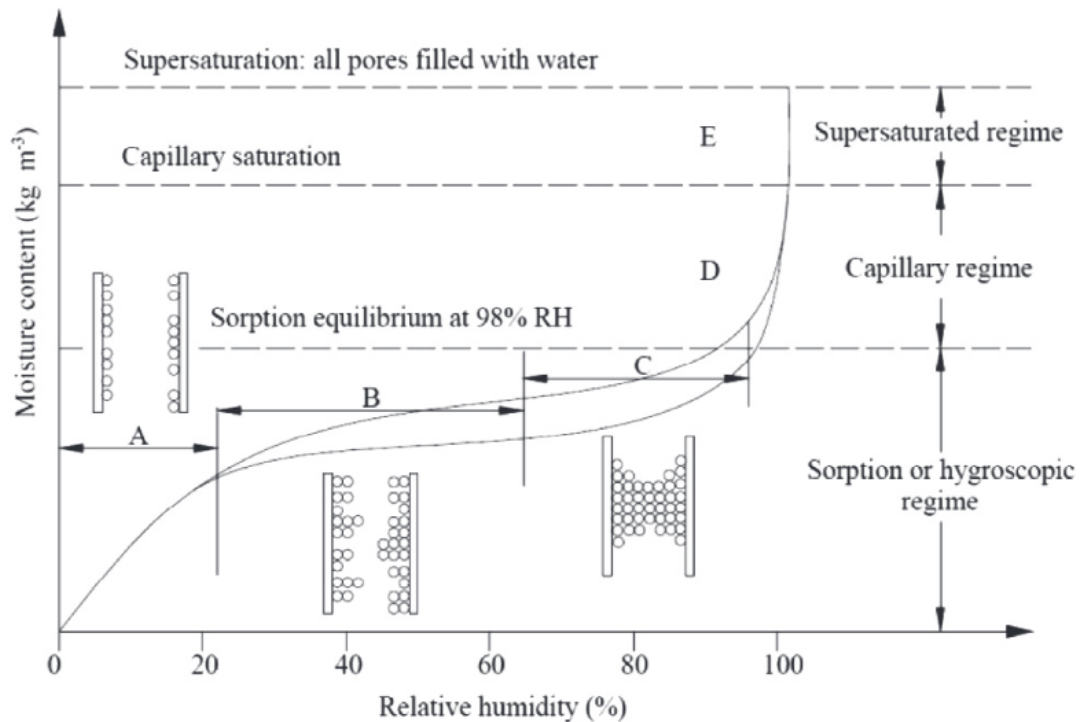
La norme ISO 12571 (2001) définit les isothermes de sorption comme des courbes qui traduisent la relation entre la teneur en humidité d'un matériau en équilibre avec son environnement et l'humidité relative du milieu à une température donnée. Ils renseignent sur la

capacité du matériau à capter et à stocker l'humidité environnante. Leur détermination est indispensable à la compréhension et à la modélisation du comportement hydrique d'un matériau (Bui et al., 2017). Ils sont représentés par deux courbes dont la première, appelée courbe d'adsorption, illustre l'évolution croissante de la teneur en humidité à l'équilibre (EMC : Equilibrium Moisture Content) du matériau en fonction de l'humidité relative de l'ambiance à une température fixe. Pendant cette phase, le matériau adsorbe l'humidité pour être en équilibre avec les conditions hygriques de l'ambiance. L'humidité relative de l'ambiance évolue par échelon à chaque fois que l'équilibre hydrique est atteint au sein du matériau (plus de variation de masse). Le processus inverse est par la suite réalisé pour obtenir la courbe de désorption (Figure 1.8). L'écart observé entre les deux courbes est appelé hystérésis. Bennai (2017) justifie la présence de ce phénomène par un changement physique du matériau pendant la phase de désorption ; limitant l'évaporation complète de surplus d'eau à une humidité relative donnée. L'évolution des isothermes de sorption peut être répartie en trois zones. La première, appelée zone hygroscopique, se traduit par une adsorption en couches mono-moléculaires ( $HR < 40\%$ ) puis en couches pluri-moléculaires ( $HR > 40\%$ ) de la vapeur d'eau à l'intérieur des pores du matériau. Ces phénomènes se produisent sur une plage d'humidité relative allant de 0% à 95% (Bennai, 2017). Au-delà de cette plage apparaît la zone super-hygroscopique où la grande majorité du volume poral est occupée par l'eau libre. Une exposition continue du matériau à une humidité relative de plus de 95% conduit à une saturation capillaire. La zone saturée est alors atteinte et la totalité de l'espace poral est occupée par l'eau. Dans cette région, tout déplacement des molécules d'eau se fait à l'état liquide. La figure 1.8 illustre une allure d'isothermes de sorption avec les différents régimes hydriques. La pente de l'isotherme d'adsorption (courbe inférieure) correspond à la capacité de stockage d'humidité ou capacité de sorption ( $\xi$ ) du matériau. Elle est obtenue par application de l'équation (1.4) et constitue une donnée d'entrée essentielle pour la modélisation du transfert couplé de chaleur et de masse à travers le matériau.

$$\xi = \partial u / \partial \varphi \quad (1.4)$$

Où  $\xi$  est la capacité de sorption du matériau (–),  $u$  la teneur en eau massique du matériau ( $kg/kg$ ) et  $\varphi$  l'humidité relative de l'ambiance (%).

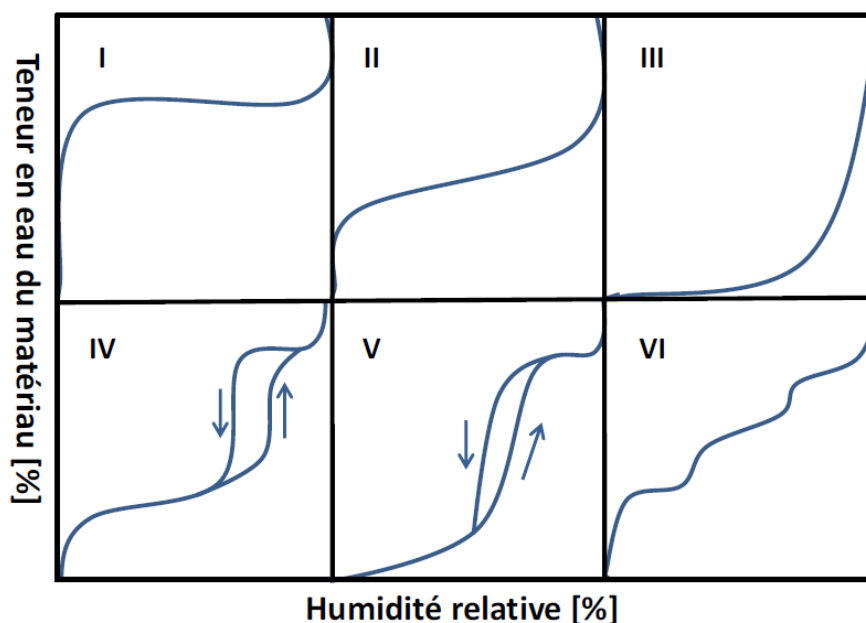




- A : Monocouche de molécules adsorbées      D : Eau libre dans les pores, aspiration capillaire  
 B : Multicouche de molécules adsorbées      E : Régime sursaturé  
 C : Couches interconnectées (condensation capillaire interne)

**Figure 1.8:** Schématisation des isothermes de sorption suivant les zones d'humidité (Issaadi et al., 2015)

Selon l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), les isothermes de sorption peuvent être regroupés en six (6) classes en fonction de l'allure des courbes (figure 1.9). En effet, l'allure des isothermes renseigne sur la structure poreuse du matériau. Les courbes de sorption de type *I* traduisent la présence unique de micropores dans le matériau étudié. A contrario, le matériau est considéré macroporeux lorsqu'il présente de isothermes de type *II* ou *III*, ce dernier étant caractérisé pour une faible absorption d'eau. Par ailleurs, les matériaux mésoporeux s'illustrent par des isothermes de type *IV* ou *V*. Leurs formes présentent des similarités avec les isothermes de types *II* et *III* respectivement. La différence entre ces deux types se situe au niveau de la faible absorption d'eau par les matériaux ayant des isothermes de type *V*. Enfin les isothermes de types *VI* illustrent une succession de couches adsorbées (Maaroufi, 2020).



*Figure 1.9:* Les types d'isothermes de sorption (Ferroukhi, 2016)

- **Modèles d'ajustement**

Les essais de sorption permettent de déterminer la teneur en humidité d'équilibre (EMC : Equilibrium Moisture Content) d'un matériau à différentes humidités relatives. A l'issue des essais, seules quelques teneurs en humidité sont généralement déterminées en fonction du pas d'humidité relative fixé. La connaissance d'une EMC à une humidité relative autre que celle fixée lors des essais devient compliquée puisque le raccordement d'un point expérimental à un autre pour le traçage de la courbe de sorption ne suit pas forcément une ligne droite. Ainsi, pour déterminer la teneur en humidité d'équilibre d'un matériau à n'importe quelle humidité relative, il est nécessaire de faire recours à un modèle d'ajustement. A cet effet, plusieurs modèles ont été développés dans la littérature. Le Tableau 1.4 résume quelques modèles utilisés dans la littérature. Le choix de l'un ou l'autre de ces modèles dépend de la nature du matériau étudié. Par exemple, Zelinka et al. (2018) recommandent le modèle ABC pour le traçage des isothermes de sorption des matériaux en bois. Ahmad & Chen (2020) pour leur part utilisent le modèle GAB (Guggenheim-Anderson-De Boer) pour ajuster les isothermes de sorption de bio-béton en épis de maïs. Ce modèle s'est également avéré meilleur dans l'ajustement des isothermes de sorption de la paille d'orge (Bui et al., 2017). Parmi les modèles de Halsey, Henderson, Oswin et le modèle de Chung-Pfost modifié, Saidi et al. (2018) ont montré que le modèle d'Henderson représentait mieux le comportement de sorption des BTC mis en œuvre. Ce modèle a également fait ses preuves dans l'étude de (Charai, Mezrhab, & Moga, 2022). Pour l'avoir comparé aux modèles Exponentiel, VG (Van Genuchten) et GAB, les auteurs ont trouvé un faible écart entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle Henderson. Cependant, le modèle GAB s'est montré encore plus précis que ce dernier. Une telle observation a également été faite par Charai et al. (2022) avec les isothermes des bétons de fibre Alfa. Aussi, sur les neuf modèles testés par Arthur et al. (2016) sur les courbes de sorption de 207 matériaux en terre, le modèle GAB s'est révélé bien précis pour l'ajustement de ces dernières. Il présente l'avantage de couvrir avec précision une plus large gamme d'humidité relative (5% à 90%) (Alioua et al., 2019) que les modèles BET, Oswin ou Henderson (Oumeziane et al., 2021). Ce modèle a ainsi été adopté

dans plusieurs autres études de sorption liées aux matériaux en terre telles que (Ahmad & Chen, 2020; Aït Oumeziane et al., 2021; Alioua et al., 2019).

**Tableau 1.4 :** Quelques équations d’ajustement des isothermes de sorption (Bui et al., 2017)

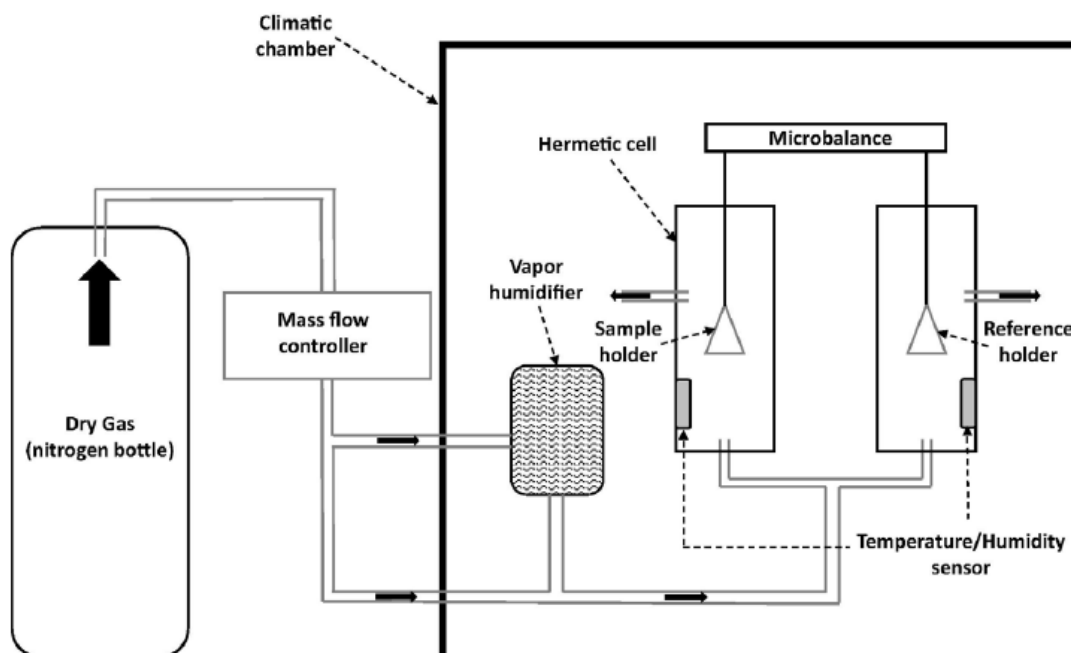
Modèle	Equation	Référence
ABC	$\frac{\phi}{u} = A. \phi^2 + B. \phi + C$	(Zelinka et al., 2018)
GAB (Guggenheim-Anderson-De Boer)	$u = \frac{a_j. b_j. \phi}{(1 - b_j. \phi)[1 + (a_j - 1). b_j. \phi]} \cdot u_m$	(Timmermann, 2003)
BET (Brunauer-Emmet-Teller)	$u = \frac{C. \phi}{(1 - \phi)(1 - \phi + C. \phi)} \cdot u_m$	(Chemkhi et al., 2004)
Langmuir	$u = \frac{C. \phi}{1 + C. \phi} \cdot u_m$	(Langmuir, 1918)
Halsey	$u = \left(-\frac{A}{\ln \phi}\right)^{\frac{1}{c}} \cdot u_m$	(Pavlík et al., 2012)
Henderson	$u = \left(-\frac{\ln(1 - \phi)}{A. (T + B)}\right)^{\frac{1}{c}}$	(Henderson, 1952)
Oswin	$u = \frac{A + B. T}{\left(\frac{1}{\phi} - 1\right)^{\frac{1}{c}}}$	(Oswin, 1946)
VG (Van Genuchten)	$u = \left[1 + \left C_1. \frac{R. T}{M. g} \cdot \ln(\phi)\right ^{c_2}\right]^{-\left(1 - \frac{1}{c_2}\right)} \cdot u_m$	(Charai, Mezrhab, Moga, et al., 2022)
HH (Hailwood Horrobin)	$u = \frac{1800. B. \phi}{C} \cdot \left(\frac{A}{100 + A. B. \phi} + \frac{1}{100 - B. \phi}\right)$	(McGregor, Heath, Shea, et al., 2014)
Chung-Pfost modifié	$u = [A + n. \ln(-\ln(\phi))] \cdot u_m$	(Samapundo et al., 2007)

▪ **Techniques de mesure**

Les isothermes de sorption sont obtenus expérimentalement suivant la méthode du dessiccateur, les méthodes gravimétrique et volumétrique. La méthode du dessiccateur est une méthode normative (EN 12571) utilisant les Solutions Salines Saturées (SSS) pour produire différents paliers d’humidité relative auxquels sont soumis les échantillons. La norme EN 12571 présente une liste exhaustive des différents sels permettant d’obtenir les paliers d’humidité. Pour chaque palier, les masses avant et après l’absorption/désorption sont mesurées et l’ECM de l’échantillon est déterminée. Ces essais se réalisent dans un dessiccateur à température constante, généralement  $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$  (ISO 12571, 2001). Ils sont beaucoup plus recommandés pour la détermination des isothermes de sorption des matériaux de construction hétérogènes en raison de l’utilisation d’échantillons de taille plus représentative (Laborel-Préneron et al.,

2018). Cependant, son exécution nécessite un temps d'essai relativement long pouvant aller de quelques semaines à plusieurs mois. Pour exemple, Laborel-Préneron et al. (2018) affirment avoir déterminé les isothermes de sorption de 7 éco-matériaux pendant environ une année. Cette période d'essai a duré environ 2 ans dans le cas de la détermination des isothermes de sorption du béton initiée par Trabelsi (2010).

En revanche, l'approche gravimétrique se distingue par un temps d'exécution relativement court (quelques jours) en raison de l'utilisation d'échantillons de petites tailles. Elle se base sur des mesures continues de la masse de l'échantillon pour le traçage des isothermes de sorption. Cette approche est généralement exécutée grâce aux dispositifs DVS (Dynamic Vapor Sorption) et VSA (Vapor Sorption Analyser) ; le premier utilisant de très faibles quantités de matériau (quelques dizaines de milligrammes) et le second nécessitant des quantités relativement plus importantes (environ une centaine de grammes). Dans les deux cas, l'échantillon est placé dans une enceinte climatique sur une nacelle connectée à une microbalance de précision ( $\pm 0,1 \mu\text{g}$  et  $\pm 0,1 \text{mg}$  respectivement pour le DVS et le VSA (Bennai, 2017)). L'humidité relative à l'intérieur de cette chambre est obtenue par mélange brassé d'azote et de vapeur d'eau. La conversion forcée ainsi créée contribue à atteindre rapidement l'équilibre hydrique de l'échantillon. Toutefois, l'approche DVS se trouve limitée aux matériaux monolithiques ou homogènes. Pour des échantillons hétérogènes, la représentativité du matériau n'est pas garantie. Aussi, l'équilibre hydrique des échantillons n'est pas atteint pour des humidités relatives de plus de 90% (Bennai, 2017).



**Figure 1.10:** Schéma du dispositif DVS des mesures de sorption (Bui et al., 2017)

L'approche volumétrique quant à elle s'intéresse à la variation du volume d'humidité absorbé ou désorbé par le matériau. Pour se faire, l'échantillon séché à  $40^{\circ}\text{C}$ , est disposé dans une enceinte de volume connu où est injecté de l'azote et dont le nombre de moles est déterminé par la loi des gaz parfaits. Les mesures de pressions et de températures avant et après les phases

de sorptions du matériau permettent de déterminer le nombre de moles de gaz restant dans l'enceinte et par conséquent d'évaluer la teneur en eau massique à l'équilibre du matériau. Cette méthode, peu utilisée dans la littérature, a fait l'objet de quelques travaux tels que (Bennai, 2017; Issaadi et al., 2015).

#### ❖ *La perméabilité à la vapeur*

La perméabilité à la vapeur d'un matériau traduit sa capacité à transférer de l'humidité sous un gradient de pression de vapeur d'eau (Collet et al., 2013). La norme ISO 12572 (2001) définit deux approches pour la détermination de la perméabilité à la vapeur des matériaux. Il s'agit des essais en 'coupelle sèche' et en 'coupelle humide' (Figure 1.11). Ces essais permettent d'évaluer la perméabilité à la vapeur du matériau soumis respectivement à des environnements à faible humidité ( $0 \pm 3\%$  à  $50 \pm 3\%$ ) et à humidité élevée ( $50 \pm 3\%$  à  $93 \pm 3\%$ ) (ISO 12572, 2001). Dans les deux cas, une coupelle contenant un dessicatif (coupelle sèche) ou une solution aqueuse saturée (coupelle humide) et dont l'ouverture est scellée avec l'éprouvette à tester est placée dans une chambre d'essai à des conditions hygrothermiques qui sont bien contrôlées (ISO 12572, 2001). Le passage de la vapeur d'eau à travers l'éprouvette est assuré par la différence de pression entre la coupelle et l'enceinte. Ces deux approches ont été appliquées par Labat et al. (2016) pour apprécier la perméabilité hygrique de l'éco-matériau argile-paille sur une plage d'humidité relative allant de 9 à 93%. Ce fut également le cas de Colinart & Glouannec (2022) qui eurent recours à ces deux techniques avec différents dessiccants et solutions salines saturées pour évaluer la précision de la mesure de la perméabilité à la vapeur de neuf matériaux de construction précédemment étudiés dans la littérature. Entre autres, Buratti et al. (2020) et Casnedi et al. (2020) adoptent la méthode de la coupelle sèche sur des matériaux d'isolations conventionnels (le gypse et le polystyrène expansé) et écologiques (déchets de cuir collé et pressé, balles de riz et pailles de café) respectivement. La méthode de la coupelle humide a quant à elle été utilisée dans plusieurs études dont (Azahry et al., 2017; Hon et al., 2020; Laborel-Préneron et al., 2018; A. Mohamed et al., 2020a). L'équation (1.5) permet d'estimer la perméabilité à la vapeur d'un matériau.

$$\delta = \frac{e}{\frac{S \cdot \Delta p}{G} - \frac{e_a}{\delta_a}} \quad (1.5)$$

Où  $\delta$  est la perméabilité à la vapeur ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ),  $e$  l'épaisseur de l'échantillon ( $m$ ),  $S$  l'aire de la face exposée de l'échantillon ( $m^2$ ),  $\Delta p$  la différence de pression de part et d'autre des faces de l'échantillon ( $Pa$ ),  $G$  la pente de la droite de régression entre les masses de l'ensemble coupelle – échantillon et les temps de pesée ou taux de transmission de la vapeur ( $kg/s$ ),  $e_a$  l'épaisseur de la couche d'air entre la solution et l'échantillon ( $m$ ) et  $\delta_a$  la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ).

Avec :

$$\Delta p = (HR_2 - HR_1) \times 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times \theta}{237,3 + \theta}} \quad (1.6)$$

$$\delta_a = \frac{2,3056 \cdot 10^{-5} \cdot p_0}{R \times T \times p} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (1.7)$$

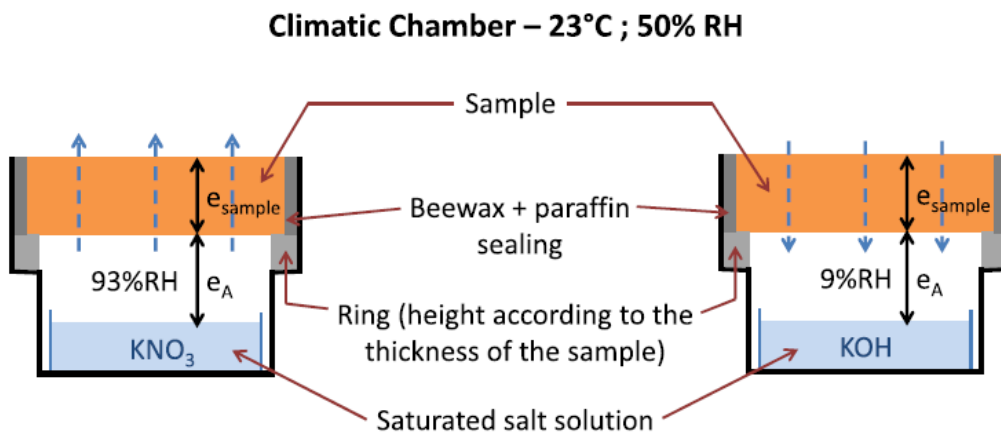
Où  $HR_2$  et  $HR_1$  représentent les humidités relatives à l'intérieur et en dehors de la coupelle (%),  $\theta$  la température dans l'enceinte climatique ( $^{\circ}C$ ),  $p_0$  la pression atmosphérique ( $p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$ ),  $R$  la constante des gaz parfaits, pour la vapeur d'eau ( $R = 462 \text{ N. M/kg.K}$ ),  $T$  la température thermodynamique ( $K$ ) et  $p$  la pression barométrique ( $\text{hPa}$ ).

Par la suite, la résistance à la vapeur d'eau ( $Z$ ) et le facteur de résistance à la vapeur d'eau ( $\mu$ ) de l'échantillon sont donnés par les équations (1.8) et (1.9) respectivement.

$$Z = \frac{S \cdot \Delta p}{G} \quad (1.8)$$

$$\mu = \delta_a / \delta \quad (1.9)$$

Où  $Z$  est en  $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}$  et  $\mu$  sans unité.



**Figure 1.11:** Schéma de principe des essais de perméabilité à la vapeur d'eau en 'coupelle humide' et en 'coupelle sèche' (Labat et al., 2016)

### 1.5 Mécanisme de transfert hygrothermique à travers un matériau hygroscopique

Pour réduire la consommation énergétique des bâtiments à travers leur enveloppe, les matériaux de construction doivent limiter le transfert de chaleur en leur sein. A ce titre, les matériaux en terre possèdent les caractéristiques pouvant répondre à cette attente. Ainsi, grâce à leurs conductivités thermiques relativement plus faibles que celles des matériaux conventionnels, les matériaux terreux freinent la transmission de la chaleur. Ce phénomène s'explique par la structure interne de ces matériaux qui se compose d'une matrice rigide au sein de laquelle se trouvent des pores. Ainsi, soumis à un gradient de température, le flux de chaleur traversant le matériau est limité par les poches d'air créées par la présence des pores (l'air statique étant beaucoup plus isolant que la matrice rigide du matériau). Par ailleurs, les matériaux terreux biosourcés possèdent la capacité d'absorber et de restituer de l'humidité. Ce pouvoir hygroscopique engendre le remplacement d'une partie de l'air contenu dans les pores par de l'eau à l'état vapeur et/ou liquide. L'eau étant plus conductrice que l'air, ( $\lambda_{\text{eau}} = 0,6 \text{ W/m.K}$

et  $\lambda_{\text{air}} = 0,024 \text{ W/m.K}$ ), le transfert de chaleur à travers le matériau est donc impacté. D'un autre côté, une augmentation de la température du matériau provoque un déplacement de molécules d'eau au sein du matériau. Cette interaction entre les transferts de chaleur et d'humidité au sein du matériau exerce une influence sur la consommation énergétique des bâtiments. Dans un premier temps, la présence d'eau dans les pores favorise le transfert de chaleur à travers le matériau et donc les pertes ou gains de charges. Dans un second temps, l'hygroscopicité des matériaux terreux biosourcés permet une régulation passive de l'humidité intérieure et par conséquent des économies d'énergie et une amélioration du confort thermique. Ainsi, pour Rousseau (2003), la qualité de la conception d'un bâtiment, du point de vue énergétique, dépend de la compréhension faite des mécanismes de transfert et de stockage de l'humidité dans l'enveloppe en raison de son influence sur le transfert de chaleur. La modélisation du transfert couplé de chaleur et de masse (air + humidité) au sein des matériaux hygroscopiques est donc indispensable pour une évaluation optimale des besoins énergétiques.

### 1.5.1 Transfert hygrique

Selon la théorie de Langmuir (Swenson & Stadie, 2019), dans un environnement à faible humidité ( $< 20\%$ ), un phénomène d'adsorption de vapeur d'eau mono-moléculaire se produit sur la surface intérieure des pores. Cette adsorption devient multimoléculaire lorsque l'humidité devient supérieure à 50% (théorie de BET (Brunauer et al., 1938)). Ainsi, dans les pores de faibles diamètres, une condensation partielle se produit, entraînant la présence d'eau liquide et de vapeur séparées par un ménisque. Le transfert de masse peut alors se faire sous forme liquide (absorption capillaire à travers les surfaces des pores) et gazeuse. Le transfert isotherme de vapeur d'eau à travers un matériau se fait par diffusion moléculaire (loi de Fick) et par le phénomène d'effusion de Knüdsen. Dans le premier cas, le transfert se fait uniquement par choc entre les molécules dans des pores de diamètre supérieur au libre parcours moyen (distance parcourue par une molécule de vapeur d'eau entre deux chocs intermoléculaires). Tandis que pour l'effusion de Knüdsen, les interactions se produisent généralement entre les molécules d'eau et la matrice rigide entourant des pores de plus petites tailles (diamètre inférieur au libre parcours moyen). Il faut cependant noter que les transferts d'humidité ne se font qu'à travers les pores ouverts ; les pores isolés n'étant pas concernés. Les taux de diffusion de l'humidité moléculaire et de Knüdsen sont respectivement donnés par les équations (1.10) et (1.11).

$$N_c = -D_c \nabla C_v \quad \text{avec} \quad D_c = c \left( \frac{p_0}{p} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \quad (1.10)$$

Où  $N_c$  est le taux de diffusion de l'humidité moléculaire ( $\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ ) ;  $D_c$  le coefficient de diffusion moléculaire ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ;  $C_v$  la concentration molaire de vapeur ( $\text{mol/m}^3$ ) ;  $c = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  ;  $p_0$  la pression atmosphérique de l'air ( $p_0 = 1,1325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ) ;  $p$  la pression totale ( $\text{Pa}$ ) ;  $T$  la température ( $\text{K}$ ) ;  $T_0$  la température de référence ( $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ) et  $n$  le nombre de nœuds ( $n = 1,88$ ).

$$N_K = -D_K \nabla C_v \quad \text{avec} \quad D_K = \frac{d}{3} \sqrt{\frac{8K_b T}{\pi m_a}} = 9,7 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1.11)$$

Où  $N_K$  représente le taux de diffusion de l'humidité ( $mol/m^2 \cdot s$ ) ;  $D_K$  le coefficient de diffusion de Knüdsen ( $m^2/s$ ) ;  $d$  le diamètre des pores ( $m$ ) ;  $K_b$  la constante de Boltzmann ( $K_b = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ kg} \cdot m^2/s^2 \cdot K^1$ ) ;  $m_a$  la masse des particules d'air ( $kg$ ) et  $M$  la masse molaire de la vapeur d'eau ( $kg/mol$ ).

Par ailleurs, la densité de flux massique de vapeur d'eau traversant une paroi peut être déterminée par l'équation (1.12).

$$j_v = -\delta \nabla p_v - k_{fv} \nabla p \quad (1.12)$$

Où  $j_v$  est la densité de flux massique de vapeur d'eau ( $kg/m^2 \cdot s$ ) ;  $\delta$  la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ) ;  $p_v$  la pression de vapeur d'eau ( $Pa$ ) ;  $k_{fv}$  le coefficient d'infiltration de vapeur d'eau ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ),  $p$  la pression totale ( $Pa$ ).

Quant au transfert d'eau liquide (diffusion surfacique), les molécules d'eau fixées à la surface des pores sont mises en mouvement grâce à une énergie d'activation (Do, 1998) générée par un gradient de pression capillaire ou par les forces de gravité. Pour autant, Hamdaoui et al. (2021) affirment que le transfert d'eau liquide est principalement assuré par un gradient de pression, ce qui permet de négliger le transfert par gravité. La densité de flux liquide traversant la paroi, définie par la loi de Darcy, est alors exprimée par les équations (1.13), (1.14) et (1.15).

$$j_l = -k_l \nabla p_c - k_{fl} \nabla p \quad (1.13)$$

Avec :

$$p_c = p_a - p_l = \frac{RT \rho_l}{M} \ln \left( \frac{p_v}{p_{v,sat}} \right) \quad (1.14)$$

$$p_{v,sat} = \exp \left( 23,577 - \frac{4042,9}{T - 37,58} \right) \quad (1.15)$$

Où  $j_l$  est la densité de flux massique du liquide ( $kg/m^2 \cdot s$ ) ;  $k_l$  la conductivité hydraulique ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ) ;  $p_c$  la pression capillaire ( $Pa$ ) ;  $k_{fl}$  le coefficient d'infiltration liquide ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ) ;  $p_a$  la pression d'air ( $Pa$ ) ;  $p_l$  la pression de l'eau liquide ( $Pa$ ) ;  $R$  la constante des gaz parfaits ( $R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot K$ ) ;  $\rho_l$  la masse volumique de l'eau ( $kg/m^3$ ) ;  $P_{v,sat}$  la pression de vapeur d'eau saturante ( $Pa$ ).

La densité de flux massique de l'ensemble (vapeur + eau liquide) est alors définie par l'équation (1.16).

$$j_m = j_v + j_l = -k_v \nabla p_v - k_l \nabla p_c - (k_{fv} + k_{fl}) \nabla p \quad (1.16)$$



Où  $k_f = k_{fv} + k_{fl}$  représente le coefficient d'infiltration totale.

Le bilan massique de l'humidité au sein du matériau peut s'établir comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -div(j_m) \quad (1.17)$$

Avec  $u$  la teneur en humidité (vapeur et eau liquide) du matériau en  $kg/m^3$  et  $j_m$  la densité totale de flux massique en  $kg/m^2 \cdot s$ .

### 1.5.2 Transfert thermique

Le principal mode de transfert de chaleur à travers les matériaux de construction est la conduction thermique (loi de Fourier). Pour les matériaux poreux, cette conduction s'accompagne de la convection et du rayonnement thermique à l'intérieur des pores. Cependant, dans les modélisations, ces deux modes de transfert sont généralement négligés devant la conduction. Ils sont considérés comme étant pris en compte lors de la détermination expérimentale des propriétés thermiques du matériau poreux réalisée à l'échelle macroscopique (Ferroukhi, 2016).

$$j_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (1.18)$$

Où  $j_{cond}$  est la densité de flux de chaleur par conduction ( $W/m^2$ ) ;  $\lambda$  la conductivité thermique du matériau ( $W/m \cdot K$ ) et  $\nabla T$  le gradient de température.

En outre, les matériaux hygroscopiques étant caractérisés par un transfert d'humidité, ce dernier provoque un transfert supplémentaire de chaleur et une chaleur latente due au changement de phase de l'eau liquide au sein du matériau. Le flux de chaleur total traversant le matériau revient donc à une combinaison de flux par conduction, par advection et par changement de phase. L'équation (1.19) exprime la densité de flux au sein d'un matériau hygroscopique.

$$j_q = j_{cond} + h_l \cdot j_m + L_v \cdot j_v \quad (1.19)$$

Où  $j_q$  représente la densité totale de flux de chaleur traversant le matériau hygroscopique ( $W/m^2$ ) ;  $h_l$  l'enthalpie massique de l'eau liquide ( $J/kg$ ) ;  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation ( $J/kg$ ).

Le bilan d'énergie dans ce cas de figure est donné par l'expression (1.20).

$$C_p \cdot \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -div(j_q) \quad (1.20)$$

Où  $C_p$  est la chaleur spécifique ( $J/kg \cdot K$ ) et  $\rho_s$  la masse volumique sèche ( $kg/m^3$ ).

### 1.5.3 Transfert aéraulique

Les matériaux hygroscopiques sont perméables aux infiltrations d'air. Le transfert aéraulique se traduit par l'infiltration de l'air dans les matériaux hygroscopiques due à un gradient de

pression. Ce faisant, Grunewald & Nicolai (2006) insistent sur l'influence du gradient de pression d'air sur le transfert hygrothermique à travers les parois hygroscopiques. L'air en contact avec le matériau étant composé d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, le transfert se traduit donc par l'expression (1.21).

$$j_a + j_v = -k_f \nabla P \quad (1.21)$$

Où  $j_a$  est la densité de flux massique d'air sec traversant le matériau ( $kg.m^2/s^1$ ).

L'expression (1.22) représente l'équation bilan de l'air sec au sein du matériau.

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = -div(j_a) \quad (1.22)$$

Où  $u_a$  est la teneur en air sec du matériau ( $kg/m^3$ ).

#### 1.5.4 Couplage des transferts de chaleur et de masse

Le couplage des transferts de chaleur, d'air et d'humidité à travers une enveloppe hygroscopique est modélisé par la résolution des équations bilans de masse et d'énergie (équation (1.23)).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = -div(j_m) \\ c_p \cdot \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -div(j_q) \\ \frac{\partial u_a}{\partial t} = -div(j_a) \end{array} \right. \quad (1.23)$$

A cette fin, plusieurs modèles de couplage ont été identifiés dans la littérature. Ils peuvent être classés en deux catégories : les modèles homogénéisés à changement d'échelle microscopique–macroscopique et les modèles phénoménologiques macroscopiques (Ferroukhi, 2016). Pour la modélisation par homogénéisation, l'hypothèse d'un matériau homogène est mise en avant malgré la présence de pores dans le matériau réel étudié. Cette approche consiste à transcrire le comportement, à l'échelle microscopique, du matériau hétérogène à un matériau supposé homogène étudié à l'échelle macroscopique. La méthode a été utilisée par Abahri (2012) dans son mémoire de thèse pour modéliser le transfert couplé de chaleur et de masse à travers des matériaux de construction poreux. En se concentrant sous la forme périodique de l'homogénéisation, Mchirgui (2013) effectue la modélisation des transferts hydriques à travers les matériaux cimentaires. Remki et al. (2012) ont quant à eux développé une approche d'homogénéisation basée sur l'analyse des dommages anisotropes dans les matériaux fragiles. Le modèle proposé a été validé pour donner suite à une bonne correspondance entre les résultats numériques et les données issues des expérimentations.

Contrairement à l'approche par homogénéisation qui étend le comportement à l'échelle microscopique du matériau à une échelle macroscopique, l'approche phénoménologique permet d'étudier le comportement hygrothermique du matériau directement à l'échelle

macroscopique en le considérant comme un matériau homogène. Dans une telle approche, les différents modèles développés se réfèrent aux propriétés hygrothermiques du matériau (conductivité thermique, capacité thermique, perméabilité à la vapeur, etc.) déterminées expérimentalement à l'échelle macroscopique et aux forces motrices assurant le transfert hygrothermique au sein du matériau (Ferroukhi, 2016). De façon générale, le transfert de chaleur est assuré par la température. Quant au transfert de masse, différentes forces motrices ou moteurs ont été employés dans la littérature. Il s'agit de la pression de vapeur d'eau (Janssens, 2001), la pression capillaire (Janssen et al., 2007), la teneur en humidité volumétrique du matériau (Mendes et al., 2001) et l'humidité relative de l'ambiance (Künzel et al., 2010). L'approche phénoménologique est la plus adoptée dans la littérature pour la modélisation mathématique des transferts HAM à travers l'enveloppe du bâtiment.

## **1.6 Modélisation physique du transfert couplé de chaleur et de masse**

La description mathématique du transfert couplé de chaleur et de masse à travers un matériau hygroscopique tient compte des lois de diffusion de chaleur (loi de Fourier), de l'air (loi de Darcy), de l'humidité (loi de Fick) et de la conservation de l'énergie et de la masse. Cette description de la combinaison des phénomènes précités conduit à l'établissement d'équations aux dérivées partielles (EDP) (Hens, 2002) dont la résolution analytique n'est pas toujours évidente. Les méthodes d'éléments finis, de volumes finis, de différences finies permettent cependant une résolution numérique de ces équations. Toutefois, cette approche demeure complexe et nécessite une parfaite compréhension des phénomènes physiques. Outre les transferts hygrothermiques à travers l'enveloppe, Ferroukhi (2016) met en évidence la complexité de la modélisation analytique des échanges de chaleur et de masse entre l'enveloppe et son environnement. Pour toutes ces raisons, plusieurs outils de simulation du comportement hygrothermique et de la performance énergétique des bâtiments ont été développés. Le Tableau 1.5 présente une liste non exhaustive des outils utilisés à cet effet. Parmi ceux-ci, seuls les logiciels COMSOL Multiphysics, Fluent, ANSYS-CFD et WUFI tiennent compte des interactions enveloppe – environnement lors des simulations 3D de transferts couplés de chaleur et d'humidité. Cependant, l'utilisation des trois premiers outils est limitée par leur complexité à l'emploi et les temps de simulation parfois très longs. D'ailleurs Zhang et al. (2020) relèvent entre autres la nécessité pour l'utilisateur d'implémenter lui-même les données climatiques et autres conditions aux limites ; ce qui n'est pas le cas de WUFI qui dispose d'une base de données climatiques assez vaste. Par ailleurs, malgré sa grande notoriété dans le domaine de la simulation énergétique des bâtiments, l'usage de TRNSYS dans le transfert hygrométrique à travers les enveloppes reste aussi limité.

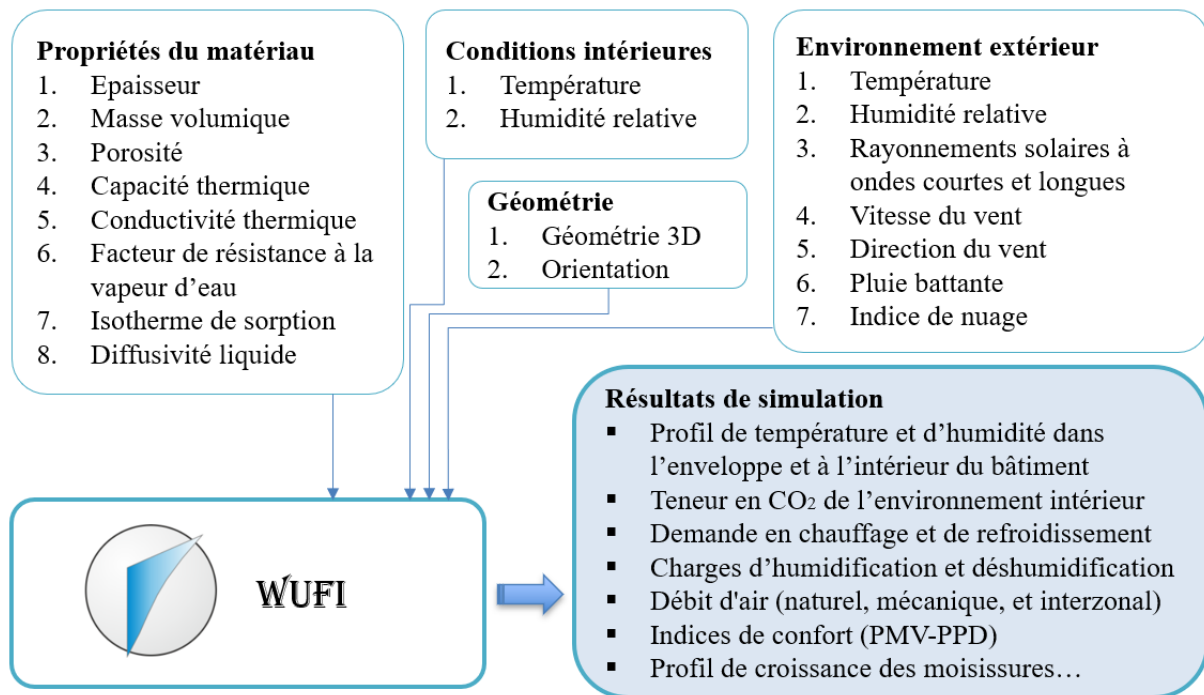
Murray et al. (2009) décrivent TRNSYS comme un puissant outil de simulation utilisant des composants (appelé Type) connectés entre eux pour imiter le fonctionnement réel des systèmes énergétiques. Ces composants sont des boîtes noires représentant différents systèmes dont les sorties dépendent des variables d'entrées et paramètres renseignés par l'utilisateur. TRNSYS se distingue par sa structure ouverte et modulaire offrant une grande flexibilité à ses utilisateurs à travers les simulations de systèmes d'énergies renouvelables (solaire, éolien, etc.), de cogénération et des simulations énergétiques de bâtiments multizones et de ses composants. Il a largement été employé dans la littérature pour des travaux d'évaluation de confort thermique

(Frenzel et al., 2011; Salvalai et al., 2013), d'évaluation des performances énergétiques des bâtiments et de ses systèmes (Herrera et al., 2015; M. Rashad et al., 2022) et d'optimisation énergétique des bâtiments avec intégration des énergies renouvelables (Herrera et al., 2015). Cependant, son utilisation se trouve limiter dans la modélisation des transferts HAM. En effet, TRNSYS utilise des modèles simplifiés de transfert hydrique à travers l'enveloppe des bâtiments. Il n'effectue pas la modélisation du transfert couplé de chaleur et de masse à travers l'enveloppe d'un bâtiment que sur une mince couche ( $EMPD_{TRNSYS} < 10$  mm). Or pour des enveloppes composées de matériaux hygroscopiques, l' $EMPD_{TRNSYS}$  est jugée relativement faible. Cette simplification du transfert HAM dans l'enveloppe de bâtiment remet donc en cause la précision des résultats de simulation des bâtiments à enveloppe hygroscopique. En revanche, le logiciel WUFI possède la capacité de modéliser le transfert couplé de chaleur et de masse à travers toute l'épaisseur de l'enveloppe. Aussi, la prise en compte des interactions entre l'enveloppe et son environnement fait de cet outil, un logiciel de simulation complet.

Ayant pour acronyme Wärme Und Feuchte Instationär (chaleur et humidité transitoire), WUFI est un logiciel de simulation destiné principalement à l'analyse du comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments. Il a été développé en 1994 en Allemagne par Fraunhofer IBP pour répondre aux énormes pertes économiques liées aux dommages structurels évitables des bâtiments privés et publics (FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS IBP, 2021). Depuis lors, des améliorations continues ont été apportées au programme pour une meilleure précision des résultats de simulation. Pour l'heure, le logiciel dispose de quatre versions commerciales que sont le WUFI Pro, le WUFI 2D, le WUFI Plus et le dernier en date le WUFI Passive. Le premier se sert des caractéristiques hygrothermiques des matériaux composant l'enveloppe et des conditions climatiques extérieures (températures, humidité, pluie, rayonnement solaire) pour effectuer les simulations de transfert hygrothermique unidirectionnel à travers les enveloppes de bâtiments. WUFI 2D quant à lui a été proposé en complément à WUFI Pro pour des calculs de transfert hygrothermique bidirectionnel. Cependant, conscient de l'importance des interactions entre l'enveloppe et les ambiances extérieure et intérieure, la version WUFI Plus a été développée pour simuler avec précision les conditions hygrothermiques et les besoins énergétiques des bâtiments. Dans cette version, il est également possible d'évaluer le niveau de confort thermique, la qualité de l'air intérieur et les dommages liés à l'humidité (Figure 1.12). Pour finir, les développeurs du programme ont mis sur le marché le WUFI Passive. Il utilise les programmes de simulation de WUFI Plus combinés à une méthode de bilan énergétique mensuel pour optimiser la conception des bâtiments à très faible consommation énergétique (bâtiments passifs) (*What is WUFI®? / WUFI (en)*, s. d.) .

**Tableau 1.5:** Outils de simulation HAM et BES

<i>Logiciels</i>	<i>Enveloppe du bâtiment</i>			<i>Atmosphère intérieure (transfert hygrothermique)</i>	<i>Granularité</i>		<i>Accessibilité</i>	<i>Référence</i>
		Transfert de chaleur	Transfert d'air et d'humidité		Monozone	Multizone		
TRNSYS	1D	√	–	√	√	√	Commercial	
EnergyPlus								
1D-HAM	1D	√	√	×	×	×	Commercial	
HAM-Lab	1D	√	√	×	×	×	Gratuit	(Schijndel & Hensen, 2005)
HAM-Tools	1D	√	√	√	√	–	Gratuit	(Woloszyn et al., 2009)
HAM-BE	2D	√	√	×	√	√	Commercial	(Qinru Li et al., 2009)
UMIDUS	1D	√	√	×	×	×	Gratuit	
MOIST	1D	√	√	×	×	×	Gratuit	
IDA-ICE	1D	√	√	×	×	×	Gratuit	(Woloszyn et al., 2009)
Clim2000	1D	√	√	–	–	–	Commercial	(Woloszyn et al., 2009)
MOISTURE-EXPERT	2D	√	√	×	×	×	Gratuit	(Nofal et al., 2001)
HygIRC (LATENITE)	1D/2D	√	√	×	×	×	Commercial	
DELPHIN	1D/2D	√	√	–	–	–	Gratuit /Commercial	
WUFI	1D/2D/3D	√	√	√	√	√	Commercial	
COMSOL Multiphysics	1D/2D/3D	√	√	√	√	√	Commercial	(Conductivité thermique des matériaux ( $\lambda$ ) - Energie Plus Le Site, s. d.)
Fluent	1D/2D/3D	√	√	√	√		Commercial	
ANSYS-CFD	1D/2D/3D	√	√	√	√		Commercial	



*Figure 1.12:* Paramètres d'entrée et de sortie de WUFI Plus

## 1.7 Etude du confort hygrothermique dans les bâtiments

L'un des principaux critères qui justifie le bon fonctionnement d'un bâtiment est le confort thermique qu'il procure à ses occupants. Outre son esthétique et sa performance énergétique, un bâtiment sera prioritairement jugé en fonction du ressenti hygrothermique des occupants. Ce ressenti est à l'origine du bien être des personnes et constitue donc un facteur indispensable à prendre en compte dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Ainsi, toute stratégie mise en œuvre pour limiter la consommation énergétique des bâtiments doit se baser sur le confort thermique intérieur. Pour se faire, une évaluation précise du niveau de confort souhaité est nécessaire pour non seulement assurer le bien-être des occupants, mais aussi adapter les stratégies d'efficacité énergétique pour une utilisation optimale des ressources énergétiques.

En effet, le confort thermique est un état d'esprit où l'homme exprime sa totale satisfaction vis-à-vis de son environnement thermique (ASHRAE Standard 55-2010, 2010). Il a un impact direct sur le bien-être physique, psychologique et la bonne productivité des personnes (Mora & Bean, 2018; S. Zhang et al., 2017). Etant donné le temps passé par un individu dans un bâtiment (60 à 90% (Bernstein et al., 2008; Brasche & Bischof, 2005; Mora & Bean, 2018)), un environnement inconfortable peut entraîner une dégradation de la santé (maux de tête et de gorge, infection respiratoire, fatigue, etc.) (Sterling et al., 1991) et une perte de productivité (Lipczynska et al., 2018; Roelofsen, 2016). Sur ce dernier point, Vimalanathan & Babu (2014) ont montré que la température de fonctionnement des bureaux influence de 38,56% la productivité des employés. Cui et al. (2013) ont également observé une baisse du niveau

d'apprentissage des élèves soumis à des environnements inconfortables. Après une revue de littérature sur le lien entre le confort thermique et la productivité des occupants de bâtiments de bureau, Tarantini et al. (2017) en sont arrivés à la conclusion que des environnements de travail confortables réduisent considérablement la perte de productivité, limitent les congés maladies et les frais de santé et augmentent les taux opérationnels du personnel. Ainsi, une évaluation rigoureuse du confort thermique est nécessaire pour une mise en œuvre efficace des stratégies d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

Selon Fanger (1970), le confort thermique dépend de six paramètres de base qui sont la température de l'air de l'ambiance, la température radiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air, le métabolisme et le niveau d'habillement des occupants. Les quatre premiers paramètres sont liés à l'environnement considéré et les deux autres liés aux occupants (Yang et al., 2014). Mais au-delà de ces variables, la perception thermique d'un environnement peut être influencée par des variables physiologiques, psychologiques et sociologiques (Kaushik et al., 2020). Moujalled (2007) rapporte que, selon Parsons, l'étude du confort thermique doit être menée en considérant ses différents aspects physiques, physiologiques et psychologiques afin de prendre en compte les interrelations entre les conditions thermiques du milieu, les réponses physiologiques et les phénomènes psychologiques. L'aspect physique du confort thermique prend en compte les différents transferts de chaleur entre l'homme et son environnement. Ces échanges se font par voie respiratoire et par voie cutanée suivant les différents modes de transfert de chaleur (la conduction, la convection, le rayonnement et l'évaporation) dans le but de maintenir la température interne du corps autour de  $37^{\circ}\text{C}$  (Figure 1.13). Cette recherche permanente de l'équilibre thermique du corps humain passe par la thermorégulation, qui n'est rien d'autre que l'ensemble des mécanismes conscients et inconscients qui régulent la température du corps humain. C'est l'aspect physiologique du confort thermique. Quant à l'aspect psychologique, il analyse les réponses psychologiques résultant de l'interaction entre les caractéristiques physiques de l'environnement et la perception par les individus.

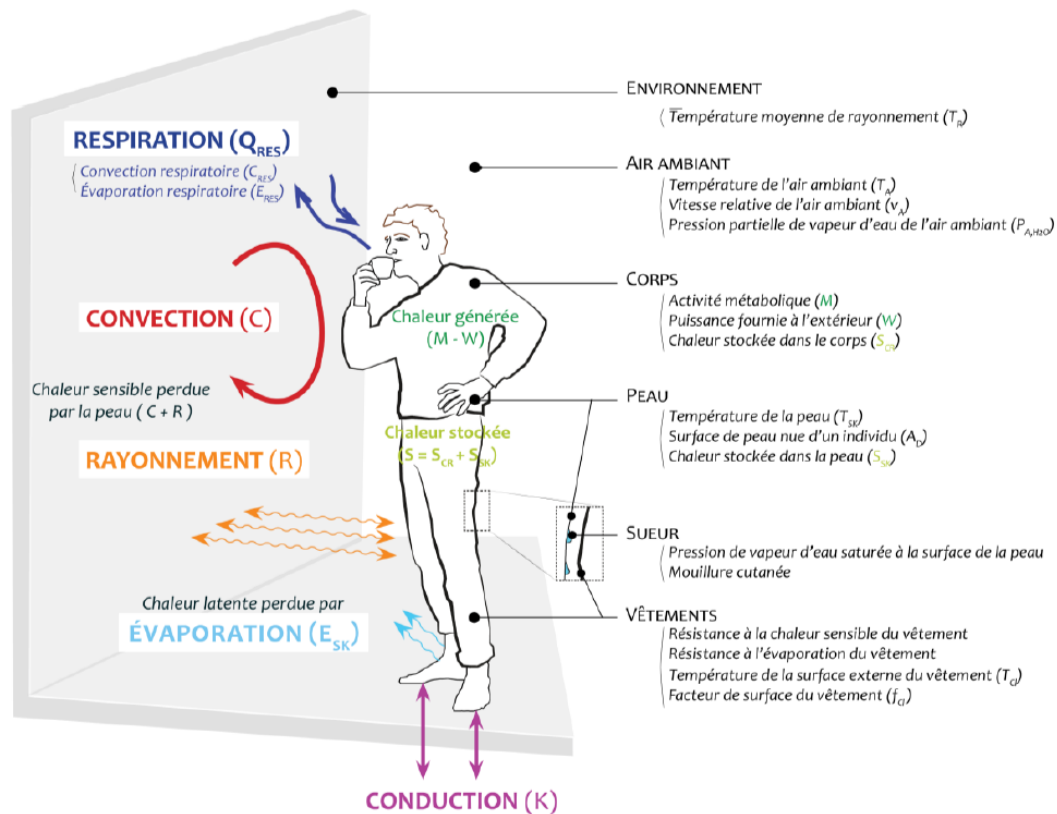


Figure 1.13: L'interaction thermique entre l'homme et son environnement (Batier, 2016)

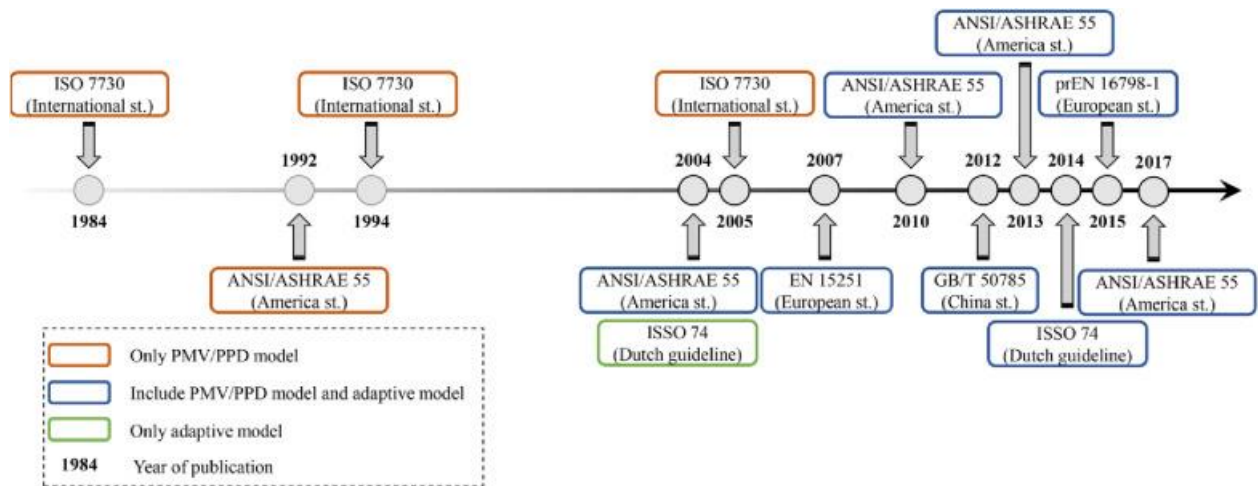
### 1.7.1 Evaluation du confort thermique dans les bâtiments

En dehors du bien être des personnes, l'évaluation du confort thermique dans les bâtiments a été motivée ces dernières années par le besoin d'économie d'énergie dans le secteur des bâtiments. En effet, dans la plupart des bâtiments, le confort thermique est généralement obtenu par utilisation des systèmes CVC qui régulent les conditions hygrothermiques et aérauliques aux valeurs souhaitées. Ces systèmes sont la principale cause de la consommation énergétique excessive des bâtiments. Pérez-Lombard et al. (2008) affirment d'ailleurs que plus de 50% de la consommation énergétique des bâtiments peut donc être attribuée aux systèmes CVC. La consommation énergétique d'un bâtiment dépend principalement du niveau de confort thermique recherché. Un niveau de confort mal défini entraîne entre autres une utilisation inappropriée des systèmes CVC. Ainsi, l'énergie est soit gaspillée ou économisée au détriment d'un inconfort qui remet en cause le bien-être et la productivité des occupants. A cet égard, l'évaluation du confort thermique est essentielle pour répondre de façon efficace aux besoins simultanés de confort et d'économie d'énergie.

L'importance du confort thermique dans les bâtiments s'est faite remarquée à travers de nombreuses publications scientifiques portant sur le développement et l'application des modèles de confort pour l'évaluation du niveau de confort thermique dans les bâtiments. En raison de la pertinence des modèles développés, ils ont été intégrés aux normes internationales



de conception et de gestion des bâtiments. La Figure 1.14 présente les différentes normes internationales traitant du confort thermique, leur évolution au fil des années ainsi que les modèles qui y sont employés. Ces modèles peuvent être regroupés en trois catégories que sont : les modèles statiques, les modèles adaptatifs et les modèles hybrides. Les modèles statiques évaluent le confort thermique en tenant compte des six variables de base du confort que sont la température de l'air, la température radiante, l'humidité et la vitesse de l'air, le métabolisme et le niveau d'habillement. La sensation thermique pour ce type de modèle est généralement exprimée suivant les échelles d'ASHRAE et de Bedford (Tableau 1.6). Il faut cependant remarquer que le confort thermique est une notion subjective et varie d'une personne à une autre. Pour ce faire, des modèles adaptatifs basés sur des enquêtes de confort ont été développés pour prendre en compte le ressenti réel des occupants. Pour autant, selon certains chercheurs, évaluer le confort thermique uniquement sur la base des résultats d'enquête sans tenir compte des six paramètres de base n'est pas réaliste ; de même qu'une évaluation statique sans prise en compte du ressenti réel des occupants. Pour cela, ils proposent une approche hybride d'évaluation du confort combinant les aspects statique et adaptatif du confort thermique.



**Figure 1.14:** Evolution des normes de confort thermique au fil des années (Carlucci et al., 2018)

**Tableau 1.6 :** Echelle de sensation thermique

Sensation thermique	Froid	Frais	Légèrement frais	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
ASHRAE	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Bedford	1	2	3	4	5	6	7

### ❖ Les modèles statiques

Les modèles statiques sont des approches permettant d'évaluer le confort thermique intérieur ou de prédire la sensation thermique des personnes en fonction du bilan thermique humain. Ils ne prennent en compte que les échanges thermiques entre l'homme et son environnement

immédiat. Les deux principaux modèles développés suivant cette approche sont le modèle Standard Effective Temperature (SET) proposé par Gagge et al. (1972) et le modèle Predicted Mean Vote (PMV) développé par (P. O. Fanger, 1970) ; ce dernier étant le plus utilisé dans la littérature.

Le PMV est un modèle empirique d'évaluation du confort thermique qui prédit la réponse moyenne d'un grand groupe de personnes vis-à-vis de leur environnement thermique. Ce modèle est basé sur la théorie conventionnelle de l'équilibre thermique entre le corps humain et l'environnement dans lequel il se trouve. Il a été développé par Fanger sur la base d'expériences en environnement bien contrôlé dans des laboratoires américains et européens. Ce modèle de confort thermique a été adopté par des normes internationales telles que ISO 7730 (2005), ASHRAE Standard 55-2010 (2010) et la norme européenne CEN Standard EN15251 (2007) pour l'évaluation des conditions de confort thermique intérieur. L'indice PMV est déterminé par l'équation (1.24) en fonction des 6 variables de base mentionnées ci-dessus.

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \times L \quad (1.24)$$

Avec :

$$L = (M - W) - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) - 3,05 [5,73 - 0,007(M - W) - P_a] - 0,42(M - W - 58,15) - 0,0173M(5,87 - p_{va}) - 0,0014M(34 - t_a) \quad (1.25)$$

Où  $PMV$  est le vote moyen prévisible ;  $L$  la charge thermique du corps humain ( $W/m^2$ ) ;  $M$  le taux métabolique du corps humain ( $W/m^2$ ) ;  $f_{cl}$  le facteur de la zone vestimentaire ;  $t_{cl}$  température moyenne de la surface extérieure du corps vêtu ( $^{\circ}C$ ) ;  $t_r$  la température radiante moyenne en ( $^{\circ}C$ ) ;  $h_c$  le coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W/m^2.C$ ) ;  $t_a$  la température de l'air ( $^{\circ}C$ ) ;  $W$  le taux de travail mécanique effectué par une personne ( $W/m^2$ ) ;  $p_{va}$  la pression de la vapeur d'eau de l'air ambiant ( $kPa$ ).

La norme ISO 7730 définit le facteur de la zone vestimentaire comme étant le rapport de la surface corporelle couverte par la surface corporelle nue (Zhang et al., 2018). On la détermine grâce aux expressions suivantes :

$$f_{cl} = 1 + 1,29I_{cl} \text{ pour } I_{cl} \leq 0,078$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645I_{cl} \text{ pour } I_{cl} > 0,078$$

Où  $I_{cl}$  est la vêtue exprimée en  $clo$ . La température moyenne de la surface extérieure du corps vêtu ( $t_{cl}$ ) se détermine par itération en utilisant l'équation (1.26).

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - R_{cl} \{ 39,6 \times 10^{-9} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (1.26)$$

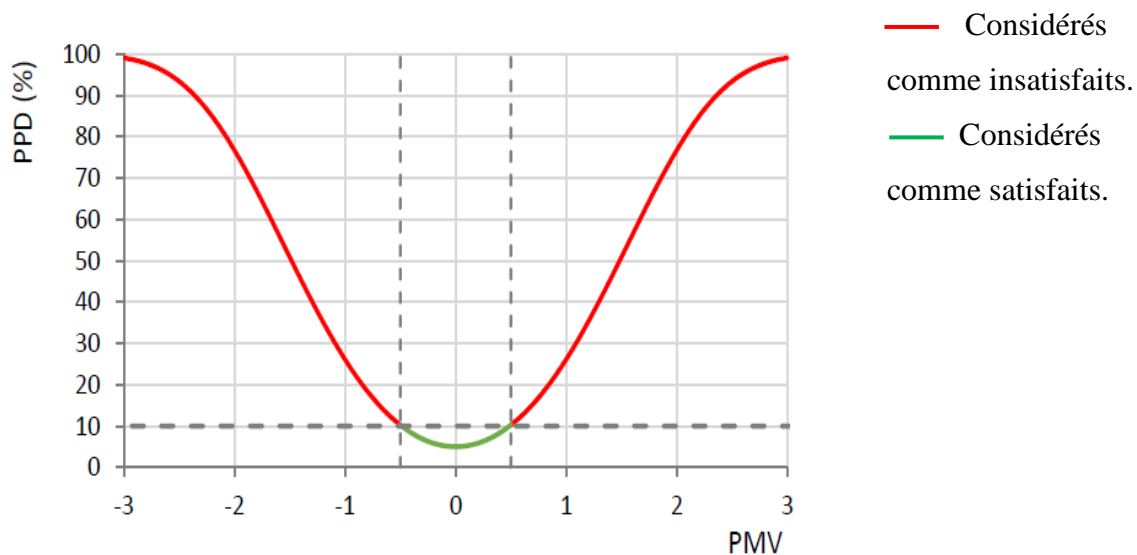
Où  $R_{cl}$  est la résistance thermique du vêtement ( $m^2. ^{\circ}C/W$ ).

En fonction du  $PMV$ , le pourcentage de personnes insatisfaites des conditions thermiques du local où ils se trouvent peut-être déterminé par l'équation (1.27).

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0,335PMV^4 + 0,2179PMV^2)] \quad (1.27)$$

Où  $PPD$  est le Predicted Percentage Dissatisfied (%).

L'intervalle de confort recommandé pour le  $PMV$ , comme stipulé dans la norme ASHRAE 55, est de  $-0,5$  à  $0,5$  (H. Mohamed et al., 2018). Le pourcentage de personnes insatisfaites ( $PPD$ ) pour cette plage de confort est de 10%. Le confort thermique est atteint pour un  $PMV$  nul avec 5% de personnes insatisfaites de ce niveau de confort (Figure 1.15).



**Figure 1.15:** Répartition du pourcentage prévu d'insatisfaits en fonction du vote moyen prévisible (Batier, 2016)

Toutefois, il faut souligner que la fiabilité du  $PMV$  dans la prédiction de la sensation thermique réelle des occupants ne fait pas l'unanimité, notamment dans les bâtiments à fonctionnement mixte et naturellement ventilé (Rijal et al., 2017; Z. Wu et al., 2017; Zaki et al., 2017)(H. Mohamed et al., 2018; Sterling et al., 1991; Zhang et al., 2018). Par exemple, Deuble & de Dear (2012) ont mis en évidence les inadéquations entre le vote de sensation thermique des occupants d'un immeuble de bureau en mode de fonctionnement mixte et le  $PMV$ . Il en est de même pour Nicol & Humphreys (1986) qui ont remarqué que le  $PMV$  présentait des différences marquées et systématiques avec le vote moyen de sensation thermique réelle des occupants aussi bien dans les bâtiments climatisés que dans ceux à fonctionnement libre (ventilation naturelle).

En effet, le  $PMV$  ne s'applique que dans des conditions stables (environnement climatisé à l'état stationnaire). Son utilisation pour l'évaluation du confort dans les ambiances variables (bâtiments à ventilation naturelle) n'est pas recommandée. De nombreuses études révèlent que le  $PMV$  prédit une sensation thermique plus chaude que celle rapportée par les occupants dans les bâtiments à ventilation naturelle lors des enquêtes in situ (Dhaka et al., 2015; Nematchoua

et al., 2014; Ricciardi & Buratti, 2012). Ainsi, pour étendre son application aux bâtiments à fonctionnement libre, des améliorations ont été apportées au modèle original du PMV. C'est ainsi que Fanger et Toftum ont proposé un modèle de PMV étendu en intégrant un facteur d'espérance «  $e$  » au calcul du PMV de base (Fanger & Toftum, 2002). Ce facteur a été proposé dans le but de corriger les écarts observés entre le PMV calculé et le vote relatif à la sensation réelle des occupants des bâtiments à ventilation naturelle (écarts causés par les attentes des occupants et leur capacité d'adaptation). Le facteur d'espérance «  $e$  » varie approximativement entre 0,5 et 1. Il a été déterminé sur analyse d'une base de données de 3200 résultats d'enquêtes de terrain provenant de quatre villes de différents climats à savoir : Bangkok, Brisbane, Athènes et Singapour (Yao et al., 2009). Le PMV étendu se calcule grâce à l'équation (1.28).

$$PMVe = e_p \times PMV \quad (1.28)$$

Où  $PMVe$  est le vote moyen prévisible étendu ;  $e_p$  le facteur d'espérance et  $PMV$  le vote moyen prévisible.

En outre, face aux exigences esthétiques et d'éclairage naturel, les concepteurs augmentent de plus en plus les surfaces vitrées dans les bâtiments. Le confort thermique dans ces types de bâtiment se trouve donc directement impacté par le rayonnement solaire. Ainsi, pour tenir compte de l'impact du rayonnement solaire sur les occupants dans l'évaluation du confort thermique, Zhang et al. (2018) proposent l'utilisation du modèle CPMV pour évaluer le confort thermique dans ces types de bâtiment. Le CPMV est un modèle d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à grande surface vitrée intégrant dans le calcul du PMV, les facteurs des rayonnements courte distance (rayonnement solaire). Il se calcule par l'équation (1.29).

$$\begin{aligned} CPMV = & [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \times \{(M - W) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) \\ & - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - P_a] - 0,42(M - W - 58,15) \\ & - 0,0173M(5,87 - P_a) - 0,0014M(34 - t_a) - R_1 + R_2\} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Où  $CPMV$  est le vote moyen prévu corrigé,  $R_1$  est la densité de chaleur transférée par rayonnement infrarouge entre l'homme et son environnement ( $W/m^2$ ),  $R_2$  est la charge thermique du rayonnement solaire humain par surface corporelle ( $W/m^2$ ).

En tenant compte de l'effet des rayonnements solaires, la température moyenne de la surface extérieure du corps vêtu ( $t_{cl}$ ) est déterminée par l'équation (1.30).

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl}(R_1 - R_2 + C) \quad (1.30)$$

Avec :

$$t_{sk} = 35,7 - 0,0275(M - W) \quad (1.31)$$

Où  $t_{sk}$  est la température cutanée moyenne ( $^{\circ}C$ ) et  $C$  la densité de flux de chaleur par convection ( $W/m^2$ ).

Dans ce cas, le pourcentage de personnes insatisfaites est déterminé par l'équation (1.32) :

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.3353 CPMV^4 + 0.2179 CPMV^2)] \quad (1.32)$$

Malgré les différentes améliorations apportées au PMV, des écarts subsistent toujours entre les résultats de prévision obtenus et la sensation thermique réelle des occupants (Chen et al., 2020; Ghawghawe, 2014; López-Pérez et al., 2019; Z. Zhao et al., 2017). Aussi, Zhao et al. (2017) ont observé des écarts entre les PMV calculés et les votes de sensation thermique des occupants d'un immeuble de bureaux climatisés au Qatar. Selon les auteurs, le PMV qualifie de confortable un environnement jugé légèrement frais par les occupants et trouve que l'ambiance est chaude ou très chaude au moment où les occupants ne ressentent qu'une légère chaleur. Ainsi, au-delà du mode de fonctionnement, l'incapacité des modèles statiques à prédire avec précision la sensation réelle des occupants peut se justifier par l'aspect psychologique du confort et la capacité d'adaptation des occupants. D'où l'importance des votes de sensation thermique dans l'évaluation du confort thermique (approche adaptative).

#### ❖ *Les modèles adaptatifs*

La théorie du confort adaptatif a été proposée pour la première fois par Humphreys et Nicol dans les années 70 en réponse à l'énorme augmentation du prix du pétrole (Brager & de Dear, 1998). Contrairement au PMV qui considère l'homme comme un récepteur passif aux stimuli thermiques extérieurs, le modèle adaptatif prend l'homme comme un système actif interagissant avec son environnement. L'hypothèse adaptative prétend que « *la satisfaction à l'égard d'un climat intérieur est obtenue en faisant correspondre les conditions environnementales thermiques réelles prévalant à ce moment-là et dans l'espace aux attentes thermiques de ce à quoi devrait ressembler le climat intérieur* » (Brager & de Dear, 1998). La norme ASHRAE 55-92 définit alors le confort thermique comme étant la condition psychologique qui exprime la satisfaction d'un individu vis-à-vis de son environnement thermique (ASHRAE, 2004). A cet effet, le principe de l'approche adaptative stipule que : « *si un changement se produit de manière à provoquer un inconfort, les personnes réagissent de manière à rétablir le confort* » (Nicol & Humphreys, 1986). Cette recherche permanente du confort thermique peut alors entraîner des ajustements physiologiques, comportementaux et psychologiques.

L'adaptation physiologique correspond à toute réponse physiologique du corps humain face à un changement de son environnement thermique. Alors que l'adaptation comportementale consiste à rétablir de façon consciente l'équilibre thermique du corps en ajoutant ou en retirant un vêtement, en consommant une boisson chaude ou fraîche ou en agissant sur le fonctionnement des systèmes CVC par exemple. Pour ce qui concerne l'adaptation psychologique, elle est souvent considérée comme une altération de la perception et de la réaction à l'information sensorielle due aux expériences et attentes thermiques subjectives passées. Par exemple, pour montrer l'importance du facteur psychologique dans la perception

thermique d'un local, Moujalled (2007) relate des expériences réalisées par F. H. Rohles. Dans une première expérience, un petit radiateur a été installé derrière le panneau frontal des bureaux de plusieurs secrétaires. Une partie des secrétaires a été informée que le radiateur était en marche et l'autre partie a été informée qu'il ne l'était pas, sachant que dans les deux cas, le radiateur n'était effectivement pas en marche. La température a été maintenue à 18,3°C dans les différents locaux. Les résultats ont montré que les personnes qui étaient informées sur le fonctionnement du radiateur avaient une sensation plus chaude que celles qui ne l'étaient pas.

L'aspect psychologique étant un facteur complexe, difficile à intégrer dans les modèles mais indispensable à l'évaluation du confort thermique, de nombreux chercheurs se sont alors tournés vers des enquêtes de terrain pour recueillir les ressentis thermiques réels des occupants des bâtiments. L'approche adaptative du confort thermique s'appuie donc sur les résultats d'enquêtes de terrain. Les différents modèles issus de cette approche tiennent compte des votes de sensation thermique des occupants du bâtiment considéré et de la température extérieure de la zone d'étude. Compte tenu des paramètres spécifiques liés à l'individu (culture, historique thermique) et à la région (conditions climatiques) où il se trouve, plusieurs équations de confort adaptatif ont été développées dans la littérature. Ces modèles montrent de meilleurs résultats par rapport au modèle bien connu de Fanger. L'approche adaptative a largement été adoptée dans les études de confort thermique, notamment en raison du rôle majeur que jouent les modèles adaptatifs dans la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et de sa facilité d'utilisation. Le Tableau 1.7 présente quelques équations de confort adaptatif pour les bâtiments climatisés identifiées dans la littérature.

**Tableau 1.7 :** Equations de confort adaptatif dans les bâtiments

Mode de fonctionnement du bâtiment	Equation de confort	Type de climat	Source
Ventilation naturelle	$T_c = 0,31T_{rm} + 17,38 ; R^2 = 0,70$	Mondial (10.065)	(ASHRAE, 2004)
	$T_c = 0,33T_{rm} + 18,8 ; R^2 = 0,36$	Européen (1.449)	(CEN Standard EN15251, 2007)
	$T_c = 0,34T_{rm} + 18,83 ; R^2 = 0,52$	Chaud et humide du sud-est de l'Asie (3.028)	(Nguyen et al., 2012)
	$T_c = 0,57T_{rm} + 13,8 ; R^2 = 0,64$	Chaud et humide de la base de données RP 884 (1.673)	(Toe & Kubota, 2013)
	$T_c = 0,26T_{rm} + 21,4 ; r = 0,24$	Sud de l'Inde (1.352)	(Indraganti et al., 2014)
Climatisation	$T_c = 0,13T_{rm} + 22,7$	Chaud et humide du Mexique	(López-Pérez et al., 2019)
	$T_c = 0,049T_{rm} + 22,5$	Chaud et désertique du Qatar	(Indraganti & Boussaa, 2018)
	$T_c = 0,15T_{rm} + 22,1$	Chaud et humide de l'Inde	(Indraganti et al., 2014)
	$T_c = 0,09T_{rm} + 22,6$	–	(CISBE, 2006)
	$T_c = 23,9 + 0,295(T_{rm} - 22) \exp(-[(T_{rm} - 22)/(24\sqrt{2})]^2)$	–	(Michael A. Humphreys & Nicol, 1998)

\* AC : Air conditionné ;  $T_c$  : température de confort (°C) ;  $T_{rm}$ : running mean outdoor temperature (température extérieure moyenne courante).

La température extérieure moyenne courante ( $T_{rm}$ ) est déterminée à partir de la moyenne mobile à pondération exponentielle de la température moyenne quotidienne de l'air extérieur ( $T_{od}$ ) grâce à l'équation (1.33) (M. A. Humphreys et al., 2013).

$$T_{rm} = (1 - \alpha)(T_{od-1} + \alpha T_{od-2} + \alpha^2 T_{od-3} + \dots) \quad (1.33)$$

Où  $\alpha$  un paramètre dont la valeur varie entre 0,6 et 0,9 ;  $T_{od-1}, T_{od-2} \dots$  sont les températures moyennes quotidiennes des jours précédents successivement l'enquête (°C).

Pour les régions tropicales humides telles que Cotonou,  $\alpha = 0,9$  et la  $T_{rm}$  est calculée en utilisant les températures extérieures moyennes quotidiennes pendant 7 à 30 jours consécutifs avant la date de l'enquête (ASHRAE Standard 55-2010, 2010).

### ❖ *Les modèles hybrides*

Fanger affirme que l'une des faiblesses évidentes du modèle adaptatif est qu'il ne prend pas en compte le métabolisme, la vêtue et les quatre paramètres environnementaux qui ont un impact bien connu sur le bilan thermique humain et donc sur la sensation thermique (Fanger & Toftum, 2002). Le PMV – PPD quant à lui tient compte de ces 6 paramètres, mais ignore les facteurs tels que le climat extérieur, les attentes des occupants et leur capacité d'adaptation psychologique et comportementale. Selon de Dear, ceci est loin d'être contradictoire et ces deux approches sont complémentaires puisque le PMV prend en compte les paramètres vestimentaires, d'activité et de climat intérieur pouvant être ajustés par les occupants. Ce qui l'amène à considérer le PMV comme un modèle partiellement adaptatif (Brager & de Dear, 1998). Il finit par conclure que le moyen le plus efficace pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments est de combiner le modèle adaptatif et le PMV (De Dear & Brager, 2002). C'est dans ce sens que Yao et al. (2009) ont développé un nouvel indice d'évaluation du confort thermique normé : vote moyen prévisible adaptatif (adaptive Predict Mean Vote :  $aPMV$ ). L' $aPMV$  est un modèle théorique adaptatif d'évaluation du confort thermique intérieur combinant le PMV et le modèle adaptatif. Il se base sur la théorie de la 'boîte noire' et tient compte des facteurs tels que la culture, le climat, les adaptations sociale, psychologique et comportementale, qui ont un impact sur les sens utilisés pour détecter le confort thermique (Yao et al., 2009). Il a été élaboré grâce à une étude de terrain effectuée auprès de 3621 étudiants dans des bâtiments de conférence non climatisés de la ville de Chongqing en Chine. L' $aPMV$  se calcule par l'équation (1.34).

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda_a \times PMV} \quad (1.34)$$

Le coefficient adaptatif ( $\lambda_a$ ) est déterminé par la méthode des moindres carrés, en substituant les données de l'enquête de confort à l'équation (1.20) ci-dessus et en minimisant l'erreur quadratique entre les TSV (Thermal Sensation Vote) et les  $aPMV$ . Gao et al. (2015) proposent donc l'équation (1.35) pour le calcul de la valeur de  $\lambda_a$ .

$$\lambda_a = \frac{\sum_{i=1}^N 1/TSV_i - \sum_{i=1}^N 1/PMV_i}{N} \quad (1.35)$$

Où  $N$  est le nombre d'ensemble de données,  $TSV_i$  est la sensation thermique dans différentes conditions d'environnement thermique obtenue à l'aide des réponses des occupants et le  $PMV_i$  le vote moyen prévisible estimé à l'aide de mesures physiques.

L' $aPMV$  a été adopté par la norme nationale chinoise d'évaluation de l'environnement thermique intérieur dans les bâtiments civils GB/T 50,785-2012. Cette norme recommande des valeurs de  $\lambda_a = 0,21$  et  $\lambda_a = -0,49$  selon respectivement les critères  $PMV \geq 0$  et  $PMV < 0$  dans les régions d'été chaud et d'hiver chaud ou doux en Chine (Chen et al., 2020). Chen et al. (2020) préconisent la correction du facteur adaptatif afin de l'utiliser dans un climat autre que celui pour lequel il a été développé. Selon les auteurs, les habitants des villes situées dans des



zones climatiques différentes doivent avoir des niveaux différents d'adaptabilité à la sensation thermique. Les valeurs du coefficient adaptatif doivent donc être déterminées en fonction de la zone d'étude puisqu'il dépend de la sensation thermique réelle des personnes.

Olissan et al. (2016) ont également développé un modèle hybride de confort thermique combinant le PMV et le vote de sensation thermique des occupants. Appelé  $PMV_{new}$ , ce modèle a été mis en œuvre pour évaluer le confort thermique des occupants des bâtiments climatisés et naturellement ventilés situés dans la bande côtière du Bénin. Cette région étant soumise à un climat chaud et humide, les auteurs ont estimé l'écart entre le vote de sensation thermique et le PMV de Fanger ( $\Delta PMV$ ) par une régression multilinéaire dont les variables indépendantes sont la température et l'humidité relative de l'air intérieur. Ainsi, le  $PMV_{new}$  se calcule par l'équation (1.36).

$$PMV_{new} = PMV - \Delta PMV \quad (1.36)$$

Avec  $\Delta PMV = a.T_a + b.RH$

Où  $PMV_{new}$  est le PMV de Fanger adapté à la région du sud côtier du Bénin,  $\Delta PMV$  est le facteur correctif,  $T_a$  est la température de l'air intérieur ( $^{\circ}C$ ),  $RH$  est l'humidité relative intérieure (%),  $a$  et  $b$  sont les constantes issues de la régression multilinéaire.

Ce modèle a été testé dans douze ambiances climatisées dans la ville d'Abomey-Calavi au sud du Bénin. Les résultats obtenus ont permis aux auteurs de conclure que le modèle représentait bien le ressenti thermique des occupants des ambiances étudiées.

Pour identifier le modèle de confort le mieux adapté pour le présent cas d'étude, les modèles statique (PMV), adaptatifs (pour bâtiment climatisé) et hybrides ( $aPMV$  et  $PMV_{new}$ ) ont successivement été appliqués sur un bâtiment de bureaux climatisés situé dans la ville de Cotonou au Bénin.

## Conclusion

L'état de l'art sur les solutions développées pour améliorer le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments à travers leurs enveloppes a été mis en évidence dans ce chapitre. Les solutions proposées concernent d'une part, le recours à la nouvelle technologie pour améliorer la performance énergétique des enveloppes. Les façades avec système de protection solaire dynamique, les façades solaires adaptatives, les enveloppes bio-inspirées à architecture météo-sensible sont quelques-unes des solutions innovantes identifiées dans la littérature. Malgré leurs bonnes performances, l'adoption de ces stratégies d'efficacité énergétique se heurte à un coût de réalisation relativement élevé, des matériaux de construction peu accessibles et une main d'œuvre hautement qualifiée. D'autre part, les constructions en terre nécessitent peu de moyens, une main d'œuvre peu qualifiée et des matières premières largement disponibles dans le monde. En raison de leurs propriétés hygrothermiques très intéressantes, ils

contribuent efficacement à l'amélioration passive du confort hygrothermique et à la réduction de la consommation énergétique. Ils impactent très peu l'environnement et participent à la décarbonation du secteur des bâtiments.

Tout ceci conforte le choix porté sur les éco-matériaux dans la présente étude, notamment la terre biosourcée, pour améliorer le confort hygrothermique et l'efficacité énergétique des bâtiments. Cependant, cette revue de littérature a également révélé le caractère fragile de ces matériaux face à la rigueur du climat. Ainsi, pour s'assurer de la capacité de ces matériaux à être employés en toute sécurité et de façon durable dans l'enveloppe des bâtiments, des essais mécaniques et de durabilité doivent être menés. D'où l'intérêt du prochain chapitre portant principalement sur la caractérisation mécanique et la durabilité de l'éco-matériau proposé dans cette étude.

# CHAPITRE 2

## Conception et caractérisation physico-mécanique du matériau terre biosourcée

---

### Sommaire

Introduction .....	51
2.1 Conception de l'éco-matériau.....	51
2.2 Caractérisation physico-mécanique et durabilité des matériaux .....	54
2.3 Caractérisation des éprouvettes .....	57
2.4 Durabilité des éco-matériaux.....	62
2.5 Résultats.....	62
Conclusion.....	74

## 2. CONCEPTION ET CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DU MATERIAU TERRE BIOSOURCEE

---

### Introduction

Plusieurs techniques peuvent être adoptées pour la réalisation des constructions en terre. Comme il a été montré dans le chapitre 1 à la section 1.3, les blocs en terre comprimée (BTC) constituent une alternative écologique, moderne et durable aux constructions en matériaux conventionnels. Cependant, toutes les terres ne peuvent être utilisées pour la fabrication des BTC. Elles doivent satisfaire à certaines exigences physiques (notamment la granulométrie, l'indice de plasticité) avant leur utilisation pour les BTC. La connaissance de ces propriétés nécessite un certain nombre d'essais en laboratoire sur la matière première. Aussi, l'employabilité des matériaux de construction en terre dépend de leurs propriétés mécaniques et de durabilité. Leur détermination est primordiale afin de garantir la tenue structurelle du bâtiment et surtout la sécurité des occupants.

Ainsi, des essais de caractérisation physique, mécanique et de durabilité ont été réalisés sur les matériaux en terre biosourcée mis en œuvre dans le cadre de cette étude. Les essais ont été effectués au Laboratoire d'Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à Ouagadougou au Burkina-Faso.

### 2.1 Conception de l'éco-matériau

#### 2.1.1 Choix des matières premières : matériau terre

La terre utilisée dans cette étude provient de la carrière de Zogbodoméy (entre 2°06' E et 2°08' E et entre 7°04' N et 7°06' N (Sagbo et al., 2015)), une région située au sud du Bénin, à environ 112 km de Cotonou. Ce site représente l'une des plus importantes carrières de matériau de construction argileux au sud du Bénin avec une réserve estimée à 53.198.437 tonnes (Salvien et al., 2020). De précédents travaux témoignent de la nature très argileuse de cette terre (Sagbo et al., 2015; Salvien et al., 2020). Ces affirmations ont été confirmées par l'analyse minéralogique du matériau effectuée par diffraction de rayons X (Figure 2.1). Ce test révèle la présence dominante de kaolinite (> 50%), de quartz (44%) et quelques traces d'hématite et de k-feldspath ( $\leq 1$ ). Ces études recommandent la terre de Zogbodoméy pour la fabrication de briques en argile cuite (Sagbo et al., 2015; Salvien et al., 2020). Cependant, une telle approche nécessite un apport important d'énergie, ce qui ne cadre pas avec les réalités énergétiques du pays. En effet, le Bénin se trouve confronté à un déficit énergétique important. Cela se traduit d'ailleurs par une couverture énergétique d'environ 53%. Ainsi, limiter l'usage de la terre de Zogbodoméy à la fabrication de briques en terre cuite nécessiterait une énergie intrinsèque difficilement mobilisable, surtout dans les régions rurales. Ne promouvoir que la cuisson des briques avec la terre de Zogbodoméy revient à renoncer en partie à la valorisation d'une importante ressource en terre dans la construction de bâtiments durables. Une meilleure valorisation (adaptée au contexte énergétique du Bénin) serait son utilisation en tant que matériau de construction en terre crue. A ce titre, les Blocs de Terre Comprimée (BTC) se



5 cm d'épaisseur génère près de 380 tonnes de sous-produit (concassé 0/5). Son utilisation en tant que stabilisant physique dans la présente étude constitue la première tentative de valorisation de ce produit dans la construction de bâtiments durables. Il convient tout de même de notifier l'étude réalisée par Sekloka et al. (2022) en vue de la valorisation du concassé 0/5 mélangé à de la terre et de liant pour la réalisation de couche de fondation de chaussées. Cependant, malgré les résultats encourageants obtenus, les auteurs préconisent des recherches plus approfondies sur le sujet.

### **2.1.3 Stabilisant chimique**

Selon Egenti & Khatib (2016), la stabilisation chimique des matériaux de construction en terre est inévitable pour atteindre la modernité. Elle est considérée comme nécessaire par plusieurs auteurs pour améliorer la résistance mécanique et assurer une meilleure résistance à l'eau des matériaux en terre (Laibi, 2018; Rigassi, 1985; Walker, 1995). Les travaux de Nshimiyimana et al. (2020) ont montré que, malgré la stabilisation mécanique de la terre pour la fabrication de BTC, l'absence de stabilisateur chimique rend le matériau terreux friable à sec et totalement dégradé au contact de l'eau. Cette stabilisation est d'autant plus indispensable lorsque les matériaux en terre sont exposés à l'environnement extérieur. Bien que la chaux soit plus adaptée pour la stabilisation chimique des terres très argileuses, la nécessité d'un ajout important d'eau limite son emploi pour les BTC dont la fabrication ne sollicite que peu d'eau (Rigassi, 1985). Outre les éco-stabilisants développés dans la littérature (Nshimiyimana et al., 2020; Omar et al., 2018), le ciment semble être un liant hydraulique bien adapté pour assurer la durabilité structurelle des BTC. Même si l'ajout de ciment soulève parfois des questions quant à la durabilité du matériau, il est important de garder à l'esprit que l'énergie intrinsèque d'un matériau en terre crue stabilisée avec une faible proportion de ciment (< 10%) est largement inférieure à celle nécessaire pour la cuisson d'une brique en terre. Pour preuve, Walker (2001) affirme que la fabrication d'un bloc en terre stabilisée avec une faible proportion de ciment conduit à une dépense énergétique d'environ 50% en moins que celle des briques réfractaires. Dans une autre étude, Singh et al. (2021) montrent que la fabrication des BTC stabilisés avec 5% de ciment consomme 11 fois moins d'énergie, pollue 13 fois moins et coûte 15 à 20% moins cher que la brique cuite. Cela étant, des valeurs de 5 à 8% de ciment ont été proposées par Asamoah-Boadu & Afukaar (2001) pour la stabilisation des blocs en terre. Les valeurs de 5 à 10% sont les teneurs recommandées par Mostafa & Uddin (2016). Egenti et al. (2013) quant à eux recommandent 8 à 12% de ciment pour assurer la durabilité des matériaux en terre. Toutefois, G. Minke (2000) affirme qu'une teneur en ciment de plus de 10% rend le matériau économiquement peu rentable et moins convivial. Fort de ces recommandations, une stabilisation au ciment à hauteur de 8% a été retenue pour les BTC proposés dans cette étude. Le choix d'une telle proportion de ciment a également été conforté par les résultats de Taallah et al. (2014) qui, après un passage de 5 à 8% de teneur en ciment, remarquent une nette amélioration de la résistance à la variation dimensionnelle des BTC, notamment en présence de l'eau.

### **2.1.4 Agrégat végétal**

En référence à Gonzalez (2015) et Laborel-Préneron et al. (2018) qui recommandent l'ajout d'agrégat végétal aux matériaux en terre pour en améliorer les performances hygrothermiques, de la paille de chiendent a été choisie comme ajout biosourcé à l'argile de Zogbodomey. De son nom scientifique *Elytrigia repens*, le chiendent est une mauvaise herbe vivace et envahissante de la famille des graminées qui pousse généralement sur les sols cultivables. Il se distingue par ses longues feuilles vert, plus ou moins plates, à nervures fines, et ses tiges souterraines blanchâtres ou jaunâtres appelées rhizomes (Duval, 2004). Il est largement présent au sud du Bénin en raison des grandes de surfaces cultivables non exploitées et du climat tropical humide favorable à son développement. Il fut autrefois utilisé pour la réalisation des toitures des habitations en terre. Son emploi se justifiait par l'environnement confortable qu'il contribuait à offrir aux occupants. Malheureusement, la recherche de modernité a causé la disparition totale de la paille de chiendent dans les constructions. Cependant, quelques vestiges de ce matériau sont encore présents dans certains villages. Ainsi, sa réutilisation dans la construction de bâtiments durables améliorerait le niveau de confort thermique dans ces constructions. Cet usage constitue également une meilleure valorisation de cette mauvaise herbe dont l'élimination se fait le plus souvent avec des herbicides tel que le glyphosate (Duval, 2004). Le chiendent utilisé dans cette étude a été collecté sur le campus de l'Université d'Abomey-Calavi (2°20' E et 6°24' N).

## **2.2 Caractérisation physico-mécanique et durabilité des matériaux**

### **2.2.1 Caractérisation physique des matières premières**

La caractérisation physique des matières premières utilisées dans la fabrication des BTC est essentielle pour prédire le comportement des blocs fabriqués. Une telle caractérisation consiste à déterminer la granulométrie, l'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène (VBS) du matériau. A cet effet, pour déterminer la distribution granulométrique de l'argile, un échantillon a été prélevé par quartage et mis à l'étuve à 105°C jusqu'à la stabilisation de sa masse (variation de masse inférieure à 0,1% sur 24h). Une analyse granulométrique combinée par tamisage et sédimentométrie a par la suite été réalisée conformément aux instructions de la norme ISO 17892-4 (2018). Le tamisage, réalisé sur des particules de terre de taille supérieure à 80 µm, a été mis en œuvre grâce au tamiseur mécanique Retsch AS 2000 sur des tamis CONTROLS de différentes mailles. Les particules de taille inférieure à 80 µm ont en revanche subi l'essai de sédimentométrie. Pour se faire, un densimètre de type torpille a été utilisé pour estimer la vitesse de chute des particules de terre à intervalle de temps différent dans 2 l d'une solution d'eau distillée contenant 60 ml de défloculant (hexamétaphosphate de sodium) et 40 g du matériau à étudier. La température de la solution lors des mesures a été obtenue par immersion de la sonde Checktemp dans le mélange. Des opérations similaires ont été effectuées pour les analyses granulométriques des concassés 0/5 et des mélanges argile + concassé. Pour ces mélanges, la teneur en concassé a varié de 25 à 40% par pas de 5%. Cet ajout progressif de concassé 0/5 à l'argile a été effectué afin d'obtenir un mélange dont la courbe granulométrique

s'inscrit dans le fuseau de diagramme de texture de la norme XP P 13-901 avec une allure similaire à celle du fuseau. Les autres paramètres que sont les limites d'Atterberg et la valeur au bleu de méthylène (VBS) des matériaux ont respectivement été déterminés suivant les normes NF EN ISO 17892-12 et NF EN 933-9+A1. La méthode adoptée pour la détermination des limites plastiques des matériaux est la méthode de Casagrande.

Quant à la paille de chiendent, sa caractérisation a consisté à la détermination de la densité, de la teneur en eau initiale et de l'absorption d'eau du matériau. A ce sujet, Amziane et al. (2017) ont élaboré un protocole standardisé pour caractériser les agrégats végétaux. Les essais qui y sont décrits sont le fruit d'une combinaison de plusieurs protocoles utilisés dans sept (7) différents laboratoires. Ainsi, conformément aux différents protocoles d'essai de Amziane et al. (2017), les paramètres précités ont pu être déterminés. Les échantillons biosourcés testés ont été obtenus après séchage et broyage de la paille de chiendent dans un blender. Le broyage de paille a été initié pour améliorer l'adhérence entre la matrice de terre et les fibres puisque ces dernières présentent un état de surface lisse. Un tamis de 0,5 mm a ensuite été utilisé pour retirer la poussière contenue dans la paille broyée. Les particules de paille de chiendent utilisées pour la production des blocs de terre comprimée (BTC) ont une taille comprise entre 1 et 20 mm.

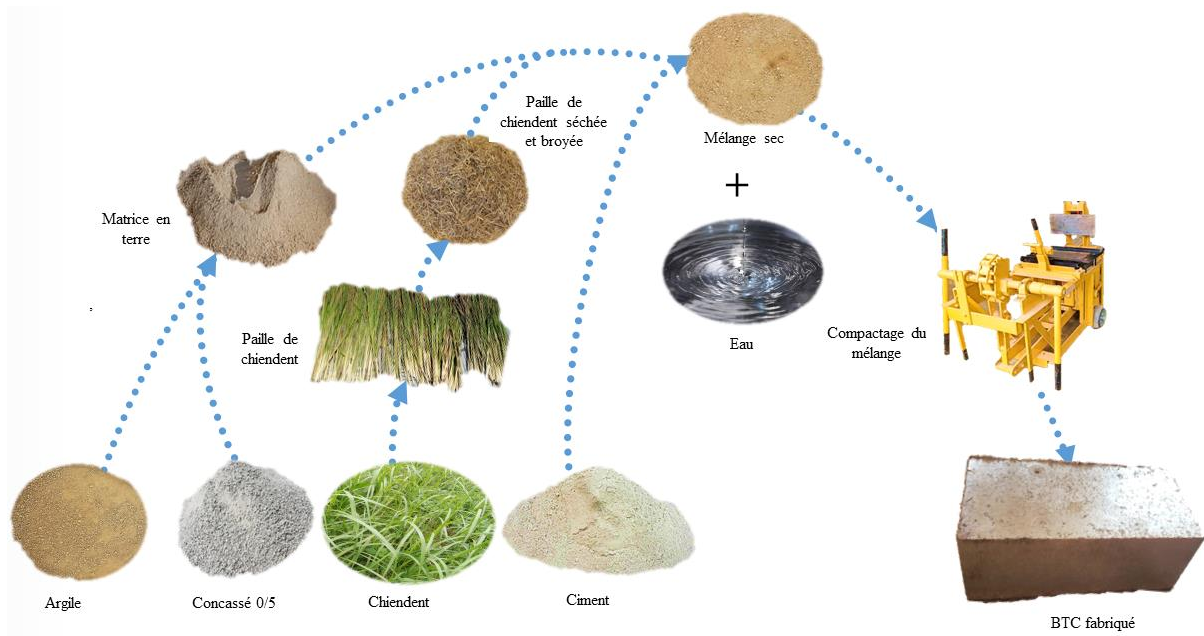
### **2.2.2 Formulation des éprouvettes**

Sur la base des résultats de la caractérisation physique des mélanges argile – concassé 0/5, une formulation de la matrice en terre (argile + concassé 0/5) a été retenue. Cette matrice de terre, désignée dans la suite du document par le terme « *argile* », a été mélangée à une teneur massique de 8% de ciment Portland CEMII 32.5 et à différentes teneurs massiques de paille de chiendent allant de 0 à 2% (Figure 2.3) et (Figure 2.4). En tout, six (6) formulations de BTC ont été fabriquées avec 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 1,75% et 2% de teneur massique en paille de chiendent. Un malaxage à sec puis humide des matières premières composant chaque bloc ont été entrepris pendant au moins 5 min afin de garantir une bonne homogénéisation du mélange. Compte tenu de la forte influence de la teneur en eau sur la qualité des BTC fabriqués (Guettala et al., 2002; Turco et al., 2021), l'essai Proctor (NF P94-093) a d'abord été réalisé sur la matrice en terre stabilisée au ciment afin de déterminer la teneur optimale en eau (TOE) des blocs. A cette teneur en eau s'est ajoutée une quantité d'eau déterminée suivant le protocole standardisé d'Amziane et al. (2017) pour satisfaire l'absorption d'eau supplémentaire causée par la présence de la paille des blocs composites.

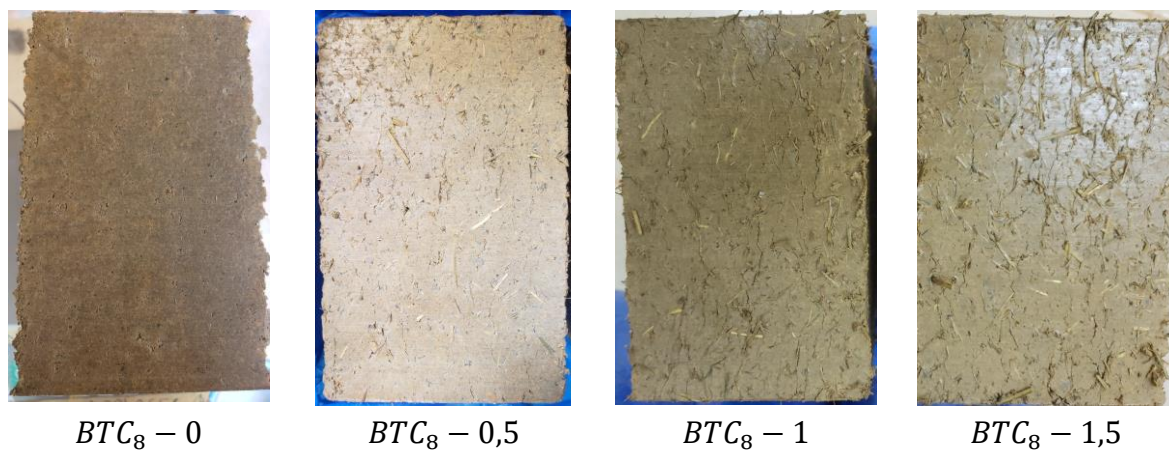
Les mélanges obtenus ont par la suite été manuellement compactés grâce à la Presse TERSTARAM (S.P.R.L Appro-Techno) sous une pression d'environ 35 bars (Soré et al., 2018). Les BTC en argile – paille de chiendent, de dimensions 295 × 140 × 95 mm<sup>3</sup>, ainsi fabriqués ont été immédiatement emballés pour subir une cure de 28 jours (figure 2.5.a). Pour chaque formulation, 14 éprouvettes ont été fabriquées à l'exception des formulations contenant 1,75% et 2% de paille de chiendent. Pour ces deux dernières, des fissures importantes ont été observées sur les blocs (Figure 2.4), entraînant l'arrêt de leur production. Un total de 60



échantillons ont donc été fabriqués. Les échantillons mûris ont à la fin été exposés à l'air libre en laboratoire à une température moyenne de  $29 \pm 3^\circ\text{C}$  pendant 24h puis séchés à l'étuve à  $45^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation de leurs masses. Le Tableau 2.1 présente la composition de chaque formulation.



**Figure 2.2:** Formulation des échantillons



**Figure 2.3:** BTC en argile contenant différentes proportions de paille de chiendent (0% ; 0,5% ; 1% ; 1,5%)



$BTC_8 - 1,75$

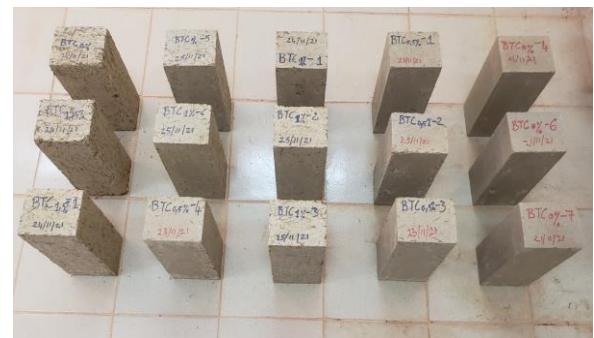


$BTC_8 - 2$

**Figure 2.4:** Aspects des BTC éliminés



(a)



(b)

**Figure 2.5:** (a) BTC emballés pour cure de 28 jours ; (b) BTC refroidis en laboratoire après séchage à l'étuve

**Tableau 2.1:** Composition des éprouvettes

Désignation	Matrice en terre		Matériau biosourcé Paille de chiendent (%)	Stabilisant chimique Ciment (%)	Teneur en eau optimale			Nombre d'échantillons
	Argile (%)	Concassé 0/5 (%)			Matrice (%)	Paille de chiendent (%)	Total (%)	
$BTC_8 - 0$	55,2	36,8	0	8	11,50	0	11,5	14
$BTC_8 - 0,5$	54,9	36,6	0,5	8	11,44	1,01	12,45	14
$BTC_8 - 1$	54,6	36,4	1	8	11,38	2,03	13,42	14
$BTC_8 - 1,5$	54,3	36,2	1,5	8	11,32	3,05	14,38	14
$BTC_8 - 1,75$	54,15	36,1	1,75	8	11,30	3,56	14,86	2
$BTC_8 - 2$	54	36	2	8	11,27	4,07	15,34	2

### 2.3 Caractérisation des éprouvettes

La norme XP P 13-901 (AFNOR, 2001) préconise un certain nombre d'essais à réaliser sur les BTC afin de s'assurer de leur capacité à être utilisés en toute sécurité dans la construction de

bâtiments durables selon la région climatique concernée. Ainsi, pour la région tropicale humide (catégorie H) du sud du Bénin, les caractéristiques physiques (aspect et texture, capillarité et variations dimensionnelles), mécaniques (résistances à la compression sèche et humide) et de durabilité doivent être étudiées. Les dimensions et nombre d'échantillons utilisés pour chaque type d'essai sont présentés dans le tableau 2.2.

**Tableau 2.2:** Taille et nombre d'échantillons par type essai

Caractérisation	Propriété	Dimensions des échantillons (mm <sup>3</sup> )	Nbre d'éprouvette par type formulation	Norme
Physique	Aspect et texture	295 × 140 × 95	14	XP P 13-901
	Absorption capillaire	295 × 140 × 95	3	
	Variations dimensionnelles	295 × 140 × 95	4	
	Masse volumique	140 × 100 × 50	3	NF P18-459
	Porosité accessible	140 × 100 × 50	3	
Mécanique	Résistance à la compression sèche	295 × 140 × 95	3	XP P 13-901
	Résistance à la compression humide	295 × 140 × 95	3	
Durabilité	Résistance à l'abrasion	295 × 140 × 95	3	XP P 13-901
	Résistance à l'érosion	295 × 140 × 95	3	NZS-1998

### 2.3.1 Caractérisation physique

L'aspect et la texture de chaque éprouvette ont été vérifiés selon la norme XP P 13-901. Chaque bloc a donc été visuellement scruté à la recherche de la moindre déféctuosité apparente (cassure, fissure, déformation, épaufrures et trous) avant et après maturation. Les éprouvettes ayant des fissures de largeur, longueur et profondeur respectivement supérieures à 1 mm, 40 mm et 10 mm ont été écartées.

A la suite de cela, les masses volumiques ( $\rho_d$ ) et les porosités accessibles ( $\varepsilon$ ) des différentes formulations ont été déterminées conformément à la norme NF P18-459 (2010). Pour chacune des formulations, trois corps d'épreuve de volume unitaire 0,7 l, découpés dans différents blocs, ont été mis sous vide à 25 mbar pendant environ 4 heures puis saturés d'eau. Grâce à la balance hydrostatique, les masses immergées ( $M_{sat.wat}$ ) des corps d'épreuve ont été mesurées. S'en sont suivies les mesures à l'air libre des masses des corps d'épreuve imbibés d'eau ( $M_{sat.air}$ ) et anhydre ( $M_{dry}$ ). L'application des équations (2.1) et (2.2) permet de calculer respectivement la masse volumique apparente et la porosité des matériaux.

$$\rho_d = \frac{M_{dry} \times \rho_{wat}}{M_{sat.air} - M_{sat.wat}} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{100 \times (M_{sat.air} - M_{dry})}{M_{sat.air} - M_{sat.wat}} \quad (2.2)$$

Où  $\rho_d$  est la masse volumique apparente de l'échantillon ( $kg/m^3$ ),  $M_{dry}$  la masse sèche ( $kg$ ),  $\rho_{wat}$  la masse volumique de l'eau ( $kg/m^3$ ),  $M_{sat.air}$  masse humide de l'échantillon dans l'air ( $kg$ ),  $M_{sat.wat}$  masse de l'échantillon dans l'eau ( $kg$ ) et  $\varepsilon$  la porosité de l'échantillon (%).

Les essais de capillarité ont quant à eux été réalisés selon les recommandations de la norme XP P 13-901. Trois éprouvettes ayant une différence massique maximale de 2 g ont été choisies pour chaque formulation. Les blocs séchés et stabilisés à l'étuve à 70°C puis refroidi à l'air libre en laboratoire pendant 6 h ont été partiellement immergés dans l'eau de sorte que la surface de pose de l'éprouvette plonge dans l'eau à hauteur de 5 mm (Figure 2.6). Le niveau de l'eau est maintenu constant grâce à un système de recirculation d'eau. A chaque 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 16 h et 24 h de temps d'immersion, les éprouvettes sont retirées de l'eau, nettoyées avec un linge humide puis pesées. Les essais ont été prolongés sur une période de 24 h (au-delà des 10 min recommandées par la norme XP P 13-901) pour évaluer le comportement capillaire des blocs face à une immersion surfacique prolongée. L'équation (2.3) permet de déterminer le coefficient d'absorption d'eau par capillarité ( $C_b$ ) de chaque éprouvette.

$$C_b = \frac{100(P_1 - P_0)}{S\sqrt{t}} \quad (2.3)$$

Où  $C_b$  est le coefficient d'absorption d'eau de l'éprouvette ( $g/cm^2 \cdot min^{0.5}$ ),  $P_1$  le peser de l'éprouvette partiellement humide ( $g$ ),  $P_0$  le peser de l'éprouvette sèche ( $g$ ),  $S$  la surface de la face immergée ( $cm^2$ ) et  $t$  la durée d'immersion de l'éprouvette ( $min$ ).





**Figure 2.6:** Essais d'absorption capillaire

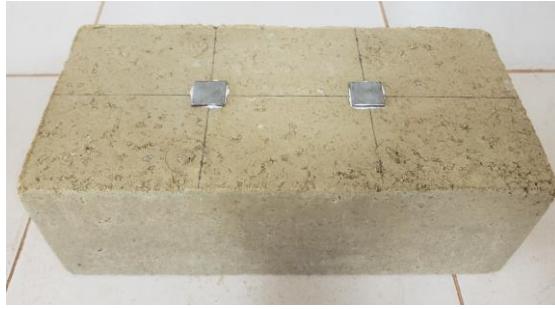
Enfin, grâce aux équations (2.4), (2.5) et (2.6), les variations dimensionnelles telles que les amplitudes de retrait et de gonflement et la variation entre états extrêmes des éprouvettes ont respectivement été déterminées. Les paramètres  $l_0$ ,  $l_1$  et  $l_2$  sont obtenus par mesure des distances entre les plots en acier inoxydable de  $4 \text{ cm}^2$  de superficie chacun, fixés deux à deux sur 4 éprouvettes de chaque formulation avec de la résine. L'amplitude de retrait de chaque formulation a été obtenue par séchage à l'étuve à  $45^\circ\text{C}$  de deux éprouvettes sur les 4 portant les plots. Pour le gonflement, l'amplitude a été déterminée par mouillage (immersion) des deux autres éprouvettes dans de l'eau pendant 96 h.

$$\frac{\Delta l_r}{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta l_{0i} - \Delta l_{2i}}{l_{0i}} \times 1000 \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta l_g}{l} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\Delta l_{1j} - \Delta l_{0j}}{l_{0j}} \times 1000 \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta l_c}{l} = \frac{\Delta l_g}{l} + \frac{\Delta l_r}{l} \quad (2.6)$$

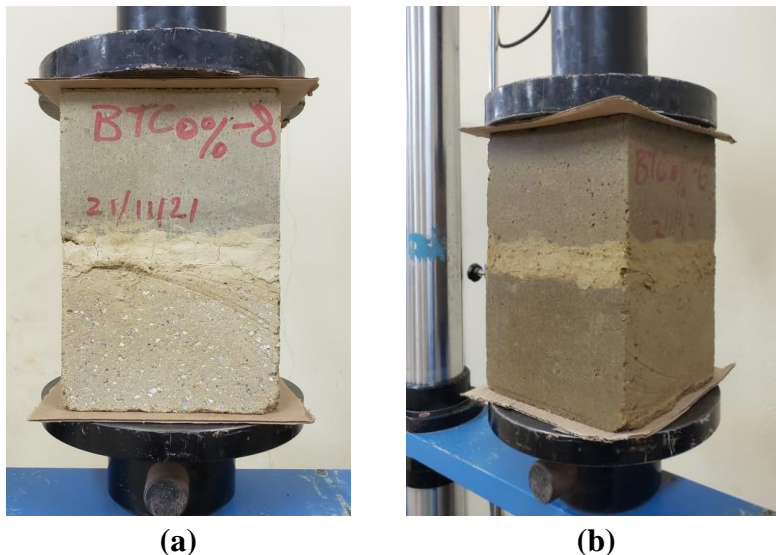
Où  $\Delta l_r/l$  et  $\Delta l_g/l$  représentent respectivement les amplitudes du retrait et du gonflement conventionnels ( $\text{mm}/\text{m}$ ),  $\Delta l_c/l$  l'amplitude de variation dimensionnelle entre les états conventionnels extrêmes ( $\text{mm}/\text{m}$ ),  $l_0$  la distance initiale entre les plots ( $\text{mm}$ ),  $l_2$  la distance entre les plots après séchage ( $\text{mm}$ ),  $l_1$  la distance entre les plots après mouillage ( $\text{mm}$ ),  $i$  et  $j$  les numéros des éprouvettes.



**Figure 2.7:** Plots en acier inoxydable fixés sur les blocs pour les essais de variation dimensionnelle

### 2.3.2 Caractérisation mécanique

L'une des propriétés mécaniques les plus recherchées pour les matériaux de construction en terre est la résistance à la compression. Elle se détermine sous deux formes : la résistance à la compression sèche et la résistance à la compression humide (AFNOR, 2001). Dans la présente étude, ces deux résistances ont été déterminées pour chacune des formulations mise en œuvre. Ce faisant, six éprouvettes de chaque formulation ont été utilisées à raison de 3 éprouvettes par type de résistance. Conformément à la norme XP P 13-901, chaque éprouvette a été découpée en deux grâce à une scie mécanique. Les deux demi-blocs ont été montés l'un sur l'autre comme illustré à la Figure 2.8. L'assemblage des deux a été réalisé grâce à 10 mm de mortier de composition similaire à celle des BTC testés. Les demi-blocs montés ont ensuite été emballés dans des sacs hermétiques pour une cure de 48h. Après cette étape, les éprouvettes ont été comprimées sous la presse hydraulique Proeti safr sous une charge de 300 kN appliquée à une vitesse de 0,2 mm/s (Figure 2.8) pour déterminer leur résistance à la compression. Il faut cependant noter que les demi-blocs destinés à la compression humide ont préalablement subi une immersion totale de 2 h dans l'eau avant d'être assemblés et emballés.



**Figure 2.8:** (a) Essai de résistance en compression sèche ; (b) Essai de résistance en compression humide

## 2.4 Durabilité des éco-matériaux

Les essais de durabilité réalisés dans cette étude se résument à la détermination de la résistance à l'abrasion et la résistance à l'érosion des éprouvettes. Cela étant, Turco et al. (2021) définissent la résistance à l'abrasion comme la réaction opposée par les blocs à toute action externe pouvant leur causer des fissures ou des dommages. En suivant les instructions de la norme XP P 19-901 (Figure 2.9a), l'essai d'abrasion a été réalisé sur trois éprouvettes de chaque formulation. Il en est de même pour les essais d'érosion qui ont été réalisés suivant l'approche de pulvérisation (NZS, 1998) (Figure 2.9b). Spécifiquement pour ce test, des pressions de jet d'eau de 50 kPa et 500 kPa ont été appliquées en référence à l'étude de Nshimiyimana et al. (2021).



**Figure 2.9:** Essais de durabilité des éprouvettes : (a) Abrasion ; (b) Erodabilité

## 2.5 Résultats

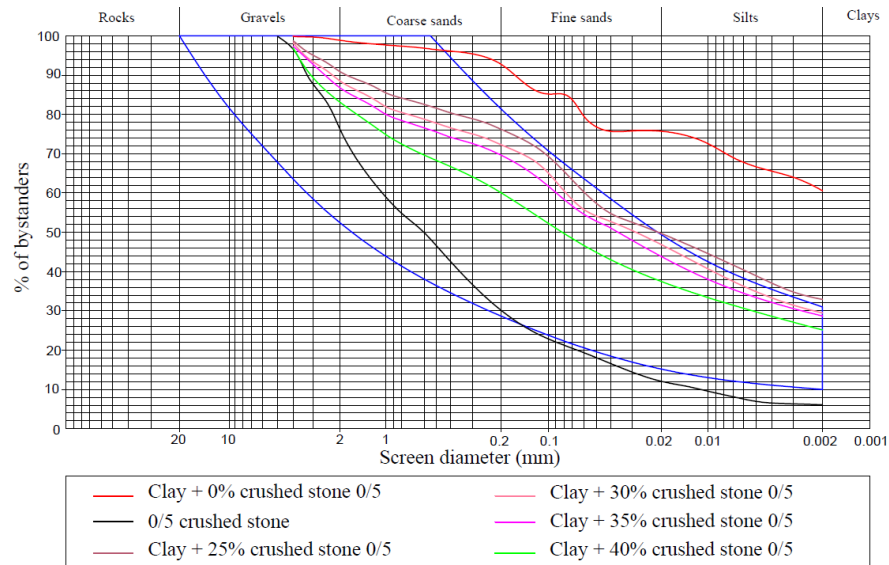
### 2.5.1 Propriétés physiques des matières premières

Le Tableau 2.3 présente les propriétés physiques des matières premières utilisées dans la fabrication des éprouvettes. Pour chacun des trois matériaux que sont l'argile, le concassé 0/5 et la paille de chiendent, les masses volumiques déterminées sont respectivement  $1405 \pm 8 \text{ kg/m}^3$ ,  $1706 \pm 16 \text{ kg/m}^3$ ,  $141 \pm 3 \text{ kg/m}^3$  pour des teneurs en eau initiales de 8,46%, 0,6% et 4,5%. La distribution granulométrique de l'argile présentée à la Figure 2.10a, révèle l'incapacité de cette dernière à être utilisée seule pour la fabrication des BTC. L'ajout de 25% de concassé 0/5 améliore cette distribution sans toutefois la placer convenablement dans le fuseau du diagramme de texture défini par la norme XP P 901-13. Il en est de même pour les courbes de granulométrie des mélanges contenant 30% et 35% de concassé. Bien que ces dernières se retrouvent dans le fuseau, elles n'épousent pas l'allure du fuseau telle que spécifiée par la norme. Par ailleurs, en mélangeant une proportion de 40% de concassé 0/5 avec l'argile, la courbe granulométrique obtenue répond bien aux exigences de la norme. Ainsi, le mélange argile + 40% de concassé 0/5 a été choisi pour servir de matrice à la mise en œuvre du composite argile – paille de chiendent. Un tel choix a été conforté par les résultats des essais d'Atterberg. Ainsi, la Figure 2.10b illustre la présence de la matrice argile + 40% de concassé 0/5 dans le fuseau du diagramme de plasticité tel qu'exigé par la norme XP P 13-901. Enfin,

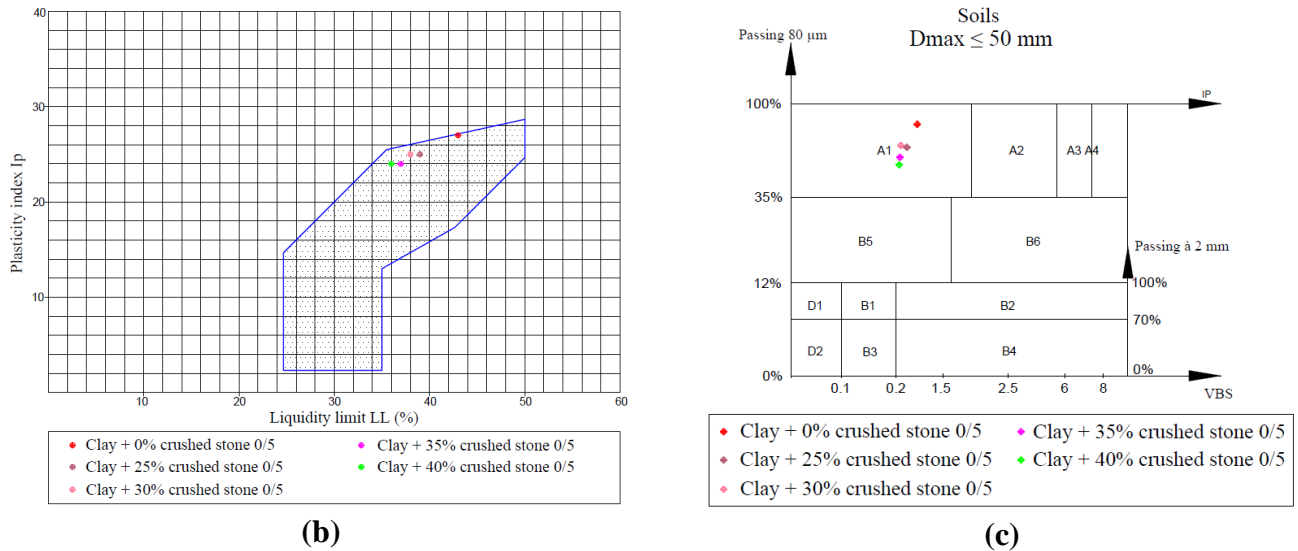
avec un  $VBS = 0,28$  et un pourcentage de passant à  $80 \mu m$  estimé à  $57,41\%$ , le mélange (argile + 40% de concassé) est classé comme un matériau ayant un peu trop de particules fines (Figure 2.10c), mais jugé acceptable par la norme XP P 13-901 pour être utilisé pour la fabrication des BTC. Cela étant, les propriétés physiques des matières premières sont présentées dans le Tableau 2.3.

**Tableau 2.3** : Propriétés physiques des matières premières

Propriétés		Argile	Concassé 0/5	Paille de chiendent
Masse volumique ( $kg/m^3$ )		$1405 \pm 8$	$1706 \pm 16$	$141 \pm 3$
Teneur en eau initiale (%)		8,46	0,6	4,5
Taille	> 4mm	0,01%	3,4%	—
	Gravier : [4; 2 mm[	1%	20,5%	—
	Sable : [2; 0,02 mm[	23,3%	64,3%	—
	Limon : [0,02; 0,002 mm[	17,5%	5,8%	—
	Argile : $\leq 0,002$	58,1%	6%	—
Limites d'Atterberg	Limite liquide $L_l$ (%)	43	—	—
	Limite plastique $L_p$ (%)	16	—	—
	Indice de plasticité $I$ (%)	27	—	—
VBS		0,78	—	—





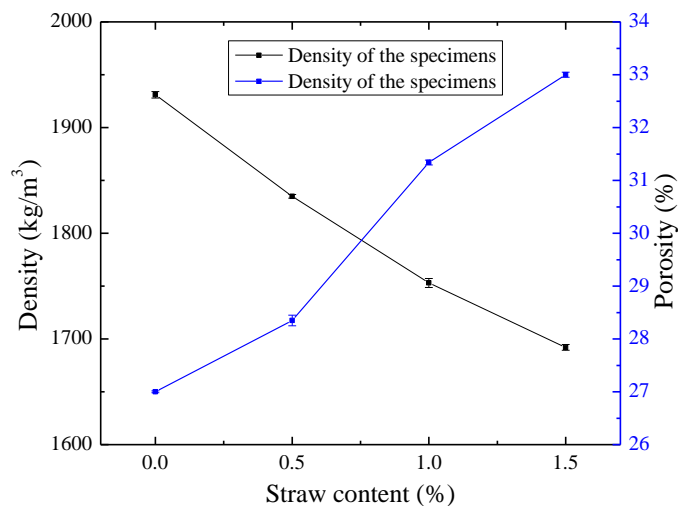


**Figure 2.10:** (a) Courbes granulométriques des mélanges argile – concassé 0/5 ; (b) Indice de plasticité des mélanges, (c) Nature des mélanges

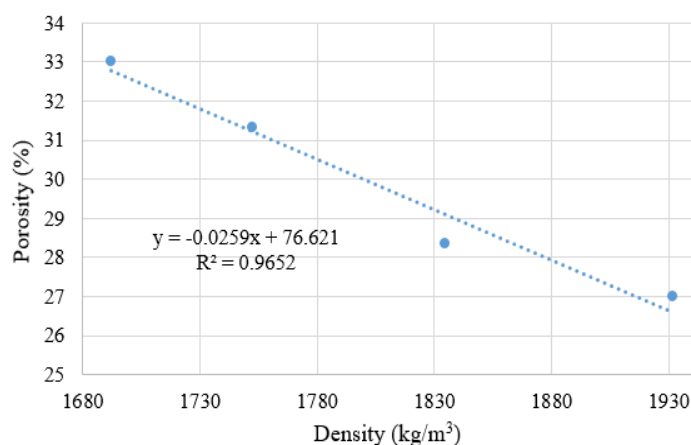
## 2.5.2 Masse volumique et porosité accessible des éprouvettes

La Figure 2.11 présente l'évolution de la masse volumique des éprouvettes en fonction de la teneur en paille de chiendent. Comme attendu, la masse volumique des blocs diminue avec l'augmentation de teneur en paille en raison de la substitution d'une partie de la terre par un matériau biosourcé plus léger. Les valeurs obtenues passent de  $1932 \pm 6 \text{ kg/m}^3$  pour les éprouvettes sans paille à  $1835 \pm 3 \text{ kg/m}^3$  pour le  $BTC_8 - 0,5$ ,  $1753 \pm 7 \text{ kg/m}^3$  pour le  $BTC_8 - 1$  et  $1692 \pm 5 \text{ kg/m}^3$  pour le  $BTC_8 - 1,5$ . Comparées aux valeurs typiques de la littérature, seule la masse volumique du  $BTC_8 - 1,5$ , n'entre pas dans les plages définies par Houben et al. (1996) et Turco et al. (2021), soit respectivement  $1700 \text{ à } 2200 \text{ kg/m}^3$  et  $1700 \text{ à } 2000 \text{ kg/m}^3$ . Toutefois, cela ne constitue pas un critère d'élimination du matériau puisque la littérature fait cas de travaux très satisfaisants sur les BTC dont les densités sortent des plages ci-dessus définies (Nshimiyimana et al., 2020; UNEP, 2020).

En revanche, l'évolution décroissante de la masse volumique avec l'augmentation de la teneur en paille renforce la porosité accessible des blocs. Cette dernière évolue de 27% pour le  $BTC_8 - 0$  à 33% pour celui contenant 1,5% de paille (Figure 2.11), ce qui se justifie par l'incorporation de matériau plus poreux dans la matrice de terre et la réorganisation des liaisons particulières au sein des matériaux composites. La forte corrélation entre la masse volumique et la porosité accessible évoqué par Turco et al. (2021) est illustrée à la Figure 2.12. Le coefficient de régression obtenu entre ces deux propriétés dans le cadre de cette étude est  $R^2 = 0,96$ .



**Figure 2.11:** Evolution de la masse volumique et de la porosité en fonction de la teneur en paille

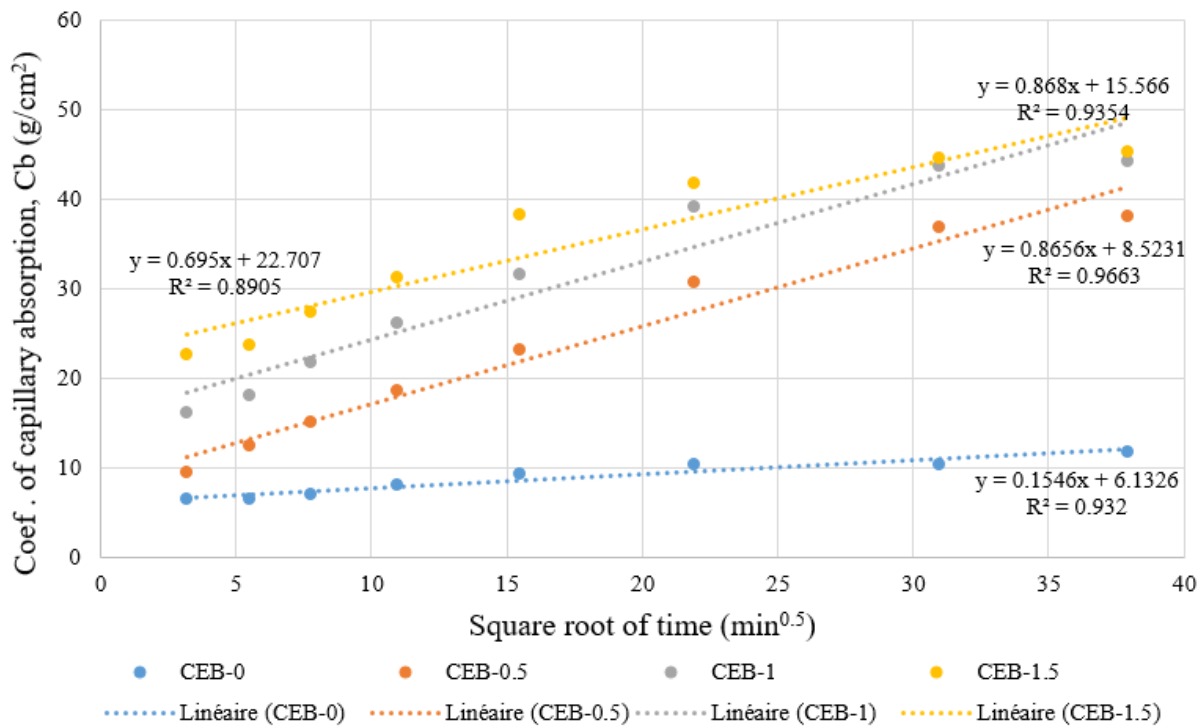


**Figure 2.12:** Relation entre la porosité et la masse volumique des BTC

### 2.5.3 Absorption d'eau

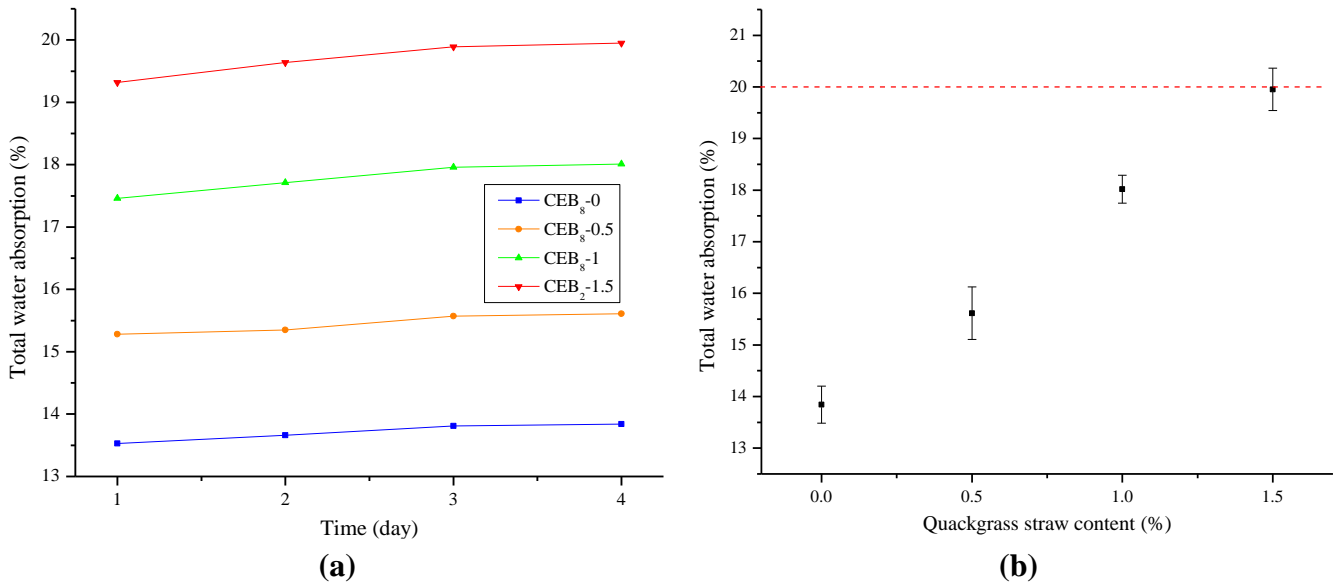
L'immersion partielle des  $BTC_8 - 0$  dans l'eau pendant 10 min révèle une absorption surfacique de  $6,43 \text{ g/cm}^2$ . Ce coefficient atteint  $22,65 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  lorsque la teneur en paille passe de 0 à 1,5%. Ces valeurs permettent de considérer l'ensemble des blocs comme faiblement capillaire, à l'exception des  $BTC_8 - 1,5$  dont la capillarité dépasse le seuil fixé par la norme XP P 13-901 ( $C_{b,limit} = 20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ ). En outre, l'augmentation de la capillarité de 6 à environ  $22 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  peut être justifiée par la présence de la paille de chiendent dont la nature hydrophile et la porosité supplémentaire qu'elle crée, favorisent la remontée capillaire de l'eau dans les blocs à travers des passages préférentiels. Une régression linéaire effectuée entre les valeurs de capillarité ( $C_b$ ) et la porosité des blocs montre le lien étroit existant entre les deux paramètres ( $R^2 = 0,98$ ). Cette corrélation a également été mise en évidence par Menon et al. (2015) qui ont constaté une diminution de l'absorption d'eau de blocs en terre biosourcée à la suite d'une réduction de leur porosité par compactage.

Par ailleurs, il faut noter l'évolution croissante du coefficient d'absorption d'eau surfacique de l'ensemble des formulations lorsque les éprouvettes sont soumises à une immersion partielle prolongée. Ce comportement est mis en avant par la figure 2.13 où l'on observe un décrochage de la droite d'absorptivité des blocs sans paille ( $BTC_8 - 0$ ). Pour ces blocs le coefficient d'absorption capillaire déterminé après 24 h d'immersion est égal à  $11,77 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ . A l'opposé, une pente plus prononcée des droites d'absorptivité peut être remarquée pour les blocs avec paille. Cela se manifeste d'ailleurs par des coefficients plus de 3 fois supérieurs à celui des blocs témoins ; soient  $38,1 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  pour le  $BTC_8 - 0,5$ ,  $44,21 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  pour le  $BTC_8 - 1$  et  $45,27 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  pour le  $BTC_8 - 1,5$ .



**Figure 2.13:** Absorption d'eau capillaire des composites exposés à une immersion partielle prolongée

En ce qui concerne l'absorption d'eau totale des blocs, la bonne tenue à l'eau de l'ensemble des formulations, immergées totalement pendant 96 heures peut tout d'abord être mise en lumière. Ce comportement des blocs est sans aucun doute dû à la présence du ciment dans les mélanges. Cependant, l'absorptivité totale des blocs a été plus impactée par la présence de la paille de chiendent comme ce fut le cas avec d'autres matériaux biosourcés tels que les fibres de coco et le mucilage d'aloë vera (Velasco-Aquino et al., 2021), les fibres de bananier (Mostafa & Uddin, 2015) ou les fibres de bagasse et de palmier à huile (Danso et al., 2015). Les données mesurées au cours du test, dans la présente étude, montrent une stabilisation massive des blocs après trois jours d'immersion. L'évolution de l'absorption totale des blocs au cours du temps est présentée à la Figure 2.14a. En analysant la cinétique d'absorption d'eau de l'ensemble des blocs, il peut être observé que la quantité la plus importante d'eau a été absorbée pendant les premières 24 heures. Au-delà, une sensible augmentation de la masse (< 1%) a été observée pour atteindre la saturation après 72h. En revanche, une comparaison faite entre les blocs en fonction de leur teneur en paille révèle une variation de plus de 6% entre les taux d'absorption d'eau des blocs sans et avec 1,5% de paille de chiendent. Ainsi, l'absorption d'eau passe de 13,84% pour le  $BTC_8 - 0$  à 19,95% pour le  $BTC_8 - 1,5$  (Figure 2.14b). Une fois encore, l'influence de la paille de chiendent à travers l'augmentation de la porosité et sa capacité d'absorption d'eau peut être évoquée. Pour autant, aucun des blocs étudiés n'a un taux d'absorption d'eau dépassant le seuil des 20% indiqué dans la littérature (Jannat et al., 2020). Néanmoins, en tenant compte des incertitudes de mesure, l'acceptabilité du  $BTC_8 - 1,5$  dans la plage recommandée peut être remise en question.



**Figure 2.14:** Evolution de l'absorption total d'eau en fonction : (a) du temps ; (b) de la teneur en paille

#### 2.5.4 Variation dimensionnelle

Les tests de retrait et de gonflement effectués sur les éprouvettes des différentes formulations étudiées ont mis en lumière la stabilité dimensionnelle des blocs en absence ou en présence de l'eau. Pour le séchage des éprouvettes, la distance initialement mesurée entre les 2 plots fixés sur chacun des blocs (100 mm) n'a quasiment pas changé. En revanche, le test de gonflement révèle de très faibles variations de l'ordre de 0 à 16,33 mm/m (Tableau 2.4). Pour les blocs sans paille ( $BTC_8 - 0$ ), l'absence de variation dimensionnelle peut dans un premier temps s'expliquer par la présence du concassé 0/5 (très peu sensible à l'eau) dans la matrice de terre et la composition minéralogique de l'argile de Zogbodomey. En effet, la part importante de kaolinite (plus de 50%) dans l'argile offre une bonne résistance aux variations dimensionnelles. Cela s'explique par l'étroitesse de l'espace interfoliaire entre les couches d'argile, laissant peu de place au gonflement/rétrécissement dû à l'absorption/séchage des molécules d'eau (Ars et al., 2020; Laibi et al., 2018). Aussi, l'ajout de ciment a renforcé la rigidité des liaisons entre les différentes particules en terre du matériau.

Quant aux autres formulations, la présence d'un agrégat hydrophile telle que la paille de chiendent n'a pas changé grande chose à la variation dimensionnelle des blocs. L'association du pouvoir cohésif de l'argile et de la rigidité apportée par le ciment permet de former des cavités rigides autour des particules de paille présentes dans le matériau. Ainsi, l'absorption ou le retrait d'eau des particules de paille se fait au sein de ces cavités sans variation de volume de ces dernières.

**Tableau 2.4:** Variation dimensionnelle des BTC en argile – paille de chiendent

	$BTC_8 - 0$	$BTC_8 - 0,5$	$BTC_8 - 1$	$BTC_8 - 1,5$
$\Delta l_r/l$ (mm/m)	0	0	0	0
$\Delta l_g/l$ (mm/m)	0	8,33	16,66	16,66
$\Delta l_c/l$ (mm/m)	0	8,33	16,66	16,66

### 2.5.5 Résistance à la compression

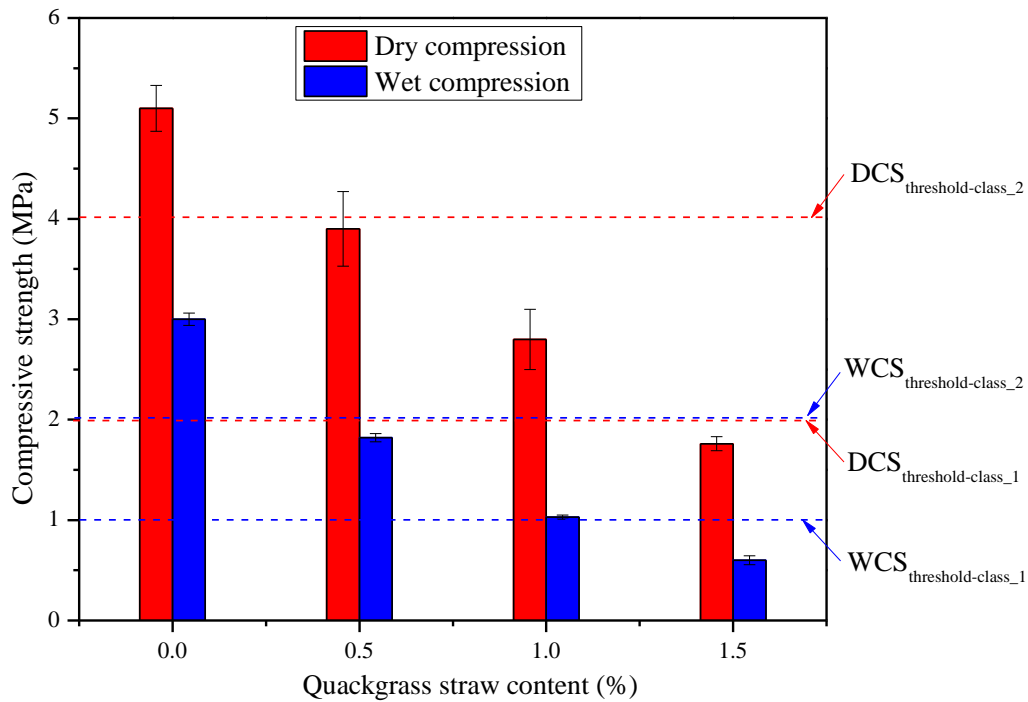
La résistance à la compression à sec (DCS) et la résistance à la compression à l'état humide (WCS) déterminées lors des essais mécaniques sont présentées à la Figure 2.15. Les résistances les plus élevées ont été obtenues avec les spécimens sans paille, c'est-à-dire  $5,1 \pm 0,5$  MPa pour la DCS et  $3 \pm 0,1$  MPa pour la WCS. Ces valeurs chutent respectivement à 3,85 MPa et 1,82 MPa pour le  $BTC_8 - 0,5$  ; 2,84 MPa et 1,02 MPa pour le  $BTC_8 - 1$  et 1,76 MPa et 0,56 MPa pour le  $BTC_8 - 1,5$ . Comme démontré dans plusieurs autres travaux (Lejano & Pineda, 2018; Toukourou et al., 2016; Zardari et al., 2018), la réduction des propriétés mécaniques de blocs peut être attribuée à la présence d'un matériau biosourcé. Ainsi, l'incorporation de la paille de chiendent dans la matrice de terre réorganise les liaisons particulaires au sein des blocs qui passent de liaisons argile – concassé à des liaisons argile – concassé – paille. Les hydrates de silicate de calcium, d'aluminate de calcium et d'aluminosilicate de calcium apportés par le ciment étant plus efficaces dans la consolidation des liaisons entre les particules de sol (Kenai, 2006; Nshimiyimana et al., 2021), l'apparition de nouvelles liaisons sol – paille, moins solidaires, fragilise la structure du matériau. Combiné au vide supplémentaire créé par la présence des pailles de chiendent dans le matériau, ce dernier devient donc plus vulnérable sous l'action d'une certaine charge. De plus, Khedari et al. (2005) affirment que l'évolution des propriétés mécaniques des mélanges fibres/sol/ciment dépend principalement des dimensions, des conditions de surface et de la quantité de fibres utilisées. A cet effet, l'introduction d'une quantité plus importante de paille affaiblit mécaniquement le matériau, d'où la baisse continue des résistances à la compression des blocs au fur et à mesure que la teneur en paille augmente.

Par ailleurs, les variations de la résistance à la compression entre les états sec et humide des matériaux évoluent de 41% à 68% lorsque la teneur en paille passe de 0 à 1,5%. De telles variations peuvent se justifier par une absorption d'eau relativement importante ; ce qui engendre une saturation hydrique des pores et favorise le glissement les particules liées lorsqu'elles sont soumises à des contraintes. Même si les valeurs d'absorption totale sont dans les limites recommandées, elles sont relativement élevées par rapport à certaines valeurs de la littérature. Par exemple, Taallah et al. (2014) obtiennent une absorption d'eau de 11% pour des BTC stabilisés avec 8% de ciment. Une telle absorption a permis aux auteurs d'obtenir une variation entre les résistances aux compressions sèche et humide relativement faible (30%) et un rapport DCS/WCS < 2 tel que recommandé par Houben et al. (1996). L'application de ce

rapport pour les blocs en argile – paille de chiendent donne 1,7, 2,1, 2,78 et 3,14 respectivement pour le  $BTC_8 - 0$ ,  $BTC_8 - 0,5$ ,  $BTC_8 - 1$ , et le  $BTC_8 - 1,5$ .

Dans l'ensemble, les valeurs obtenues pour le rapport  $DCS/WCS$  ne remettent pas en cause l'employabilité des blocs dans la construction des bâtiments. Les principaux critères qui justifient le choix d'un matériau de construction sont les résistances à la compression sèche et humide. Ainsi, les BTC en argile – paille de chiendent peuvent être utilisés pour la construction de bâtiments durables, exceptés les  $BTC_8 - 1,5$  dont les résistances mécaniques sont en dessous des seuils recommandés. En effet, Cid-Falceto et al. (2012) recensent 44 documents normatifs sur les BTC dont les spécifications varient d'un pays à un autre. Dans ce lot, 14 normes africaines ont été identifiées. Selon celles-ci, les valeurs minimales de résistance à la compression requises pour l'utilisation des BTC dans la construction sont de 2 MPa et 1 MPa pour la compression sèche et humide respectivement. Ces valeurs sont recommandées pour les blocs destinés à être utilisés pour les murs de remplissage en environnement humide. Dans cette catégorie, les trois formulations que sont le  $BTC_8 - 0$ ,  $BTC_8 - 0,5$ , et le  $BTC_8 - 1$ , peuvent être utilisées en toute sécurité. Néanmoins, une attention particulière doit être portée à la résistance à la compression humide du  $BTC_8 - 1$ . Cette dernière frôle le seuil recommandé ( $WCS \geq 1$  MPa (*Compressed earth blocks standards*, 1998)). Les incertitudes liées à la mesure peuvent remettre en question son employabilité dans la construction des bâtiments durables. Une répétition de ces essais sur plus de 3 éprouvettes de  $BTC_8 - 1$  est donc nécessaire pour une meilleure analyse de la dispersion des résultats obtenus afin de statuer sur l'employabilité de cette formulation dans la construction des bâtiments.

Outre cette catégorie, seul le  $BTC_8 - 0$  peut être utilisé comme élément structurel dans la construction des bâtiments à deux étages. Ses propriétés mécaniques répondent favorablement aux limites définies pour cette classe de construction ( $DCS \geq 4$  MPa et  $WCS \geq 2$  MPa (*Compressed earth blocks standards*, 1998)). En revanche, aucune des formulations proposées dans la présente étude n'atteint la troisième et dernière classe correspondant aux éléments structuraux capables de supporter des charges externes élevées, soit des bâtiments de trois étages et plus ( $DCS \geq 6$  MPa et  $WCS \geq 3$  MPa (*Compressed earth blocks standards*, 1998)).



**Figure 2.15:** Résistance à la compression sèche et humide des éprouvettes en fonction de la teneur en paille

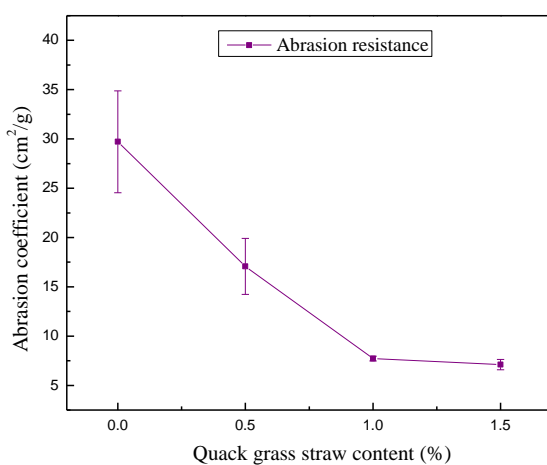
## 2.5.6 Durabilité des BTC

### ❖ Résistance à l'abrasion des blocs

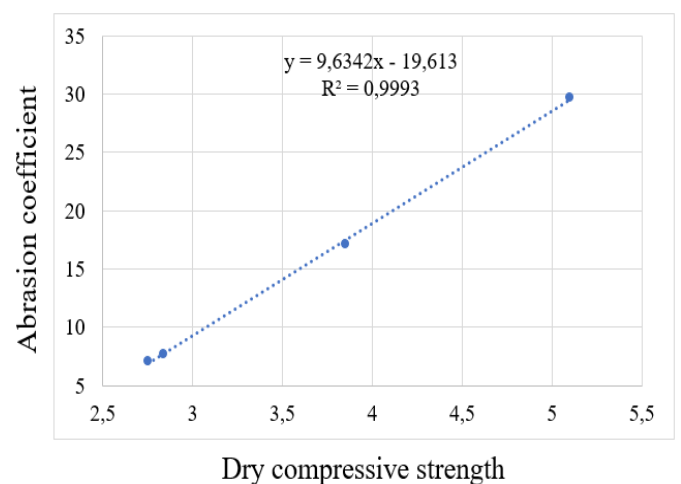
La Figure 2.16 présente l'évolution du coefficient d'abrasion ( $Ca$ ) des blocs en fonction de la teneur en paille. Ce coefficient passe de  $29,7 \text{ cm}^2/\text{g}$  à  $7,11 \text{ cm}^2/\text{g}$  avec l'augmentation de la teneur en paille. Ren et al. (2017) expliquent cette évolution par l'affaiblissement de l'adhésion particulaire des composites dû à l'ajout de granulats végétaux à la matrice de terre. Comme affirmé plus haut, l'incorporation de fibres dans la matrice de terre fragilise les liaisons entre les particules des composites et par conséquent favorise leur détachement. Malgré cela, les valeurs obtenues restent supérieures aux seuils minimaux fixés par la norme XP P13-901. Selon cette dernière, les blocs de la classe  $BTC_{40}$  ( $DCS \geq 4 \text{ MPa}$  et  $WCS \geq 2 \text{ MPa}$ ) doivent avoir un coefficient de résistance à l'abrasion au moins égal à  $5 \text{ cm}^2/\text{g}$ . C'est le cas du  $BTC_8 - 0$ . Pour les blocs de la classe  $BTC_{20}$  ( $BTC_8 - 0,5$  et  $BTC_8 - 1$ ), la valeur minimale imposée par ladite norme est de  $2 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

En se référant à la littérature, le comportement abrasif d'un matériau en terre à la suite de l'incorporation d'agrégat végétal ne peut être prédit. En effet, l'ajout de matériaux biosourcés à une matrice terre peut renforcer ou affaiblir la résistance à l'abrasion de cette dernière. Pour preuve, Laborel-Préneron et al. (2019) observent des réductions 52,9% et 17,6% après l'ajout de 3% de paille d'orge et de balle de riz respectivement à la matrice terre. En revanche, avec 3% de paille de lavande, le coefficient d'abrasion de la matrice terre passe de  $3,4$  à  $8 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Giroudon et al. (2019) expliquent cela par la morphologie des agrégats végétaux utilisés. Pour

la paille d'orge, les particules sont larges et courtes avec une surface lisse tandis que les particules de la paille de lavande sont fines, allongées et rugueuses à l'extérieur. Une telle morphologie pour la paille de lavande renforce la liaison entre ses particules et la matrice de terre. Ce contraste dans la littérature montre que les matériaux biosourcés n'exercent pas la même influence sur les matrices de terre. En outre, Rashad et al. (2014) établissent une relation entre le coefficient d'abrasion et la résistance à la compression à sec des BTC. Selon les auteurs, la résistance à la compression est un facteur important dont dépend le coefficient d'abrasion. Cela est démontré à la figure 2.17. En analysant l'évolution de la résistance à la compression et celle de la résistance à l'abrasion en fonction de la teneur en paille, il est évident que les matériaux avec une meilleure résistance à la compression résistent mieux aux actions extérieures pouvant provoquer des détachements de particules.



**Figure 2.16:** Evolution du coefficient (Ca) d'abrasion des blocs en fonction de la teneur en paille



**Figure 2.17:** Relation entre le coefficient d'abrasion et la résistance à la compression à sec

### ❖ Résistance à l'érosion des blocs

Les tests d'érodabilité effectués à une pression d'eau de 50 kPa ont montré une bonne résistance des blocs en argile – paille de chiendent. Pour l'ensemble des éprouvettes testées, aucun signe d'érosion majeure n'a été observé. La plus grande profondeur d'érosion a été mesurée sur le  $BTC_8 - 1,5$  et ne vaut que 2 mm. Ainsi, l'indice d'érosion des  $BTC_8$  en argile – paille de chiendent est de 1, soit une profondeur d'érosion ( $D$ ) inférieure à 20 mm/h (NZS, 1998). En revanche, une dégradation importante a été observée lorsqu'un bloc témoin a été soumis au test d'érosion (Figure 2.20A). Cette expérience permet une fois encore de mettre en lumière l'impact positif de la stabilisation au ciment des blocs. D'ailleurs, de pareilles conclusions ont été tirées avec des BTC stabilisés au ciment (Bogas et al., 2019) ou avec des sous-produits (Nshimiyimana et al., 2021). Entre autres, la nature fortement argileuse de la terre a également contribué à l'amélioration de la résistance à l'érosion. Pour preuve, Danso (2017) affirme que les terres très argileuses offrent une meilleure résistance à l'érosion en raison de la bonne cohésion entre les particules.



Cependant, en appliquant une pression d'eau de 500 *kPa* telle que suggérée par Nshimiyimana et al. (2021) pour les blocs stabilisés, l'indice d'érosion de certains blocs passe de 1 à 2 ( $20 \text{ mm/h} \leq D < 50 \text{ mm/h}$  (NZS, 1998)), soit la classe des matériaux peu érosifs. C'est le cas des  $BTC_8 - 1$  et  $BTC_8 - 1,5$  pour lesquels les profondeurs d'érosion mesurées sont respectivement de 23,3 *mm/h* et 32,6 *mm/h*. Cette évolution croissante de la profondeur d'érosion en fonction de la teneur en paille, illustrée à la Figure 2.18, révèle la mauvaise influence de la paille sur la résistance à l'érosion des blocs. (Turco et al., 2021) soulignent le flou qui existe autour de l'influence des fibres sur le comportement érosif des BTC. Selon les auteurs, les avis sont partagés dans la littérature. Par exemple, Obonyo et al. (2010) constatent une réduction de la résistance à l'érosion des BTC avec l'augmentation de la teneur en fibres naturelles tandis que Danso (2017) et Lejano et al. (2019) assistent à une amélioration de cette résistance lorsque des fibres végétales (coque de noix de coco, bagasse de canne à sucre et fibres de noix de palmier à huile) et animales (poils de porc) sont respectivement incorporées dans les blocs. Cette divergence d'opinion rejoint celle liée au comportement mécanique des BTC en présence des matériaux biosourcés ; renforçant l'hypothèse d'une dépendance entre les propriétés mécaniques et celles de durabilité des matériaux terre biosourcés. Cela a d'ailleurs été confirmé par la Figure 2.19 où le coefficient de régression entre les résistances à la compression sèche et à l'érosion est  $R^2 = 0,98$ . Ce coefficient passe à 0,99 lorsque la corrélation entre les résistances à l'érosion et à l'abrasion est établie.

La Figure 2.20 (B, C, D et E) quant à elle présente l'aspect des blocs érodés. Sur cette dernière, il peut être observé une augmentation de la surface d'érosion au fur et à mesure que l'érosion se creuse à l'intérieur des éprouvettes. Pour le  $BTC_8 - 0$ , la surface d'érosion se limite à quelques poches de diamètre inférieur à 1 *cm*. Compte tenu de la surface couverte par l'eau pulvérisée sur le spécimen ( $D \approx 9,5 \text{ cm}$ ), ces poches n'ont pu être créées qu'aux points les plus vulnérables de la surface. Le bon état de surface du  $BTC_8 - 0$  obtenu grâce à la bonne cohésion des particules d'argile et renforcé par le ciment a limité la présence de ces points vulnérables. Par contre, la fragilité des liaisons particulières apportées par l'incorporation de la paille de chiendent dans les matrices de terres augmente la surface d'érosion des BTC composites (Figure 2.20). Les rapports surface érodée / surface de jet d'eau sont estimés à 0,3 pour le  $BTC_8 - 0$ , 0,52 pour le  $BTC_8 - 0,5$ , 0,65 pour le  $BTC_8 - 1$  et 0,69 pour le  $BTC_8 - 1,5$ . Par ailleurs, Le Tableau 2.5 résume l'ensemble des propriétés des BTC en argile – paille de chiendent déterminées lors des essais de caractérisation physique, mécanique et de durabilité.

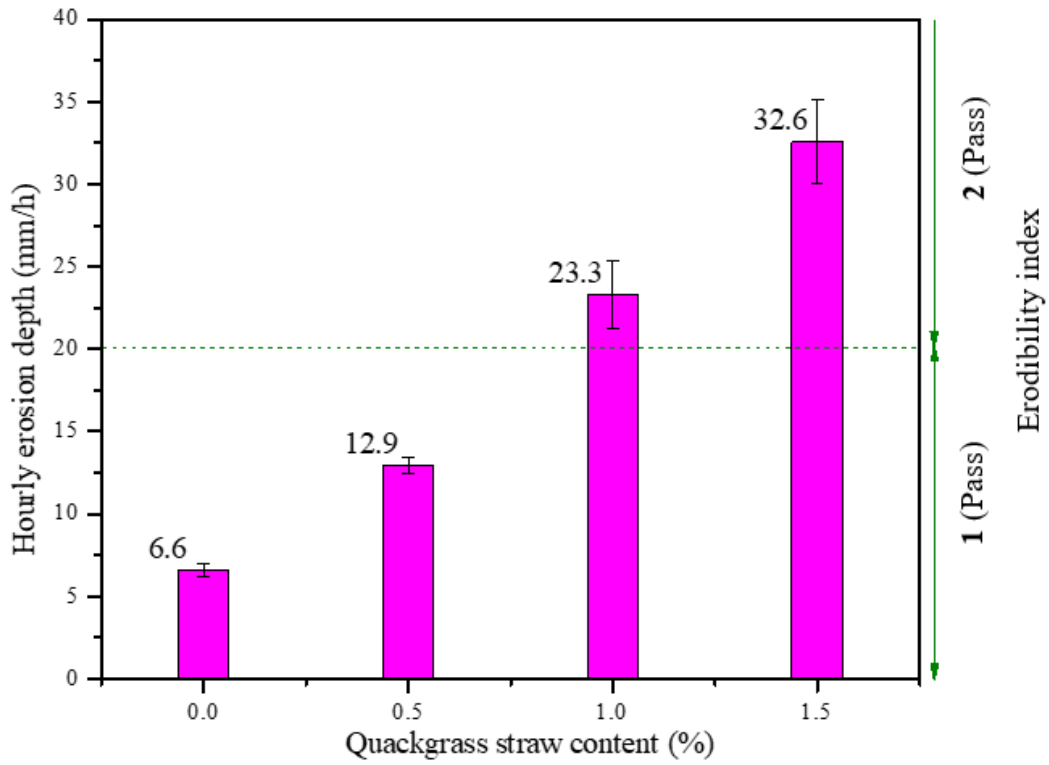


Figure 2.18: Profondeur d'érosion en fonction de la teneur en paille des CEB

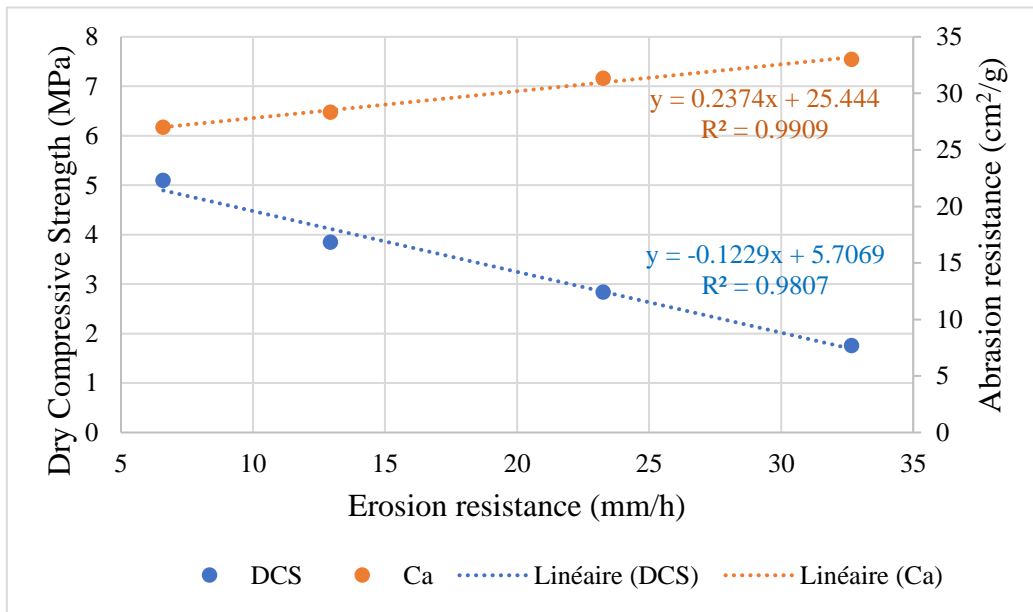
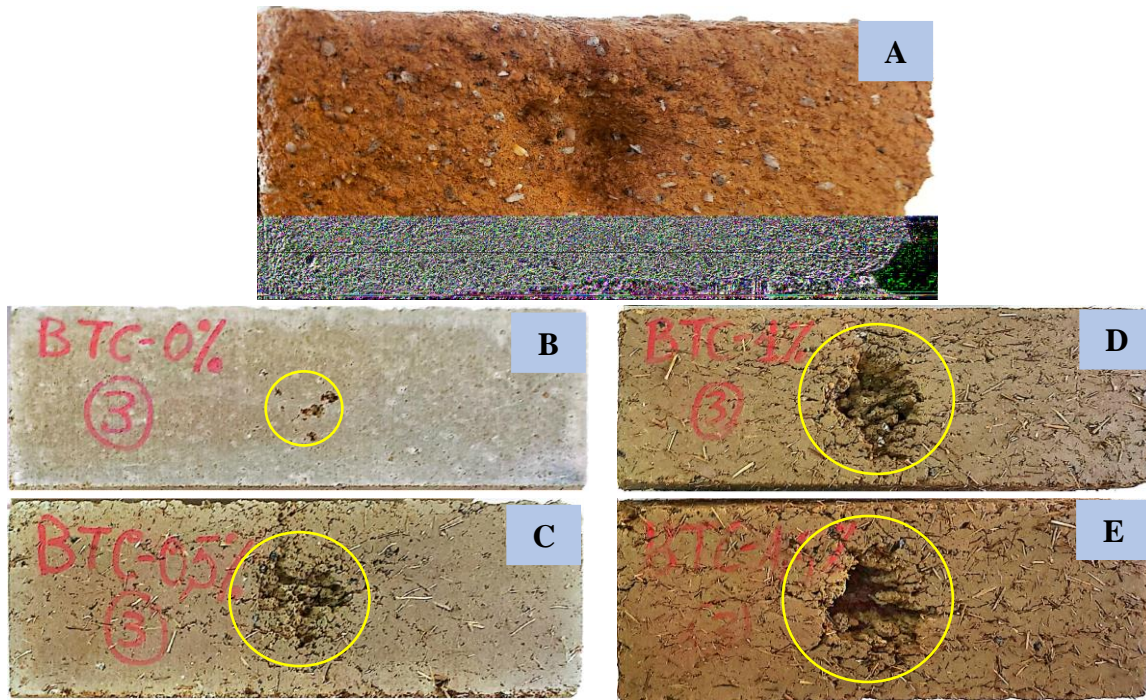


Figure 2.19: Relation entre la résistance à l'érosion et les résistances à la compression et à l'abrasion



**Figure 2.20:** Aperçu des blocs après le test d'érodabilité à 500 kPa : (A) CEB-0 non stabilisé ; (B)  $BTC_8 - 0$ ; (C)  $BTC_8 - 0,5$ ; (D)  $BTC_8 - 1$ ; (E)  $BTC_8 - 1,5$

**Tableau 2.5:** Propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des BTC en argile – paille de chiendent

Formulation	Propriétés physiques			Propriétés mécaniques		Durabilité		Employabilité
	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	Porosité accessible (%)	$C_b$ ( $g/cm^2 \cdot s^{0,5}$ )	DCS (MPa)	WCS (MPa)	$C_a$ ( $cm^2/g$ )	Erodabilité à 500 kPa ( $mm/h$ )	Enveloppe de bâtiment
$BTC_8 - 0$	1932	27,1	6,43	5,1	3	29,7	6,6	<b>OUI</b>
$BTC_8 - 0,5$	1835	28,35	9,37	3,85	1,82	17,06	12,9	<b>OUI</b>
$BTC_8 - 1$	1753	31,35	16,19	2,84	1,02	7,72	23,3	<b>OUI</b>
$BTC_8 - 1,5$	1692	33	22,65	1,76	0,56	7,11	32,6	<b>NON</b>

## Conclusion

Dans ce chapitre, un nouvel éco-matériau a été mis en œuvre. Il s'agit des blocs de terre comprimée en argile – paille de chiendent. Pour se faire, l'argile de Zogbodomey a été mélangée à du granitique 0/5 afin de corriger sa granulométrie et réduire sa plasticité. La matrice de terre ainsi obtenue a été stabilisée avec 8% de ciment puis mélangée à 0%, 0,5%, 1% et 1,5% de paille de chiendent séchée et broyée. Les blocs fabriqués ont ensuite été l'objet de plusieurs essais de caractérisation dans le but d'évaluer leur employabilité dans la construction de bâtiments durables. Les essais réalisés ont permis de déterminer les propriétés physiques (masse

volumique, porosité accessible, absorption capillaire), mécaniques (résistances aux compressions sèche et humide) et de durabilité (résistances à l'abrasion et à l'érosion).

A l'issue de ces tests, il apparaît que le  $BTC_8 - 1,5$  ne peut être utilisé dans la construction des bâtiments en raison de ses résistances mécaniques en dessous de seuils normatifs ( $DCS = 1,76 \text{ MPa} < 2 \text{ MPa}$  et  $WCS = 0,56 \text{ MPa} < 1 \text{ MPa}$ ). Il est également apparu que  $BTC_8 - 1,5$  est moyennement capillaire ( $20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5} < C_b = 22,65 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5} < 40 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ ) et peu érosif ( $D = 32,6 \text{ mm/h}$ ). En revanche, les blocs contenant 0 à 1% de paille de chiendent ont montré leur aptitude à être utilisés dans les bâtiments. Les résistances mécaniques obtenues varient de 5,1 MPa (DCS) et 3,85 MPa (WCS) pour le  $BTC_8 - 0$  à 2,84 MPa et 1,02 MPa respectivement pour les  $BTC_8 - 1$ . Quant à leurs propriétés physiques et de durabilité, elles répondent bien aux exigences normatives. Les trois blocs présentaient des capillarités faibles ( $C_b \leq 20$ ) et des résistances à l'abrasion inférieures aux seuils fixés selon l'utilisation faite de chacune des formulations. Par exemple, pour le  $BTC_8 - 0$  pouvant être utilisé pour la construction de bâtiment à deux étages, la résistance à l'abrasion est  $C_a = 29,7 \text{ cm}^2/\text{g} \geq 5 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Quant aux deux autres formulations ( $BTC_8 - 0,5$  et  $BTC_8 - 1$ ) répondant aux critères d'éléments de remplissage des enveloppes, les coefficients de résistance à l'abrasion sont respectivement de  $17,1 \text{ cm}^2/\text{g}$  et  $7,72 \text{ cm}^2/\text{g}$ ; valeurs supérieures au seuil minimal de  $2 \text{ cm}^2/\text{g}$  fixé par la norme XP P 13-901. Aussi, aucune des trois formulations n'est érosive.

Par ailleurs, pour évaluer l'influence, de l'utilisation de ces BTC dans l'enveloppe, sur la consommation énergétique des bâtiments, leurs propriétés hygrothermiques ont été déterminées dans le chapitre suivant.

# CHAPITRE 3

## Caractérisation hygrothermique des BTC en argile – paille de chiendent

---

### Sommaire

Introduction .....	77
3.1 Matériel et méthodes .....	77
3.1.1 Caractérisation thermique des BTC en argile – paille de chiendent .....	77
3.1.2 Caractérisation hygrique des BTC en argile – paille de chiendent .....	79
3.1.3 Essai de perméabilité à l'air .....	86
3.2 Résultats et discussion .....	87
3.2.1 Propriétés thermiques .....	87
3.2.2 Isothermes de sorption .....	91
3.2.3 Perméabilité à la vapeur / facteur de résistance à la vapeur d'eau / MBV .....	99
3.2.4 Perméabilité à l'air .....	102
Conclusion.....	103

### **3. CARACTERISATION HYGROTHERMIQUE DES BTC EN ARGILE – PAILLE DE CHIENDENT**

---

#### **Introduction**

Steeman et al. (2010) affirment que la fiabilité et la précision des résultats des modélisations HAM à travers l'enveloppe dépendent fortement de la valeur des propriétés hygrothermiques des matériaux (conductivité thermique, capacité thermique, isothermes de sorption, perméabilité à la vapeur) introduites dans le modèle. Ces caractéristiques sont propres à chaque matériau et sont généralement obtenues de façon expérimentale. Ainsi, des essais de caractérisation hygrothermique des BTC en argile – paille de chiendent ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine à Epinal en France. Ces essais ont consisté en la mesure de la conductivité et de la diffusivité thermiques des différentes formulations de BTC en argile – paille de chiendent. Aussi, les isothermes de sorption, la perméabilité à la vapeur d'eau et à l'air des matériaux ont été déterminés expérimentalement.

Ce chapitre présente les résultats obtenus à l'issue des différentes expérimentations réalisées pour disposer de données nécessaires à l'évaluation du comportement hygrothermique de l'enveloppe biosourcée proposée et de son influence sur les conditions hygrothermiques intérieures d'un bâtiment. Il présente également le matériel et les différentes méthodes adoptées pour parvenir aux grandeurs recherchées. Les résultats obtenus ont été discutés et comparés à ceux de la littérature. L'influence de la paille de chiendent sur les propriétés hygrothermiques de la matrice de terre a par ailleurs été évaluée et analysée.

#### **3.1 Matériel et méthodes**

##### **3.1.1 Caractérisation thermique des BTC en argile – paille de chiendent**

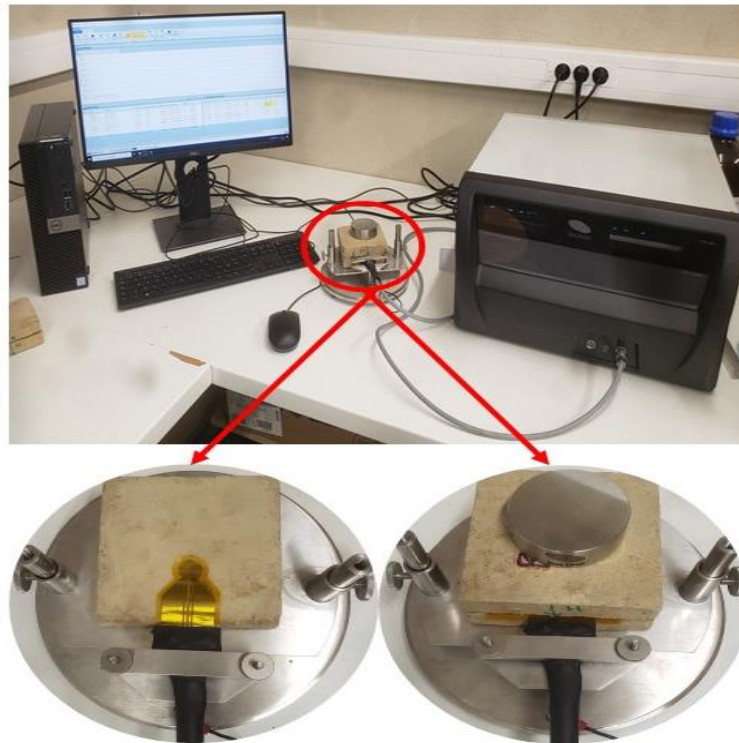
Les propriétés thermiques des composites ont été mesurées grâce au dispositif Hot Disk TPS 500S basé sur la méthode de la source plane transitoire telle que détaillée dans la norme ISO 22007-2 (2008). Cette méthode a été développée par Gustafsson (1991) pour déterminer les propriétés thermiques d'une large gamme de matériaux sur une plage de mesure très élargie ( $0,01 \text{ W/m.K} < \lambda < 500 \text{ W/m.K}$  (ISO 22007-2, 2008)). Gustafsson (1991) et ISO 22007-2 (2008) jugent cette approche rapide et suffisamment précise pour mesurer la conductivité thermique d'un matériau et estimer sa diffusivité thermique. Pour se faire, un flux de chaleur, généré par une brève impulsion électrique au sein d'une sonde à disque chaud, est envoyé à travers deux échantillons théoriquement identiques et prenant en sandwich la sonde thermique. Cette sonde, servant à la fois de source de chaleur et de capteur de température, permet d'enregistrer l'évolution de la température pendant une période relativement courte (quelques secondes), de sorte que les conditions thermiques du milieu extérieur n'influencent pas les mesures (hypothèse du milieu semi-infini).

A cet effet, des échantillons d'argile – paille de chiendent de dimensions  $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$  ont été utilisés pour les essais thermiques avec la sonde Hot Disk 5501 (figure 3.1) en Kapton et de rayon 6,403 mm. Pour chaque formulation de BTC, trois couples d'échantillons ont été utilisés avec une répétition en trois fois des mesures de propriétés thermiques de chacun des couples. En tout, 12 couples d'échantillons en argile paille de chiendent ont été utilisés pour une série de 36 mesures thermiques à une même teneur en eau. Les mesures ont été précédées du réglage de paramètres tels que la puissance de l'impulsion électrique et la durée des mesures. Le choix de ces paramètres étant effectué sur la base des propriétés thermiques des matériaux à tester (dont les valeurs ne sont pas encore connues), des valeurs estimatives issues de la littérature ont été utilisées. Une première mesure a donc été faite pour s'assurer de la fiabilité des paramètres choisis. Une fois cette étape franchie, les principales propriétés thermiques que sont la conductivité et la diffusivité thermiques ont respectivement été mesurées et estimées en toute confiance. D'autres propriétés telles que la capacité thermique, l'effusivité thermique et la profondeur de pénétration du matériau sont également obtenues lors de ces mesures. La durée des mesures a varié principalement entre 40 et 80 *secondes*. Après chaque mesure, le système est laissé au repos pendant environ 15 *min* afin que l'équilibre thermique initial soit à nouveau atteint. Les essais ont été réalisés en laboratoire à une température moyenne de  $24^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  et une humidité relative de  $40\% \pm 5\%$ .

Par ailleurs, pour avoir étudié l'influence de la teneur en ciment, en eau et de la densité des matériaux en terre sur leurs propriétés thermiques, Costantini Romero et al. (2021) affirment que la teneur en eau est le facteur qui influence le plus la conductivité thermique des matériaux. A ce titre, les conductivités thermiques des BTC en argile paille de chiendent ont été déterminées à différentes teneurs en eau. Une première série de mesures a été effectuée sur les matériaux anhydre (0% de teneur en eau). S'en sont suivies des mesures sur des échantillons conditionnés à 40% et 85% d'humidité relative (HR). Les teneurs en eau correspondant sont de 1%, 1,3%, 1,7% et 3% respectivement pour les  $BTC_8 - 0$ ,  $BTC_8 - 0,5$ ,  $BTC_8 - 1$  et  $BTC_8 - 1,5$  à 40% de HR et de 2,1%, 2,15%, 2,21% et 4,1% à 85% de HR. Les dernières mesures ont été réalisées sur des échantillons d'argile – paille de chiendent totalement saturés après immersion dans l'eau. Les teneurs en eau des formulations n'étant pas les mêmes aux différentes humidités relatives, les conductivités thermiques des formulations à des teneurs en eau autres que celles déterminées expérimentalement ont été obtenues analytiquement par l'application de l'équation (3.1). Il s'agit de l'un des 3 modèles proposés par Aït Oumeziane et al. (2021) pour déterminer la conductivité thermique d'un matériau en fonction de sa teneur en eau.

$$\lambda = \lambda_{sat} + (\lambda_0 - \lambda_{sat}) \cdot \frac{(u_{sat} - u)}{u_{sat}} \quad (3.1)$$

Où  $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau à une teneur en eau ( $u$ ) donnée ( $W/m.K$ ),  $\lambda_{sat}$  et  $\lambda_0$  les conductivités thermiques saturée et sèche,  $u_{sat}$  la teneur en eau du matériau à saturation (%).



*Figure 3.1:* Dispositif Hot Disk pour la mesure des propriétés thermiques des BTC

### 3.1.2 Caractérisation hygrique des BTC en argile – paille de chiendent

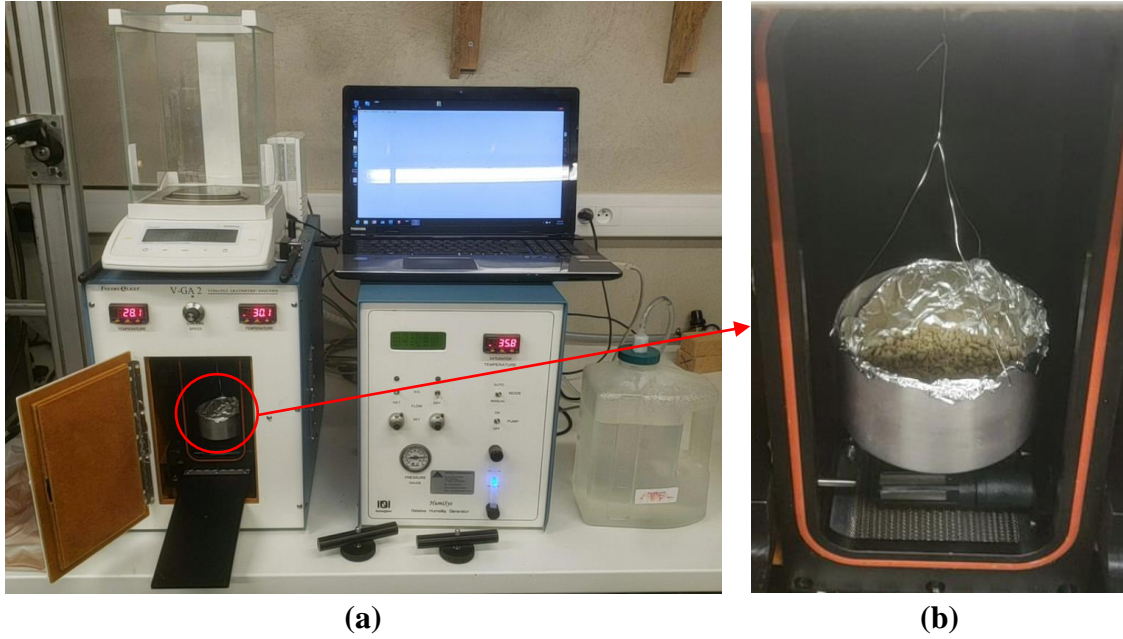
#### ❖ Détermination des isothermes de sorption

Les isothermes de sorption des blocs en argile – paille de chiendent ont été obtenus par la méthode gravimétrique. Cette approche a été choisie dans le but de limiter la durée des essais. Aussi, selon Bui et al. (2017), l'exposition de matériaux biosourcés à des humidités relatives élevées pendant une longue période (plusieurs semaines), comme c'est le cas avec la méthode des solutions salines saturées (SSS), peut causer la détérioration de ces matériaux (développement de moisissure) et par conséquent occasionner des erreurs dans la détermination des isothermes de sorption. A cet effet, deux dispositifs de mesure dynamique de sorption ont été utilisés. Il s'agit du DVS Intrinsic de 'Surface Measurement Systems' et du V-GA2. Les deux équipements ont servi à déterminer les isothermes de sorption des principales matières premières (argile et paille de chiendent) et des BTC en argile et paille de chiendent respectivement. Une telle stratégie se justifie par les contraintes liées à l'utilisation des deux dispositifs. Le DVS n'admet en son sein qu'au plus 1 g du matériau à tester et n'est donc adapté qu'aux matériaux supposés homogènes comme l'argile ou la paille de chiendent. Alors que le V-GA2 peut être utilisé pour des échantillons hétérogènes comme les mélanges d'argile – paille de chiendent, puisqu'il tolère une quantité de matière plus représentative du matériau ; soit un maximum de 100 g.



Ainsi, 75,63 mg d'argile et 28,77 mg de paille de chiendent ont successivement été prélevés dans une nacelle et accrochés à la microbalance du DVS. Les essais ont débuté par une phase de séchage afin de ramener l'échantillon à un état anhydre. L'humidité relative de l'enceinte climatique chute alors à 0% et ne reprend sa course ascendante qu'après stabilisation de la masse de l'échantillon. De l'humidité, générée par un mélange d'azote et de vapeur d'eau, est alors introduite dans le milieu conformément au scénario d'humidité prédéfini. Dans notre cas, l'humidité relative varie de 0 à 90% par pas de  $15 \pm 0,5\%$  pour la phase d'absorption et inversement lors de la désorption. Le changement de palier d'humidité est conditionné par un critère d'équilibre massique ( $dm/dt$ ) fixé à 0,005%. Autrement dit, le niveau d'humidité relative dans l'enceinte ne passe au palier suivant que lorsque l'échantillon subit une variation inférieure ou égale à 0,005% de sa masse sur une durée fixée dans notre cas d'étude à 40 min. Les essais de sorption se sont déroulés à une température constante de 35°C, soit environ 10°C plus haut que celle généralement rencontrée dans la littérature. Un tel choix se justifie par le besoin d'analyser le comportement hygrique des matériaux dans des conditions thermiques représentatives du climat tropical humide du sud du Bénin.

En répétant la même condition thermique au sein du V-GA2 (figure 3.2), les isothermes de sorption des  $BTC_8 - 0$  et  $BTC_8 - 1$  ont été déterminés. Ces deux formulations ont été retenues pour les isothermes de sorption afin de mieux apprécier l'effet de la paille de chiendent sur la capacité de sorption de la matrice terre ; les  $BTC_8 - 1,5$  n'ayant pas les caractéristiques mécaniques suffisantes pour être utilisés dans la construction des bâtiments. L'exécution des essais avec le V-GA2 est semblable à celle de la DVS. Cette fois ci, 25,35 g de  $BTC_8 - 0$  et 27,6 g de  $BTC_8 - 1$  ont été écrasés et utilisés pour les essais. Cette approche permet d'augmenter la surface spécifique des échantillons et par conséquent de réduire la durée des essais. Les plages d'humidité relative définies sont de 0 à 88% et de 88 à 0% avec un pas de 15% respectivement pour l'absorption et la désorption. Le critère d'équilibre massique de 0,005% fixé pour la DVS s'est révélé inadapté dans ce cas puisque l'équilibre hydrique des échantillons n'était pas atteint à chaque échelon d'humidité pendant les prétests. Ce faisant, le critère d'équilibre a été affiné à 0,003%. Les essais ont duré en moyenne 6 jours pour chaque formulation de BTC contre environ deux semaines pour la paille de chiendent et 27 heures pour l'argile.



**Figure 3.2:** Essai de détermination des isothermes de sorption ; (a) dispositif V-GA2; (b) nacelle contenant du BTC écrasé

▪ **Ajustement des isothermes de sorption**

Comme remarqué dans la section 1.4.3.1 du 1<sup>er</sup> chapitre, le GAB est l'un des modèles le plus utilisé pour l'ajustement des isothermes de sorption des matériaux de construction en terre. Il a donc été choisi comme modèle d'ajustement des isothermes de sorption des BTC en argile paille de chiendent. A ce titre, les teneurs en humidité d'équilibre ajustées sont déterminées par l'équation (3.2).

$$u = \frac{a_j \cdot b_j \cdot \phi}{(1 - b_j \cdot \phi)[1 + (a_j - 1) \cdot b_j \cdot \phi]} \cdot u_m \quad (3.2)$$

Où  $u$  représente la teneur en humidité d'équilibre ajustée à une humidité relative donnée ( $kg/kg$ ),  $a_j$  et  $b_j$  les paramètres d'ajustement du modèle GAB,  $\phi$  l'humidité relative (–) et  $u_m$  la teneur en humidité mono-moléculaire ( $kg/kg$ ), i.e. la teneur en humidité nécessaire pour recouvrir la surface absorbante d'une couche de molécule d'eau (Aït Oumeziane et al., 2021). Elle peut être déterminée grâce à l'équation (3.3).

$$S_{GAB} = S_w \cdot N_A \cdot \frac{u_m}{M_1} \quad (3.3)$$

Où  $S_{GAB}$  est la surface spécifique de l'échantillon testé ( $m^2$ ),  $S_w$  la surface d'une molécule d'eau adsorbée ( $m^2$ ),  $N_A$  le nombre d'Avogadro ( $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} mol^{-1}$ ) et  $M_1$  la masse molaire de l'eau ( $M_1 = 18 g/mol$ ).

Mais face aux difficultés de détermination de la surface spécifique de certains échantillons, comme c'est le cas dans la présente étude (matériau écrasé), Aït Oumeziane et al. (2021)

proposent une autre expression pour déterminer la teneur en équilibre ajustée avec le modèle GAB. Il s'agit de l'équation (3.4).

$$u = \frac{\phi(1 - b_j)[1 + (a_j - 1)b_j]}{(1 - b_j \cdot \phi)[1 + (a_j - 1)b_j \cdot \Phi]} \cdot u_{sat} \quad (3.4)$$

Avec :

$$u_{sat} = \frac{m_{air,sat} - m_0}{m_0} \quad (3.5)$$

Dans cette dernière expression,  $u_{sat}$  représente la teneur en humidité de la masse saturée ( $kg/kg$ ),  $m_{air,sat}$  la masse de l'échantillon saturée en eau ( $g$ ) et  $m_0$  la masse de l'échantillon anhydre ( $g$ ). Par ailleurs, les paramètres d'ajustement du modèle ( $a_j$  et  $b_j$ ) sont déterminés par la méthode des moindres carrés pondérés. Il s'agit d'une méthode d'optimisation consistant à déterminer les paramètres inconnus d'un modèle en minimisant la fonction objectif appelée erreur dont l'équation est :

$$s = \sum w_i (y_{i\_cal} - y_{i\_exp})^2 \quad (3.6)$$

Avec :

$$w_i = \frac{n}{(y_{i\_cal} - \bar{y})^2} \quad (3.7)$$

Où  $s$  est la fonction objectif,  $w_i$  le poids des mesures expérimentales,  $y_{i\_cal}$  les données calculées,  $y_{i\_exp}$  les données expérimentales,  $n$  le nombre de données et  $\bar{y}$  la moyenne des données expérimentales.

Par ailleurs, la précision du modèle choisi a été évaluée à travers le calcul du coefficient de détermination  $R^2$  (équation 3.11) et de la somme des carrés des résidus  $RSS$  (équation 3.12). Un meilleur ajustement du modèle est obtenu lorsque le  $R^2$  est proche de 1 et la somme des résidus ( $RSS$ ) est faible.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (u_{exp,i} - u_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (u_{exp,i} - \overline{u_{cal,i}})^2} \quad (3.8)$$

$$RSS = \sum_{i=1}^n (u_{exp,i} - u_{cal,i})^2 \quad (3.9)$$

Où  $u_{exp}$  et  $u_{cal}$  sont les teneurs en humidité d'équilibre expérimentale et calculée respectivement,  $\overline{u_{cal,i}}$  la moyenne des teneurs en humidité d'équilibre expérimentales et  $n$  le nombre de données expérimentales.

### ❖ *Essai de perméabilité à la vapeur*

Les essais de perméabilité à la vapeur des différentes formulations de BTC en argile – paille de chiendent ont été réalisés suivant la technique de la coupelle humide conformément à la norme ISO 12572 (2001). Pour chaque formulation, trois (3) échantillons cylindriques de 69 mm de diamètre et de 21 mm d'épaisseur ont été utilisés. Les surfaces latérales des échantillons étaient couvertes de colle pour éviter tout transfert latéral d'humidité au cours de l'essai. Après un pré-conditionnement dans une enceinte climatique à 35°C et 40% d'humidité, les échantillons ont été posés sur des coupelles contenant une solution de chlorure de sodium (NaCl). Les échantillons, de diamètre approximativement égal au diamètre interne des coupelles (Figure 3.3a), ont été maintenus solidaires à ces dernières grâce au système PVC-CHA (Zohoun et al., 2003). Ce dernier se compose d'un tuyau PVC d'environ 80 mm de diamètre à l'intérieur duquel passe une chambre à air de diamètre plus petit que celui du PVC et maintenu solidaire à ce dernier par des serres câble (Figure 3.3b). Un petit trou est percé sur la face latérale du PVC pour servir d'orifice d'aspiration de l'air contenu entre la surface intérieure du PVC et la chambre à air. Une pompe à vide est alors utilisée pour aspirer l'air et plaquer la chambre à air contre le PVC afin de permettre la mise en place du PVC-CHA autour de l'échantillon et de la coupelle, rendant ainsi l'assemblage étanche à l'arrêt de la pompe à vide (Figure 3.4).

Les assemblages ainsi formés (Figure 3.3c) ont été placés dans la même enceinte climatique où les échantillons étaient préalablement conditionnés. La présence du chlorure de sodium à l'intérieur des coupelles ayant créé une humidité relative de 75%, un gradient de pression est alors obtenu entre les deux faces de chacun des échantillons entraînant un transfert d'humidité à travers le matériau. Les assemblages ont été quotidiennement pesés jusqu'à la stabilisation du flux d'humidité traversant le matériau. La balance VWR utilisée à cet effet a une précision de 0,01 g. La perméabilité à la vapeur d'eau de chaque échantillon a ensuite été déterminée par l'équation (3.10) en prenant en compte le flux d'humidité transféré et la résistance de la couche d'air séparant la solution saline et l'éprouvette ( $e_a = 33 \text{ mm}$ ).

$$\delta = \frac{e}{\frac{S \cdot \Delta p}{G} - \frac{e_a}{\delta_a}} \quad (3.10)$$

Où  $\delta$  représente la perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon ( $kg/m.s.Pa$ ),  $e$  l'épaisseur de l'échantillon ( $m$ ),  $S$  la surface de l'échantillon exposée au transfert de flux ( $m^2$ ),  $\Delta p$  la différence de pression de vapeur de part et d'autre de l'échantillon ( $Pa$ ),  $G$  le taux de transmission de la vapeur d'eau à travers l'échantillon ( $kg/s$ ),  $e_a$  l'épaisseur de la couche d'air séparant l'échantillon et la solution saline ( $m$ ),  $\delta_a$  la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ( $kg/m.s.Pa$ ). Dans ce cas de figure, l'estimation des incertitudes s'est limitée à la détermination des écart-types (incertitude de type A) étant donné que les précisions des appareils utilisés ne sont pas toutes connues.

Par ailleurs, la différence de pression de vapeur d'eau et la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sont respectivement déterminées par les équations (3.11) et (3.12).

$$\Delta p = (HR_2 - HR_1) \times 610,5 \times e^{\left(\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}\right)} \quad (3.11)$$

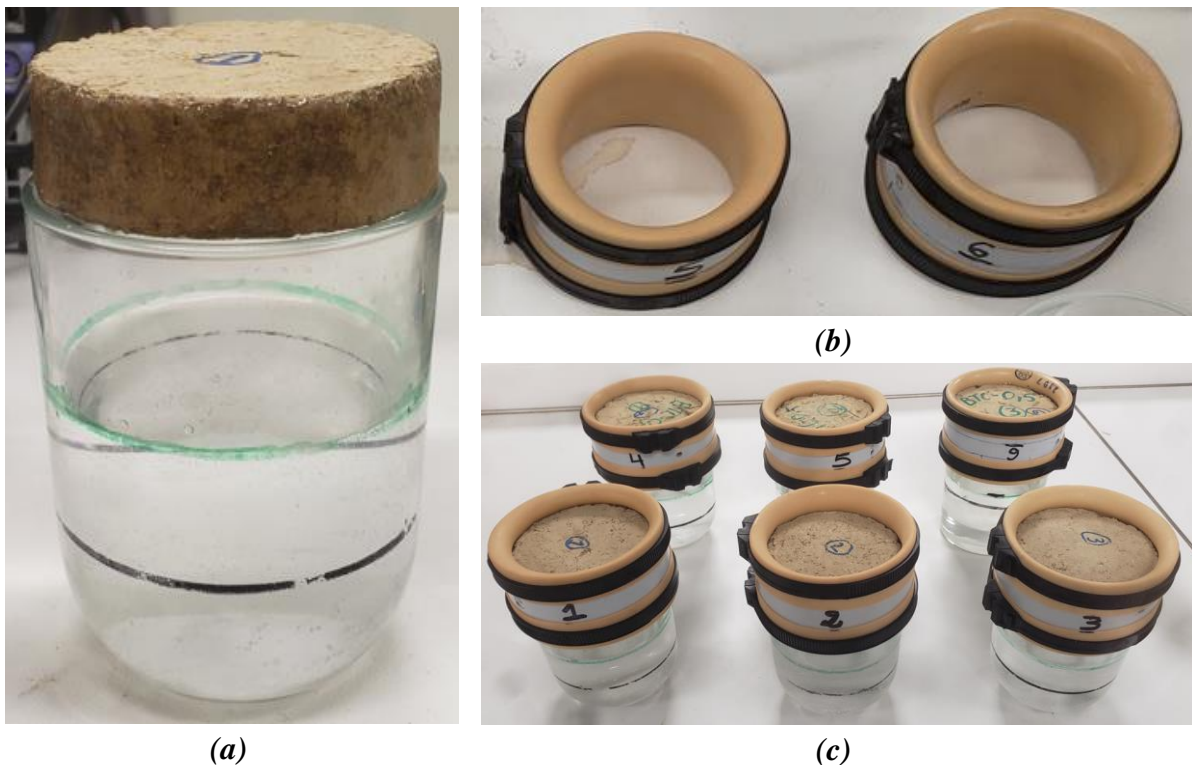
$$\delta_a = \frac{2,3056 \times 10^{-5} \times p_0}{R \times T \times p} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} \quad (3.12)$$

Où  $HR_2$  et  $HR_1$  sont respectivement les humidités relatives à l'intérieur et à l'extérieur de la coupelle (%),  $\theta$  la température ( $^{\circ}C$ ),  $p_0$  la pression atmosphérique ( $p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$ ),  $R$  la constante des gaz parfait pour la vapeur d'eau ( $R = 462 \text{ N.M/kg.K}$ ),  $T$  et  $p$  respectivement la température ( $K$ ) et la pression ( $\text{hPa}$ ) au cours de l'essai.

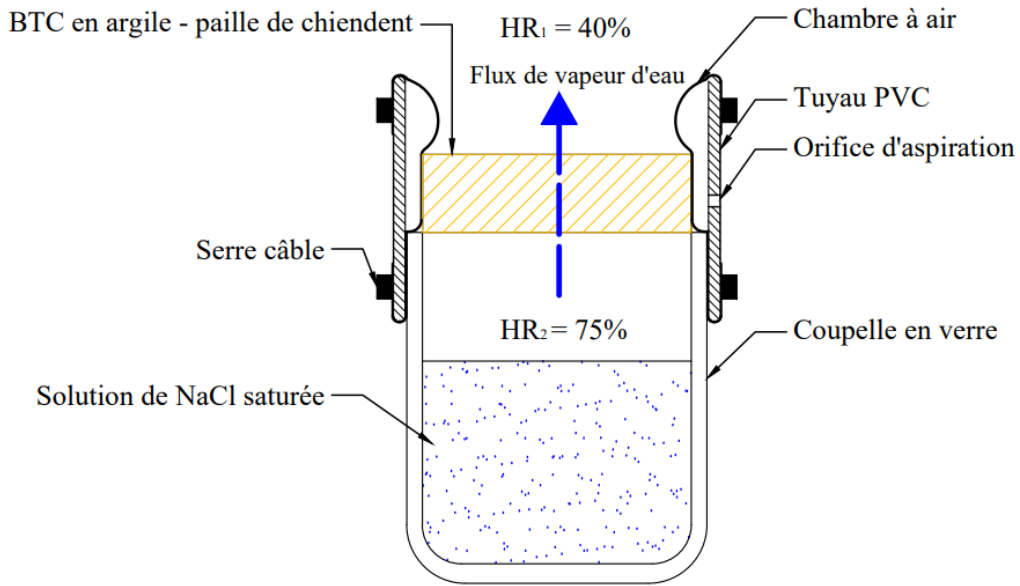
Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur des matériaux a quant à lui été calculé suivant l'équation (3.13).

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (3.13)$$

Où  $\delta_a$ , représentant la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air, est exprimé en  $\text{kg/m.s.Pa}$  et  $\mu$  sans unité.



**Figure 3.3:** Essai de perméabilité à la vapeur des BTC argile – paille de chiendent : (a) vérification de l'effet de bord ; (b) coupelles et systèmes de maintien des échantillons ; (c) assemblages dans l'enceinte climatique



**Figure 3.4:** Schéma descriptif de l'assemblage coupelle – échantillon – PVC-CHA (inspiré de la représentation de Redman et al. (2012))

#### ❖ Détermination de la valeur tampon d'humidité

La valeur tampon d'humidité (MBV : Moisture Buffer Value) d'un matériau représente sa capacité à absorber ou restituer de l'humidité. Rode & Graau (2008) traduisent cette aptitude des matériaux comme une stratégie passive de régulation de l'humidité relative avec des avantages écoénergétiques et économiques peu exploités. A l'échelle d'une pièce, cette propriété représente la capacité de l'enveloppe à réguler l'humidité relative intérieure (Rode et al., 2005). La valeur tampon d'humidité d'un matériau peut être déterminée suivant une approche expérimentale ( $MBV_{réel}$ ) ou théorique ( $MBV_{ideal}$ ). D'ailleurs, Liuzzi et al. (2013) soulignent la bonne corrélation existant entre les résultats expérimentaux et théoriques pour l'évaluation de cette grandeur. Pour l'approche théorique, la capacité tampon d'humidité d'un matériau se détermine sur la base des propriétés hygrométriques des matériaux. Ainsi, la détermination de la perméabilité à la vapeur et des isothermes de sorption des BTC en argile – paille de chiendent a permis d'estimer la capacité tampon de ces matériaux par l'intermédiaire des équations (3.14), (3.15) et (3.16).

$$MBV_{ideal} = 0,00568 \cdot p_{sat} \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \quad (3.14)$$

Avec :

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}\right)} \quad (3.15)$$

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta \cdot \rho_d \cdot \xi}{p_{sat}}} \quad (3.16)$$

Où  $MBV_{ideal}$  est la valeur tampon théorique d'humidité ( $g/m^2 \cdot \%RH$ ),  $p_{sat}$  la pression de saturation de vapeur d'eau ( $Pa$ ),  $b_m$  l'effusivité de l'humidité ( $kg/m^2 \cdot Pa \cdot s^{1/2}$ ),  $t_p$  la période ( $t_p = 24 \times 3600 = 86400s$  (Laborel-Préneron et al., 2018)),  $\theta$  la température ( $^{\circ}C$ ),  $\delta$  la perméabilité à la vapeur ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ),  $\rho_a$  masse volumique de l'échantillon anhydre ( $kg/m^3$ ) et  $\xi$  la capacité d'humidité ( $kg/kg$ ) qui n'est rien d'autre que la pente la courbe de sorption. Elle traduit la variation de la teneur en humidité du matériau ( $u$ ) en fonction de l'humidité relative ( $\Phi$ ) et est exprimée par l'équation (3.17).

$$\xi = \frac{\partial u}{\partial \Phi} \quad (3.17)$$

Où  $u$  est en  $kg/kg$  et  $\Phi$  sans unité.

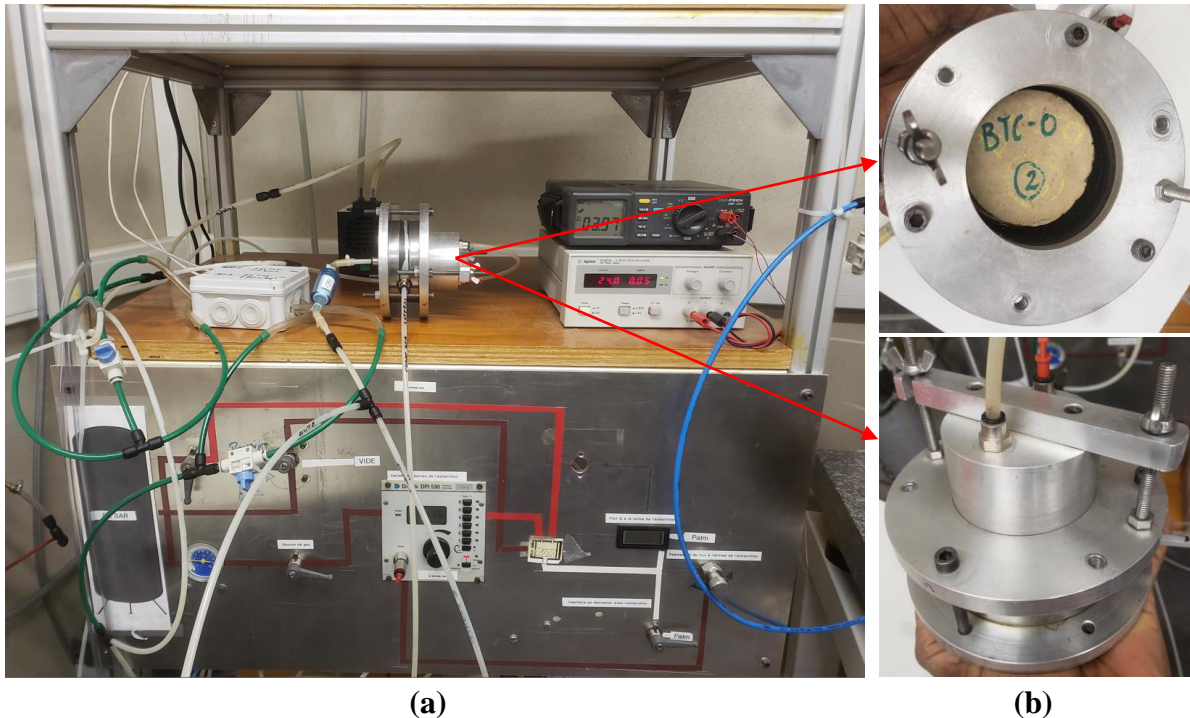
### 3.1.3 Essai de perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air d'un matériau représente sa capacité à se laisser traverser par un flux d'air sous un gradient de pression. Sa détermination est nécessaire pour l'étude du comportement hygrothermique d'un matériau, notamment hygroscopique, destiné à être utilisé dans l'enveloppe du bâtiment. A ce titre, Perré & Agoua (2002) ont conçu et réalisé un dispositif expérimental nommé 'ALU-CHA' (Figure 3.5a) pour la détermination de la perméabilité à l'air des matériaux. Pour se faire, un gradient de pression constant est créé de part et d'autre de l'échantillon disposé dans un système semblable au PVC-CHA (Figure 3.5b). Le principe de mise en place de l'échantillon est pratiquement le même que pour le PCV-CHA à la seule différence qu'une surpression de 2 à 3 bars (Rousset et al., 2004) est créée entre le porte échantillon en aluminium et la chambre à air afin de rendre cette dernière totalement solidaire de la face latérale de l'échantillon et éviter toute fuite d'air latérale au cours de l'essai. Ainsi, les perturbations observées sur l'une des faces de l'échantillon, peuvent être attribuées en toute confiance au passage du flux d'air à travers l'épaisseur de l'échantillon. Au cours de l'essai, la différence de pression entre les faces est manuellement réglée et le flux d'air traversant l'échantillon est mesuré par un débitmètre. Pour chacune des formulations de BTC argile – paille de chiendent, les essais ont été réalisés sur 3 échantillons, les mêmes que ceux utilisés pour les essais de perméabilité à la vapeur. La perméabilité à l'air ( $K$ ) des échantillons a alors été déterminée par la loi de Darcy en appliquant l'équation (3.18).

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot e \cdot p}{S \cdot \Delta p \cdot \bar{p}} \quad (3.18)$$

Où  $K$  est la perméabilité à l'air de l'échantillon ( $m^2$ ),  $Q$  le flux d'air traversant l'échantillon ( $m^2/s$ ),  $\eta$  la viscosité dynamique de l'air ( $\eta = 1,96 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$ ),  $e$  l'épaisseur de l'échantillon ( $m$ ),  $p$  la pression de mesure du flux d'air ( $Pa$ ),  $S$  la surface de l'échantillon ( $m^2$ ),  $\Delta p$  la différence de pression entre les deux faces de l'échantillon ( $\Delta p = p_2 - p_1$ ) et  $\bar{p}$  la pression moyenne au sein de l'échantillon ( $\bar{p} = (p_1 + p_2)/2$ ).





**Figure 3.5:** Mesure de la perméabilité à l'air des BTC argile – paille de chiendent ; (a) dispositif ALU-CHA ; (b) porte échantillon

## 3.2 Résultats et discussion

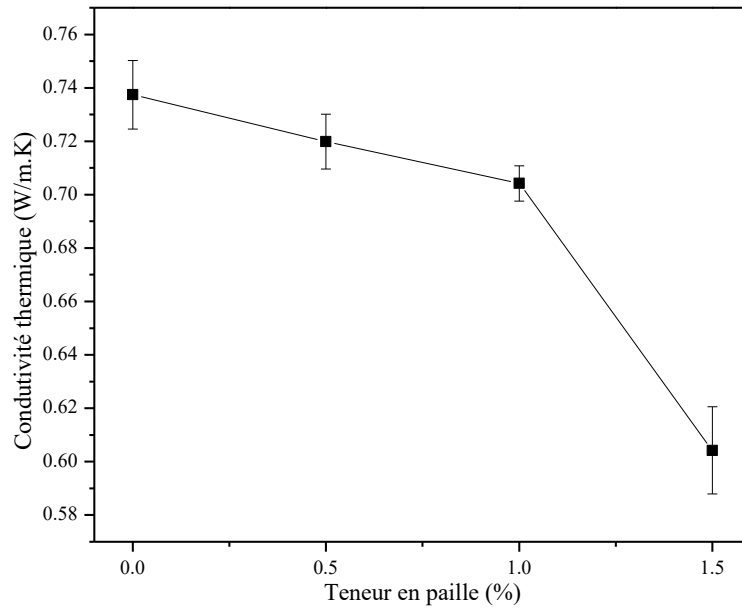
### 3.2.1 Propriétés thermiques

A l'issue des essais de caractérisation thermique, la conductivité thermique obtenue pour le matériau témoin ( $BTC_8 - 0$ ) est de  $0,74 \text{ W/m.K}$ . En omettant les différences entre les techniques de mesure utilisées et la nature des terres, la conductivité thermique du  $BTC_8 - 0$  est bien en dessous des  $0,8 \text{ W/m.K}$ ,  $0,84 \text{ W/m.K}$ ,  $0,85 \text{ W/m.K}$ ,  $0,96 \text{ W/m.K}$ ,  $1,46 \text{ W/m.K}$ ,  $1,7 \text{ W/m.K}$  et  $2 \text{ W/m.K}$  obtenues respectivement par Malbila et al. (2020), Nshimiyimana et al. (2020), Taallah et al. (2016), Ashour et al. (2015), Ajouguim et al. (2021), Toukourou et al. (2016) et Laibi et al. (2018) pour les mêmes genres de matériaux. Cependant, elle est supérieure aux conductivités thermiques des BTC témoins de Velasco-Aquino et al. (2021) ( $\lambda = 0,42 \text{ W/m.K}$ ) et Minguela (2017) ( $\lambda = 0,26 \text{ W/m.K}$ ). Par ailleurs, l'effet de la paille de chiendent sur la conductivité thermique de la matrice de terre est illustré à la figure 3.6. Il peut être observé une légère baisse de la conductivité lorsque la quantité de paille incorporée est comprise entre 0 et 1% de la masse de la matrice de terre. Les valeurs obtenues pour les  $BTC_8 - 0,5$  et  $BTC_8 - 1$  sont respectivement de  $0,72 \text{ W/m.K}$  et  $0,70 \text{ W/m.K}$ , soit des réductions sensibles de 2,7% et 5,4%. Pour des proportions similaires, Taallah & Guettala (2016) obtiennent une réduction de 10,6% de la conductivité thermique de leur BTC avec seulement 0,2% de fibres de palmier dattier. Cette réduction atteint les 20% lorsque Ajouguim et al. (2021) incorporent 1% de fibres d'Alfa dans la matrice de terre. Il en est de même pour Laibi et al. (2018) qui constatent une baisse d'environ 30% avec 1,2% de fibres de Kénaf. Ashour et al. (2015) quant à eux obtiennent des réductions de l'ordre de 36% lorsque 1% de pailles d'orge

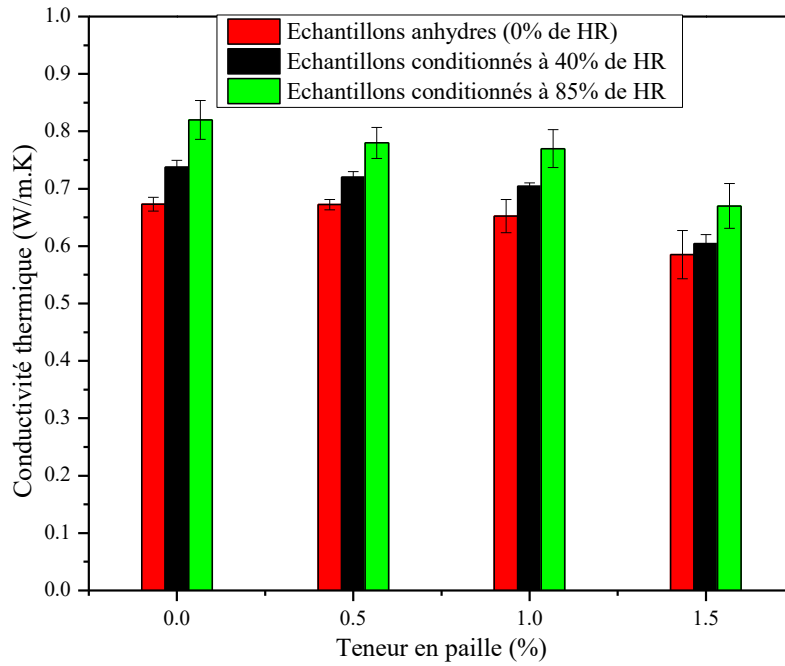


et de pailles de blé sont utilisées, faisant passer la conductivité thermique des blocs sans fibres de 0,961 W/m. K à 0,596 W/m. K et 0,62 W/m. K respectivement. Ces écarts entre les valeurs de littérature et celles de la présente étude peuvent se justifier par la composition chimique la paille de chiendent (taux de cellulose non connu), mais aussi par la porosité accessible relativement faible (augmentation d'environ 6%) qu'engendre la présence de cette dernière dans la matrice d'argile. Ce qui témoigne de la faible influence de la paille de chiendent sur l'isolation thermique de la matrice de terre comparée à d'autres agrégats végétaux de la littérature. En revanche, cette isolation est plus accentuée lorsque la teneur en paille de chiendent représente les 1,5% de la masse de la matrice de terre. La réduction de la conductivité thermique constatée à cet effet est de 19% par rapport à celle de l'échantillon témoin ; correspondant à une conductivité de 0,6 W/m. K.

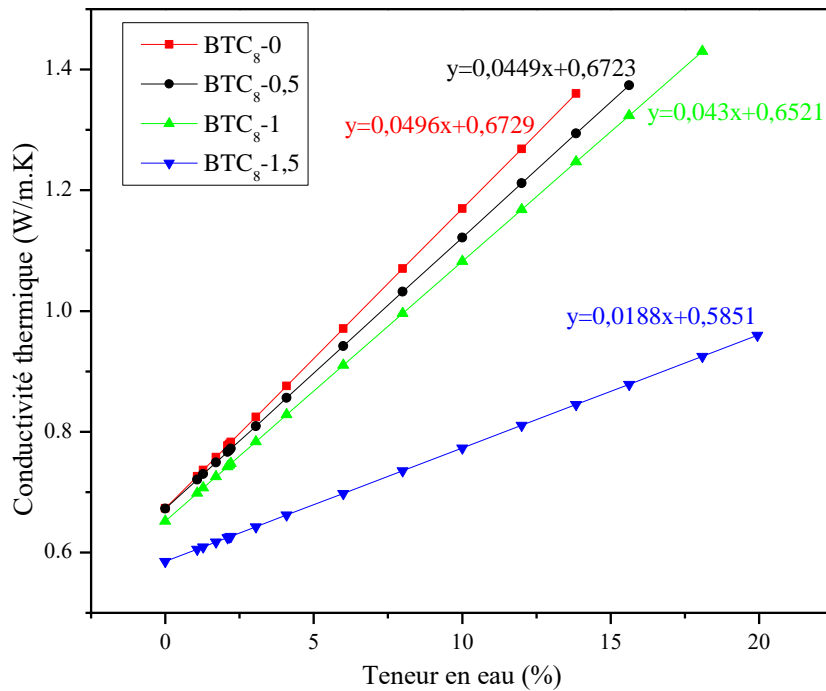
Par ailleurs, en soumettant les échantillons à une humidité relative similaire à la moyenne observée dans le climat tropical humide du sud du Bénin ( $HR_{moy} = 85\%$ ), une augmentation de la conductivité thermique est remarquée pour toutes les formulations. Ainsi, des conductivités de 0,82 W/m. K, 0,78 W/m. K, 0,77 W/m. K et 0,67 W/m. K sont mesurées pour les  $BTC_8 - 0$ ,  $BTC_8 - 0,5$ ,  $BTC_8 - 1$  et  $BTC_8 - 1,5$  respectivement (Figure 3.6). Cela s'explique par une augmentation générale d'environ 1% des teneurs en eau des échantillons lorsque l'humidité relative passe de 40% à 85% ; l'eau étant plus conductrice que l'air ( $\lambda_{air} = 0,026$  W/m. K et  $\lambda_{eau} = 0,595$  W/m. K). Malgré de telles augmentations, les valeurs obtenues restent en accord avec celles de la littérature (Malbila et al., 2020; Nshimiyimana et al., 2020; Taallah et al., 2016). Sur la Figure 3.8 il peut être observé le comportement thermique des quatre formulations en fonction de la variation de l'humidité relative. Comme attendu, la conductivité thermique des matériaux augmente avec l'humidité relative. Sur cette base, des augmentations de 22,4%, 16,4%, 18,5% et 15,5% sont notées. La présence de paille de chiendent dans la matrice de terre semble donc freiner l'augmentation de la conductivité thermique des matériaux lorsque la teneur en eau augmente. Cela se remarque davantage sur la Figure 3.8 où la pente de la droite de progression de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour le  $BTC_8 - 1,5$  est de 0,018 contre 0,05 pour le  $BTC_8 - 0$ .



**Figure 3.6:** Evolution de la conductivité thermique des BTC en fonction de la teneur en paille



**Figure 3.7:** Conductivité thermique des BTC à différentes humidités relatives

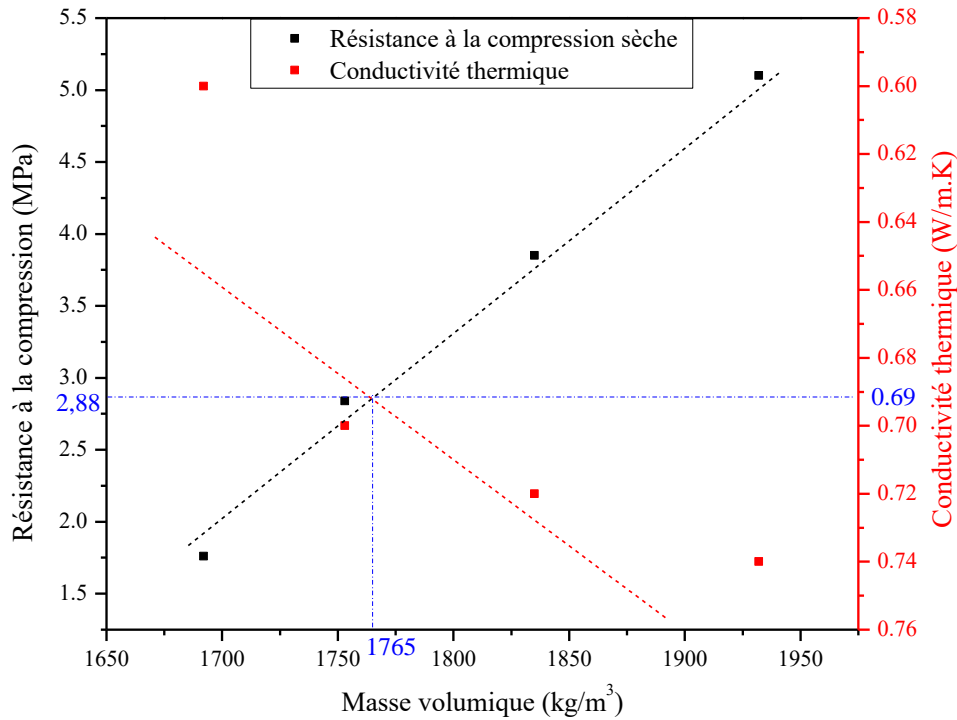


**Figure 3.8:** Evolution de la conductivité thermique des BTC en fonction de la teneur en eau

Le Tableau 3.1 présente l'ensemble des propriétés thermiques des différentes formulations de BTC argile – paille de chiendent à 40% d'humidité relative. A l'analyse des données renseignées dans ce tableau, le BTC<sub>8</sub> – 1,5 semble être le matériau le mieux adapté pour une réduction importante de la consommation énergétique des bâtiments. Il a une plus faible conductivité thermique et possède donc la meilleure capacité à limiter le transfert de chaleur en son sein. Grâce à sa capacité thermique élevée et à sa faible diffusivité thermique, le matériau pourra plus retarder la propagation de la chaleur et mieux la stocker en son sein. Ce qui lui confère une bonne inertie thermique. Et pourtant, cette formulation ne pourra pas être retenue à cause de ses propriétés mécaniques qui ne permettent pas son emploi dans l'enveloppe des bâtiments. En d'autres termes, une augmentation de la teneur en agrégat végétal dans les matrices de terre améliore les performances thermiques des matériaux composites au détriment de leurs performances mécaniques. Cela a d'ailleurs été constaté par Ben et al. (2016). Ce faisant, pour identifier une formulation thermiquement et mécaniquement efficace, les auteurs proposent de rechercher l'intersection des droites de régression des résistances à la compression et des conductivités thermiques en fonction des masses volumiques des matériaux tel qu'illustré à la Figure 3.9. En projetant le point d'intersection sur les trois axes, les valeurs obtenues pour la masse volumique, la résistance à la compression sèche et la conductivité thermique sont respectivement  $1765 \text{ kg/m}^3$ ,  $2,88 \text{ MPa}$  et  $0,69 \text{ W/m.K}$ . A ce titre, le matériau dont les caractéristiques se rapprochent le plus des coordonnées du point d'intersection est le BTC<sub>8</sub> – 1 avec  $\rho = 1753 \text{ kg/m}^3$ ,  $DCM = 2,84 \text{ MPa}$  et  $\lambda = 0,72 \text{ W/m.K}$ .

**Tableau 3.1:** Propriétés thermiques des différentes formulations de BTC argile – paille de chiendent à 40% d’humidité relative

Formulation	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	DCM (MPa)	$\lambda$ (W/m.K)	a (mm <sup>2</sup> /s)	C <sub>p</sub> (kJ/kg.K)	E (W/K.m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )
BTC <sub>8</sub> – 0	1932 ± 6	5,1 ± 0,5	0,74 ± 0,02	0,59 ± 0,08	633 ± 34	951 ± 88
BTC <sub>8</sub> – 0,5	1835 ± 3	3,85 ± 1,1	0,72 ± 0,02	0,60 ± 0,11	682 ± 16	952 ± 124
BTC <sub>8</sub> – 1	1753 ± 7	2,84 ± 0,9	0,70 ± 0,03	0,57 ± 0,07	729 ± 64	962 ± 58
BTC <sub>8</sub> – 1,5	1692 ± 5	1,76 ± 0,2	0,60 ± 0,04	0,61 ± 0,19	785 ± 9	942 ± 48



**Figure 3.9:** Choix de la formulation thermiquement et mécaniquement efficace

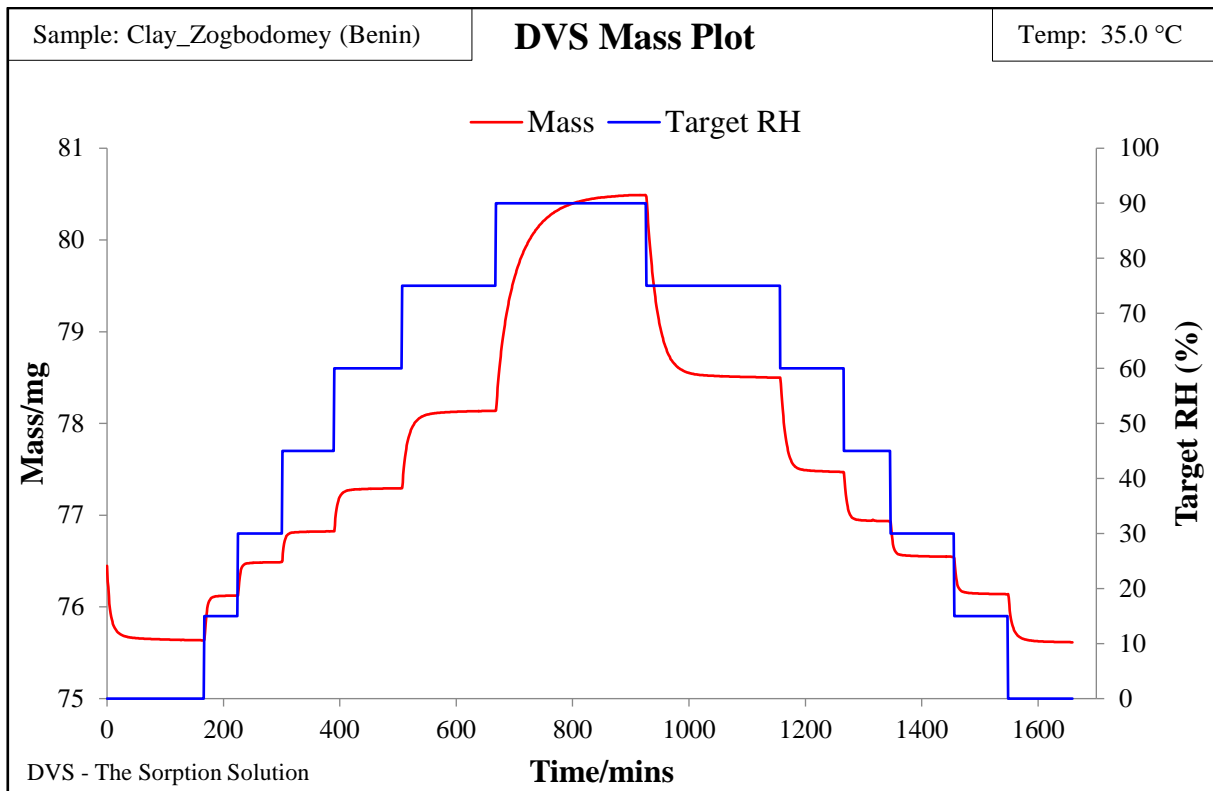
### 3.2.2 Isothermes de sorption

#### ❖ Matières premières

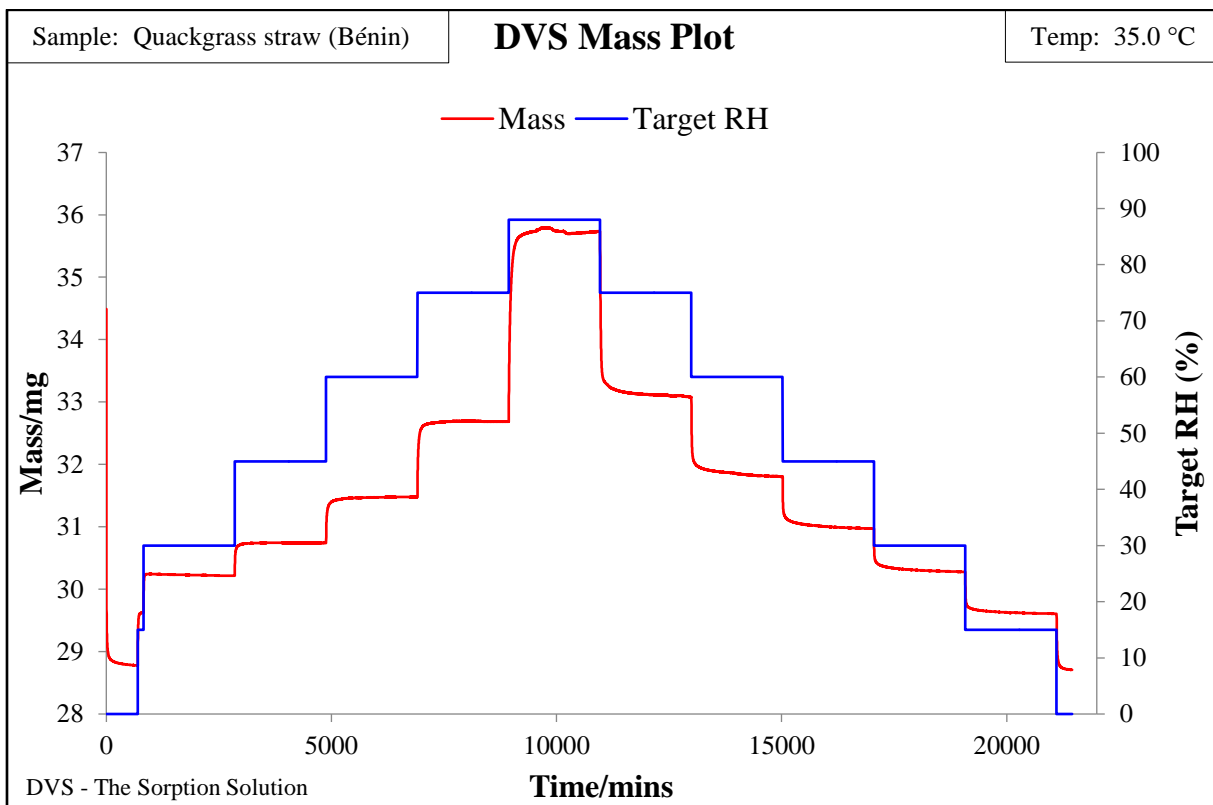
Les Figure 3.11 présentent les scénarios de variation de l’humidité relative dans l’enceinte et de masse des échantillons d’argile et de paille de chiendent lors des essais de sorption. L’analyse des graphes démontre que le critère d’équilibre fixé pour ces essais ( $dm/dt = 0,005\%$ ) est respecté puisque l’équilibre hygrométrique au sein des matériaux est bien atteint avant tout changement de palier d’humidité. Par ailleurs, en se penchant sur les résultats de sorption des deux matériaux (Figure 3.12), il apparaît logiquement que la paille de chiendent absorbe nettement plus d’humidité que l’argile. A 90% d’Humidité Relative (HR), l’argile et la paille de chiendent contiennent respectivement 6,4 %*kg/kg* et 24,2 %*kg/kg* d’eau. Une comparaison faite avec la terre étudiée par Laborel-Préneron et al. (2018) révèle que l’argile de Zogbodomey absorbe 3 fois plus d’eau. Cependant, la présence dominante de la kaolinite dans l’argile de Zogbodomey (> 50%) affecte son taux d’absorption. Selon Liuzzi et al. (2013), la kaolinite est relativement moins sensible à l’humidité que d’autres minéraux argileux tels que

le montmorillonite, l'illite, etc. Cela a d'ailleurs été confirmé par les travaux de Cagnon et al. (2014) qui, après avoir déterminé les isothermes de sorption de cinq briques en terre de minéralogie différente, observent que seule la brique composée principalement de kaolinite absorbe deux fois moins l'humidité que les quatre autres composées d'un mélange d'illite, de chlorite et de montmorillonite.

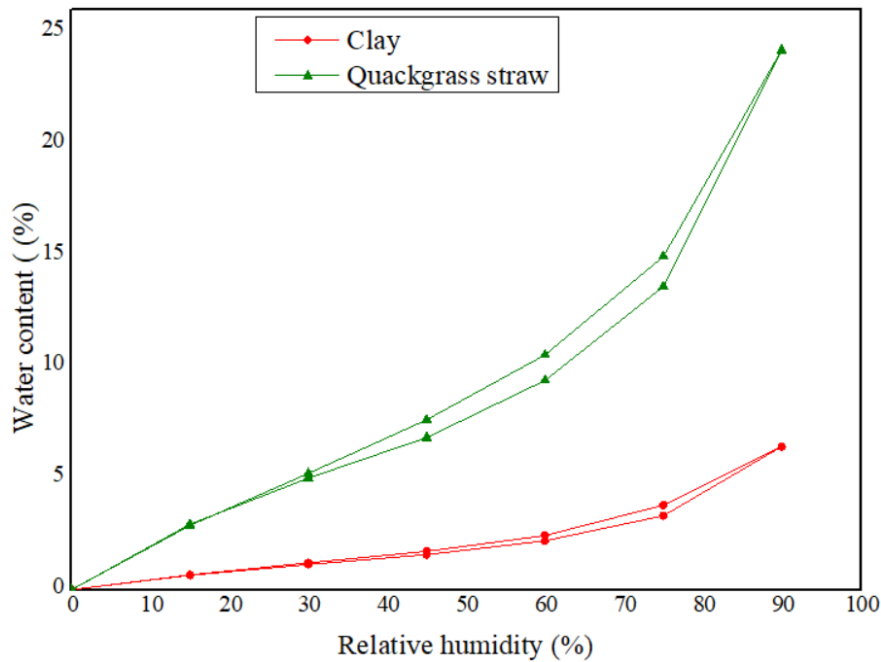
Quant à la paille de chiendent, sa bonne teneur en humidité d'équilibre témoigne de la nature hygroscopique du matériau. En se basant sur la littérature consultée, la teneur en humidité de la paille de chiendent (24,2 %*kg/kg*) semble supérieure à celles d'autres agrégats végétaux. Par exemple, pour des essais de sorption réalisés à 25°C à la DVS par Hill et al. (2009), les teneurs en eau à 90% de HR des fibres de jute, de coco, de lin, d'épicéa de Sitka, de chanvre et de coton sont d'environ 20, 22, 16, 19,5, 19 et 12 %*kg/kg* respectivement. Ces teneurs sont de 19 %*kg/kg* pour les copeaux de chanvre, 23 %*kg/kg* pour les épis de maïs et 22 %*kg/kg* pour la paille d'orge à 90% de HR et 23°C (Laborel-Préneron et al., 2018). Pour ce dernier agrégat, Bui et al. (2017) ont analysé les isothermes de sorption du matériau obtenus avec les méthodes SSS et DVD. Ils en sont arrivés à la conclusion que les deux approches permettaient d'obtenir des isothermes de sorption similaires avec une teneur en humidité d'équilibre de 20 %*kg/kg* à 90% de HR et 23°C. Même s'il est vrai que les données de comparaison ont été déterminées à des températures d'environ 10°C inférieures à celle fixée dans la présente étude (35°C), il faut noter que l'augmentation de la température réduit le taux d'absorption des matériaux biosourcés (McMinn & Magee, 1999). Fort de cette affirmation, il peut donc être conclu que la paille de chiendent est plus hygroscopique que la plupart des matériaux biosourcés ajoutés aux matrices de terre. Ainsi, l'incorporation de la paille de chiendent dans la matrice de terre devrait améliorer la capacité de sorption du matériau.



**Figure 3.10:** Evolution de l'humidité et de la masse de l'argile



**Figure 3.11:** Evolution de l'humidité et de la masse de la paille de chiendent



**Figure 3.12:** Isothermes de sorption à 35°C de l'argile et de la paille de chiendent

❖ *BTC argile – paille de chiendent*

A la suite des résultats de caractérisation thermique, le  $BTC_8 - 1$  s'est révélé comme la formulation la plus efficace compte tenu des contraintes thermomécaniques (Figure 3.15). Pour cette raison, la détermination des isothermes de sorption a principalement porté sur le  $BTC_8 - 1$ . Cependant, pour apprécier l'influence de la paille de chiendent sur la capacité de sorption de la matrice de terre, les isothermes de sorption du  $BTC_8 - 0$  ont également été déterminés. Les Figure 3.13 et Figure 3.14 illustrent les conditions hygrothermiques dans le V-GA2 et les évolutions massiques des échantillons ( $BTC_8 - 0$  et  $BTC_8 - 1$ ) au cours des essais de sorption. De façon générale, il peut être constaté que les conditions fixées pour ces essais sont bien respectées puisque dans les deux cas, la température est restée constante à 35°C et l'évolution de l'humidité relative par pas de 15% est bien exécutée. Les allures des deux courbes de masse démontrent que le renforcement du critère d'équilibre de 0,005% pour les essais sur les matières premières à 0,003% pour les BTC était nécessaire en ce sens que l'atteinte de l'équilibre massique des échantillons lors de certaines phases s'est opérée de justesse. C'est le cas lors des changements du niveau d'humidité relative de 60% à 75% et de 30% à 15% pour le  $BTC_8 - 0$  puis de 60% à 30% pour le  $BTC_8 - 1$ . Pour chacune de ces phases, la stabilisation de la masse des échantillons n'est pas clairement visible comme dans les autres phases. Toutefois, les allures présentées sont satisfaisantes et ne remettent pas en cause le bon déroulement des essais, encore moins la fiabilité des résultats obtenus.

En s'intéressant cette fois ci aux résultats des essais présentés à la Figure 3.17, il peut tout d'abord être remarqué que les allures des courbes de sorption des deux formulations correspondent à un isotherme de type II selon la classification de l'IUPAC. Cette catégorisation

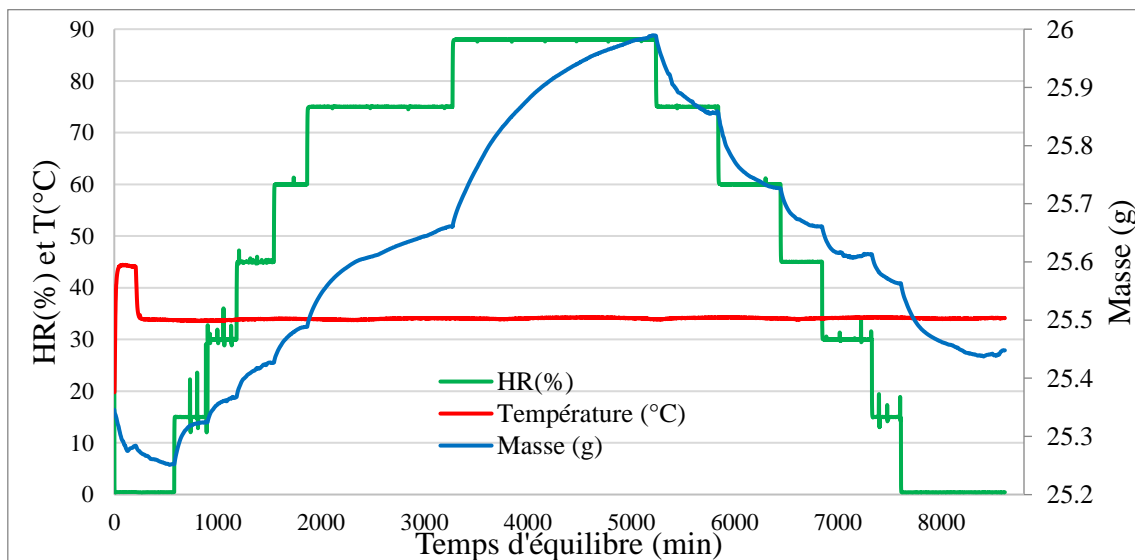
renseigne sur la structure macroporeuse des blocs. Une analyse plus poussée des courbes de sorption permet d'observer la faible teneur en humidité d'équilibre des échantillons sur une plage d'humidité relative de 0 à 60%. La teneur maximale atteinte dans cet intervalle est de 0,93 %*kg/kg* pour le  $BTC_8 - 0$  et de 1,03 %*kg/kg* pour le  $BTC_8 - 1$ . Mais au-delà de cette plage, les teneurs en humidité d'équilibre des échantillons évoluent rapidement pour atteindre le double, voire le triple à seulement à 88% d'humidité relative. Ce comportement des matériaux semble être en accord avec les affirmations de Hansen et al. (2002) selon lesquelles les matériaux en terre absorbent beaucoup plus d'humidité lorsqu'ils sont soumis à des humidités relatives élevées ; généralement supérieures à 90%.

Ainsi, à 88% d'humidité relative, la teneur en humidité d'équilibre du  $BTC_8 - 0$  est de 2,92 %*kg/kg* ; soit moins de la moitié de l'EMC initiale de l'argile en vrac. Une telle diminution de la capacité de sorption des blocs peut se justifier par le remplacement d'une part importante (environ 36%) de l'argile par un matériau à très faible hygroscopicité (concassé 0/5). Aussi, l'ajout de ciment en est une cause non négligeable. Selon Saidi et al. (2018), l'usage de stabilisant chimique dans les matériaux en terre réduit leur capacité d'absorption. Les auteurs ont montré que l' $EMC_{97\%}$  de leurs BTC passe de 5,69 à 3,7 %*kg/kg* lorsque la teneur en ciment augmente de 0 à 12%. Les valeurs obtenues par les auteurs à 88% d'humidité relative avec 0% et 8% de ciment sont respectivement de 4,5 %*kg/kg* et 3,4 %*kg/kg*. Toujours avec 8% de ciment et à une humidité relative de 88%, McGregor et al. (2014) observent pour leur part une réduction de 22% de l'EMC par rapport aux blocs en terre non stabilisée. Dans ces deux études, un comportement similaire des matériaux en présence de la chaux a été observé. De pareilles observations ont également été rapportées par McGregor et al. (2014) et Arrigoni et al. (2017). Dans certains des travaux consultés, les EMC déterminées pour les matériaux en terre sont supérieures à celles du  $BTC_8 - 0$  (Ashour et al., 2015; Saidi et al., 2018). Outre l'influence du concassé 0/5, ces écarts peuvent une fois encore être liés à la différence de température entre les essais de sorption. Tout comme pour les matières premières, les isothermes de sorption des  $BTC_8 - 0$  et  $BTC_8 - 1$  ont été déterminés à 35°C alors que cette température varie généralement de 23 à 25°C dans la littérature, ce qui explique en partie les valeurs moins élevées obtenues avec les blocs en argile paille de chiendent. D'ailleurs, Daian (1988) affirme que l'EMC des matériaux de construction diminue avec l'augmentation de la température. Dans ce sens, Ashour et al. (2015) ont observé une diminution de 16% de l'EMC moyenne de leurs briques en terre lorsque la température passe de 10 à 40%. Par ailleurs, les auteurs se sont également intéressés à l'influence des fibres végétales sur la dynamique de sorption des BTC. A 40°C, une augmentation générale de l' $EMC_{moy}$  a été observée après les ajouts de 1% et 3% de paille de blé. En revanche, pour les mêmes teneurs en paille d'orge, l' $EMC_{moy}$  a respectivement diminué de 2,4% et augmenté de 3,8%. Un comportement plus moins similaire a été observé avec le  $BTC_8 - 1$ .

En effet, dans l'intervalle de [0% HR, 60% HR], l' $EMC_{moy}$  de la matrice de terre augmente d'environ 13% après l'ajout de 1% de paille de chiendent. En revanche, au-delà de cet intervalle, un changement de tendance s'opère. L' $EMC_{moy}$   $BTC_8 - 1$  chute de 12,77%, ce qui



se traduit par une teneur en eau de  $2,92 \text{ \%kg/kg}$  pour le  $BTC_8 - 0$  contre une teneur de  $2,57 \text{ \%kg/kg}$  pour le  $BTC_8 - 1$ . Et pourtant, la paille de chiendent présente une bonne aptitude à la sorption comparativement aux agrégats végétaux utilisés dans les travaux consultés. En outre, l'hystérésis générée lors de la désorption pour le  $BTC_8 - 0$  est relativement plus importante que celle du  $BTC_8 - 1$ . Ce phénomène peut être attribué à l'âge des échantillons testés. En effet, les échantillons utilisés n'ont été durcis que pendant 28 jours. Il est donc probable qu'une hydratation supplémentaire se soit produite lors de la phase de désorption. Ce qui aurait conduit à une altération de la structure poreuse de l'échantillon et donc au piégeage d'une partie de l'humidité lors de la désorption. Cette hypothèse a été évoquée par Wu et al. (2014), mais son influence a été minimisée en raison de l'âge des échantillons cimentaires testés par les auteurs (6 mois de durcissement avant les tests). Une autre hypothèse pouvant expliquer cette hystérésis importante serait le non-respect de la condition d'équilibre pendant le déroulement des essais. Mais en se référant à la Figure 3.13, cette hypothèse est peu probable puisque dans la plupart des cas, l'échantillon a atteint l'équilibre avant le changement du niveau d'humidité relative.



**Figure 3.13:** Evolution de l'humidité, de la température et de la masse du et de la masse du  $BTC_8 - 0$

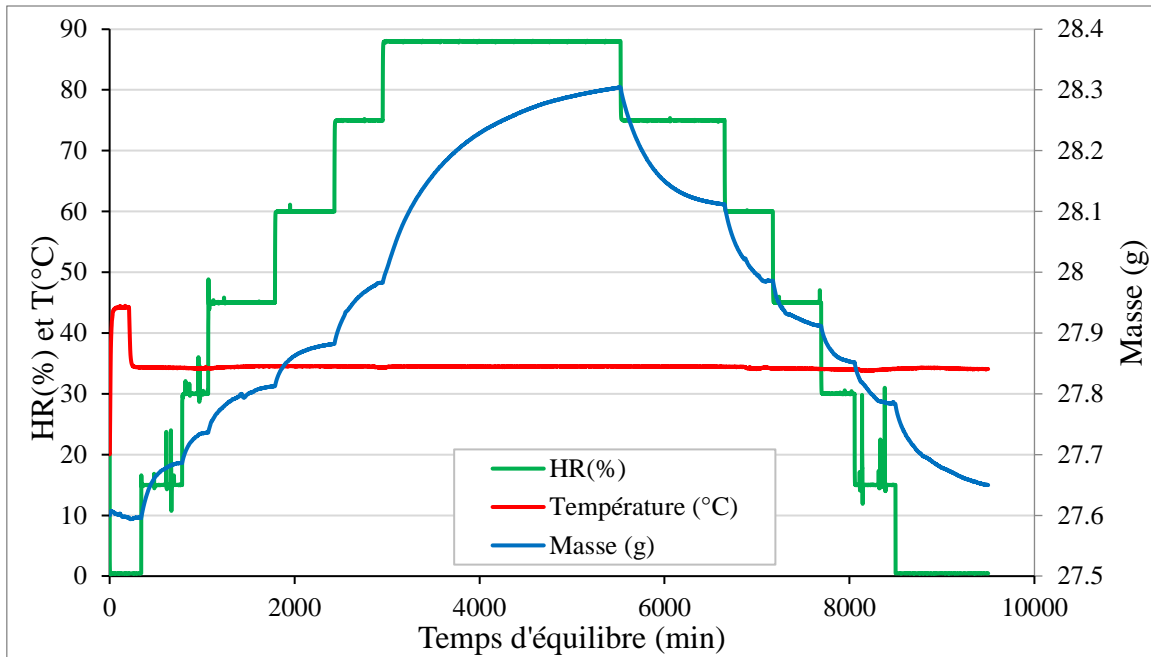


Figure 3.14: Evolution de l'humidité, de la température et de la masse du  $BTC_8 - 1$

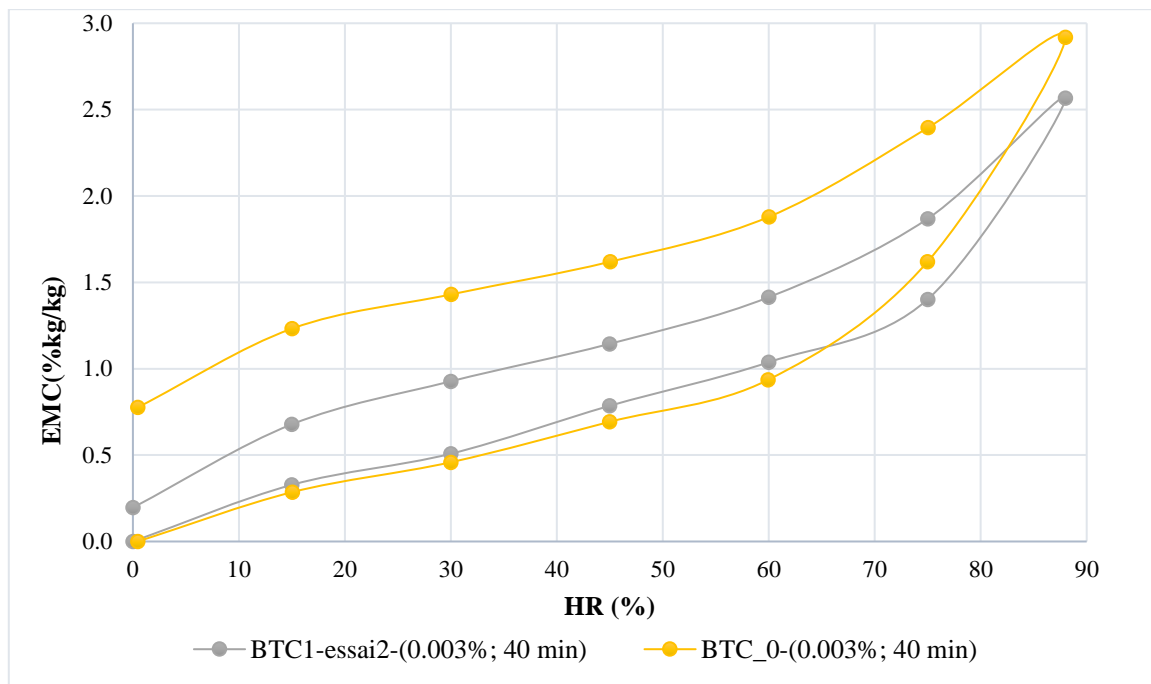
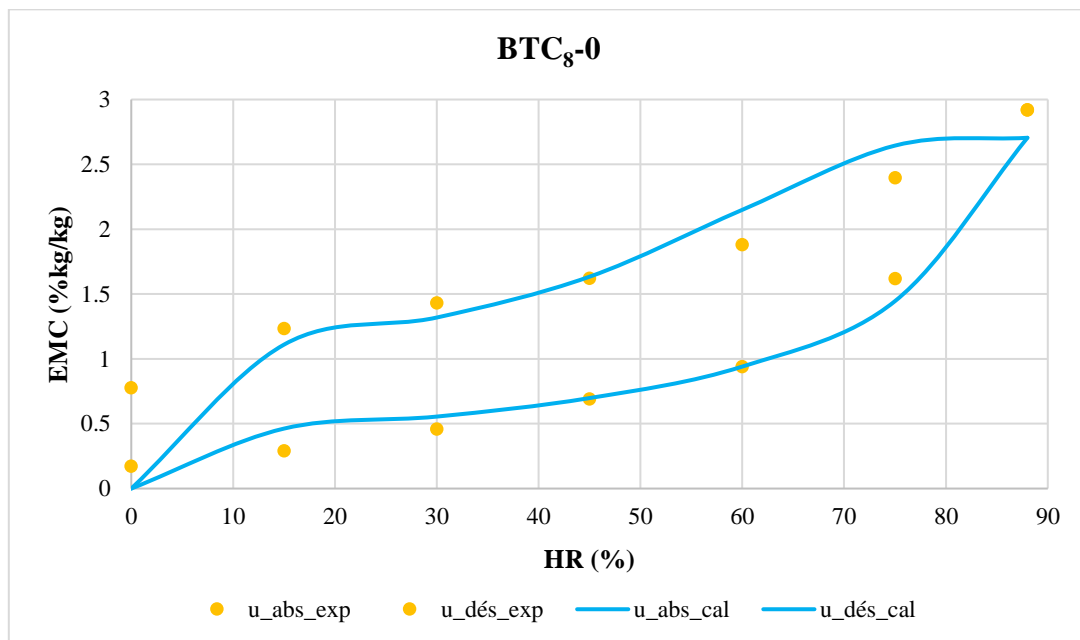


Figure 3.15: Les isothermes de sorption des  $BTC_8 - 0$  et  $BTC_8 - 1$

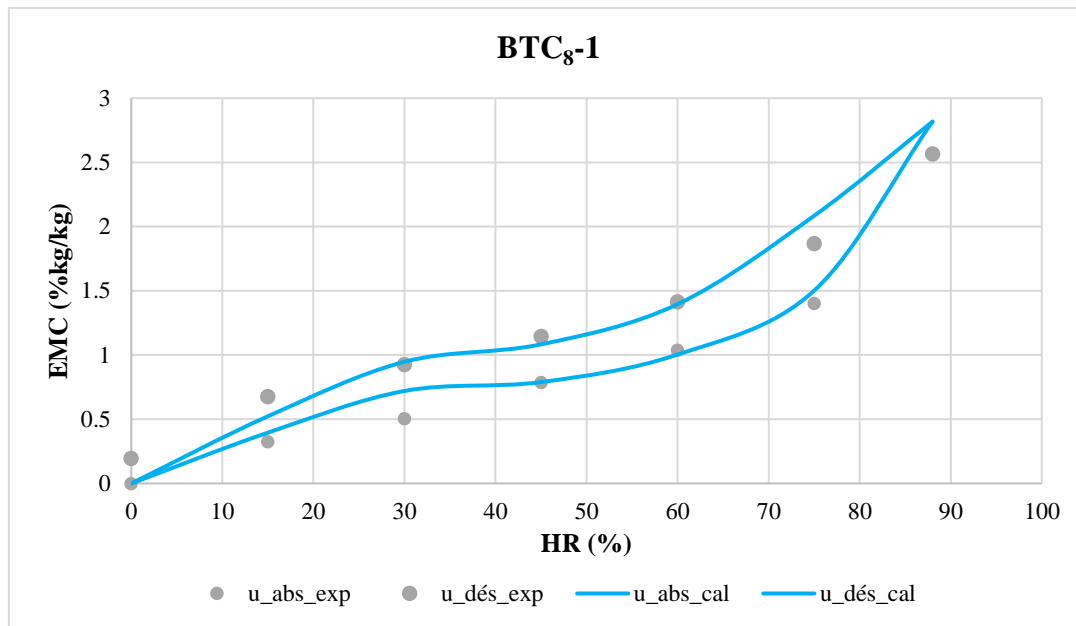
#### ❖ Ajustement des isothermes de sorption des BTC

La figure 3.16 présente l'ajustement des isothermes de sorption des  $BTC_8 - 0$  et  $BTC_8 - 1$  avec le modèle GAB. Les coefficients  $a_j$  et  $b_j$  utilisés à cet effet sont présentés dans le tableau 3.2. Dans ce même tableau figure les indices statistiques de précision du modèle. De façon générale, un bon degré d'ajustement des isothermes de sorption est observé, à l'exception de l'ajustement

de la courbe de désorption du  $BTC_8 - 0$ . Pour cet ajustement, le coefficient de détermination obtenu est de 0,515 ; bien loin de la valeur de référence de 1. Quant au RSS, sa valeur est 5 fois plus élevée que celle des autres, soit  $7,666.10^{-5}$ . Ceci s'explique principalement par l'écart remarqué entre les données expérimentale et théorique à 0% d'humidité relative (figure 3.16a). En effet, comme annoncé plus haut (figure 3.15), la teneur en humidité d'équilibre du  $BTC_8 - 0$ , mesurée à 0% de HR, est de  $0,7 \%kg/kg$  contre une EMC théorique de  $0 \%kg/kg$ . Par contre, pour les autres ajustements, les coefficients de détermination ( $R^2$ ) et les sommes des carrées des résidus (RSS) varient respectivement de 0,933 à 0,974 et de  $1,136.10^{-5}$  à  $1,451.10^{-5}$ . Ce qui témoigne de la bonne capacité du modèle GAB à prédire le comportement de sorption des BTC en argile – paille de chiendent. Les meilleurs ajustements ont cependant été obtenus pour les phases d'absorption avec des coefficients de corrélation minimum de l'ordre de 0,971. Ces valeurs sont proches des résultats d'ajustement qualifiés d'excellents par Charai et al. (2022) et pour lesquels les indices de précision statistiques  $R^2$  et RSS sont respectivement de l'ordre de 0,999 et  $0,848.10^{-5}$ .



(a)



(b)

Figure 3.16: ajustement des isothermes de sorption : (a)  $BTC_8-0$  ; (b)  $BTC_8-1$ .

Tableau 3.2: Paramètres d'ajustement des isothermes de sorption

Absorption	Paramètre du modèle GAB		Paramètres statistiques de précision	
	$a_j$	$b_j$	$R^2$	RSS ( $\cdot 10^{-5}$ )
$BTC_8 - 0$	0,99865	719,38461	0,97437	1,45112
$BTC_8 - 1$	0,90812	10,65041	0,97166	1,2453
Désorption				
$BTC_8 - 0$	0,99870	715,95167	0,51547	7,6663
$BTC_8 - 1$	0,93292	14,44729	0,93315	1,13624

### 3.2.3 Perméabilité à la vapeur / facteur de résistance à la vapeur d'eau / MBV

Les évolutions linéaires des masses des assemblages de coupelle et échantillons témoignent du bon déroulement des essais de perméabilité à la vapeur (Figure 3.17). En analysant la Figure 3.18, il peut être observé une perte de masse constante des assemblages au fil du temps, signe d'un transfert d'humidité à travers les échantillons testés. Les taux de transmission des flux de vapeur d'eau à travers les échantillons sont estimés en moyenne à  $3 \cdot 10^{-9} \text{ kg/s}$ ,  $3,1 \cdot 10^{-9} \text{ kg/s}$ ,  $3,25 \cdot 10^{-9} \text{ kg/s}$  et  $3,72 \cdot 10^{-9} \text{ kg/s}$  pour les  $BTC_8 - 0$ ,  $BTC_8 - 0,5$ ,  $BTC_8 - 1$  et  $BTC_8 - 1,5$  respectivement. Ces valeurs prédisent une perméabilité à la vapeur relativement faible des matériaux. Cela a d'ailleurs été confirmé à la suite de l'application des équations (3.10), (3.11) et (3.12). Les valeurs obtenues varient de  $9,24 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m.s.Pa}$  à  $1,16 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m.s.Pa}$  lorsque la teneur en paille de chiendent passe de 0 à 1,5% (Tableau 3.3). Les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur correspondant sont de  $21,8 \pm 1$  pour le  $BTC_8 - 0$ ,  $21,1 \pm 1,3$  pour le  $BTC_8 - 0,5$ ,  $20,2 \pm 1,6$  pour le  $BTC_8 - 1$  et  $17,4 \pm 0,6$  pour le

$BTC_8 - 1,5$ . Une telle évolution se justifie par des blocs de plus en plus poreux au fur et à mesure que la teneur en paille augmente ; rendant les matériaux moins résistants au transfert de vapeur d'eau. Il peut être remarqué que le facteur de résistance varie très peu (environ 7%) lorsque la teneur en paille passe de 0 à 1%. Des comportements similaires ont été observés par Laborel-Préneron et al. (2018) qui, après avoir ajouté 3% de paille d'orge, chènevotte et épi de maïs à une matrice de terre, n'obtiennent qu'une variation de 6%. Ce pourcentage passe à une moyenne de 24% pour les composites contenant 6% de ces agrégats comme dans le présent cas d'étude où la variation est de 20% pour les  $BTC_8 - 1,5$ . Ce qui permet d'affirmer qu'à de faibles teneurs, les agrégats végétaux ont peu d'influence sur le facteur de résistance à la vapeur ( $\mu$ ). De façon générale, les valeurs de  $\mu$ , déterminées pour les BTC en argile – paille de chiendent, sont relativement plus élevées que celles obtenues pour les matériaux terreux dans la littérature consultée. C'est le cas de Laborel-Préneron et al. (2018) qui obtiennent des facteurs de résistance compris entre 4,8 et 7. Ces facteurs évoluent respectivement de 5,5 à 8,8, de 7 à 8 pour les BTC mis en œuvre par McGregor et al. (2014) et Touré et al. (2017). Quant aux blocs en terre comprimée réalisés par McGregor et al. (2014), les facteurs se situent entre 6 et 13.

Un tel écart entre les valeurs de la littérature et celles obtenues dans la présente étude peut se justifier par la présence de concassé 0/5 dans la matrice de terre. En effet, le concassé 0/5 est résistant au passage de la vapeur d'eau avec un facteur de résistance de l'ordre de 30 (CCSTB, 2012). Ce qui rend moins perméables les BTC en argile – paille de chiendent, composés en moyenne de 36% de concassé 0/5. En outre, l'impact du stabilisant chimique (ciment) dans l'évolution du facteur de résistance ne saurait être argumenté dans ce cas d'étude étant donné que des BTC non stabilisés n'ont pas été fabriqués pour servir d'éléments de comparaison. Sur ce point, les avis divergent dans la littérature. Par exemple, les essais de perméabilité à la vapeur réalisés par Liuzzi et al. (2013) sur les matériaux terreux non stabilisés de différentes compositions minéralogiques et ceux stabilisés avec 5% de chaux donnent des tendances opposées. Pour certains échantillons, le facteur de résistance augmente de 8,8 à 9,3 avec l'incorporation de la chaux alors que pour d'autres, ce facteur diminue de 9,1 à 8,1 et de 11,1 à 9,4. Pour les essais de McGregor et al. (2014), le facteur de résistance évolue dans le même sens que les teneurs en liants chimiques (ciment et chaux) avec une résistance plus importante pour les blocs stabilisés au ciment.

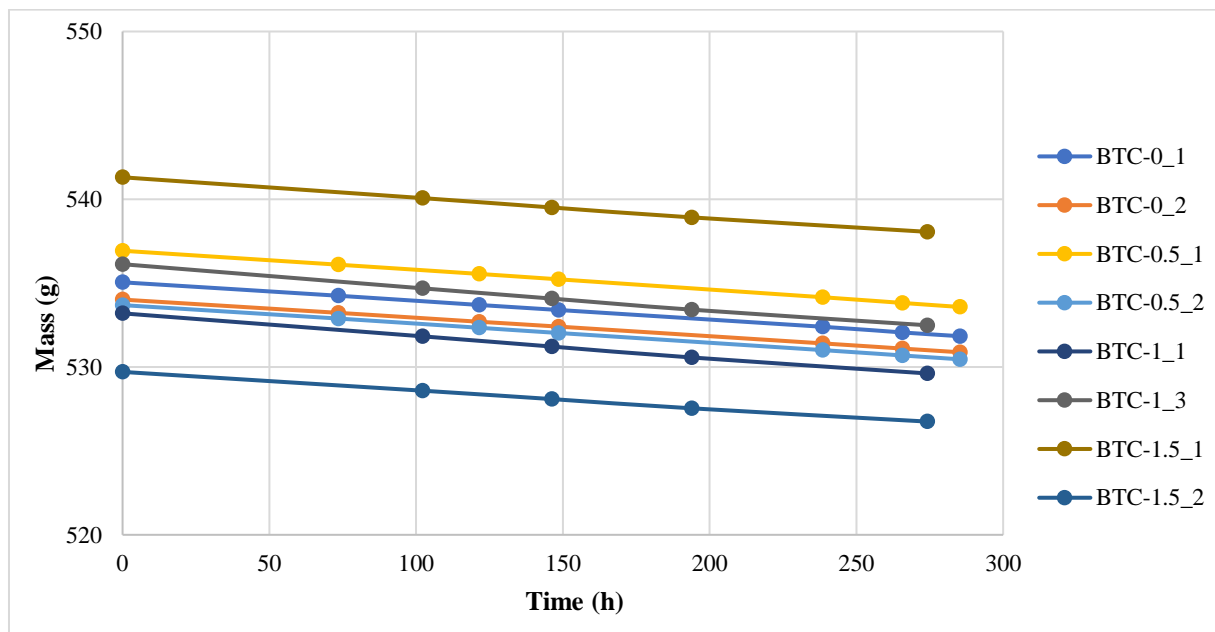
Par ailleurs, les capacités tampons d'humidité des matériaux sont de l'ordre  $1,98 \text{ g/m}^2 \cdot \%RH$  pour le  $BTC_8 - 0$  et de  $2,14 \text{ g/m}^2 \cdot \%RH$  pour le  $BTC_8 - 1$ . Selon la méthode NORDTEST, le niveau tampon d'humidité du  $BTC_8 - 0$  peut être qualifié de 'bon' puisque le MBV de cette formulation est compris entre 1 et  $2 \text{ g/m}^2 \cdot \%RH$  (Rode et al., 2005). Cette capacité est jugée excellente pour le  $BTC_8 - 1$  puisque sa valeur est supérieure à la limite minimale de  $2 \text{ g/m}^2 \cdot \%RH$  fixée pour cette classe (Rode et al., 2005). Les capacités des BTC en argile – paille de chiendent sont en harmonie avec les valeurs de la littérature (McGregor et al., 2014; Palumbo et al., 2016) et quatre fois supérieures à celles des briques en mortier de ciment ( $0,48 \pm 0,19 \text{ g/m}^2 \cdot \%RH$  (Rode et al., 2005)). Avec de telles capacités tampons, la profondeur de pénétration effective de l'humidité (EMPD : Effective Moisture Penetration Depth) des deux

formulations est de l'ordre 3,34 cm (Tableau 3.3). Cette propriété exprime la profondeur à laquelle l'amplitude de l'humidité est amortie à 1% de celle présente à la surface du matériau lorsque ce dernier est soumis à une fluctuation d'HR en surface sur une période de temps donnée (Rode & Grau, 2008). Elle dépend de la diffusivité de l'humidité  $D_w$  ( $m^2/s$ ) et a été déterminée grâce à l'équation (3.22). Ces deux grandeurs varient respectivement de 1,43  $g/m^2 \cdot \%RH$  à 1,88  $g/m^2 \cdot \%RH$  et de 3,2 cm à 4,5 cm pour les matériaux en terre stabilisée mis en œuvre par Liuzzi et al. (2013).

$$EMPD = 4,61 \sqrt{\frac{D_w \cdot t_p}{\pi}} \quad (3.19)$$

Avec

$$D_w = \frac{\delta \cdot p_{sat}}{\rho \cdot \xi} \quad (3.20)$$



**Figure 3.17:** Essais de perméabilité à la vapeur

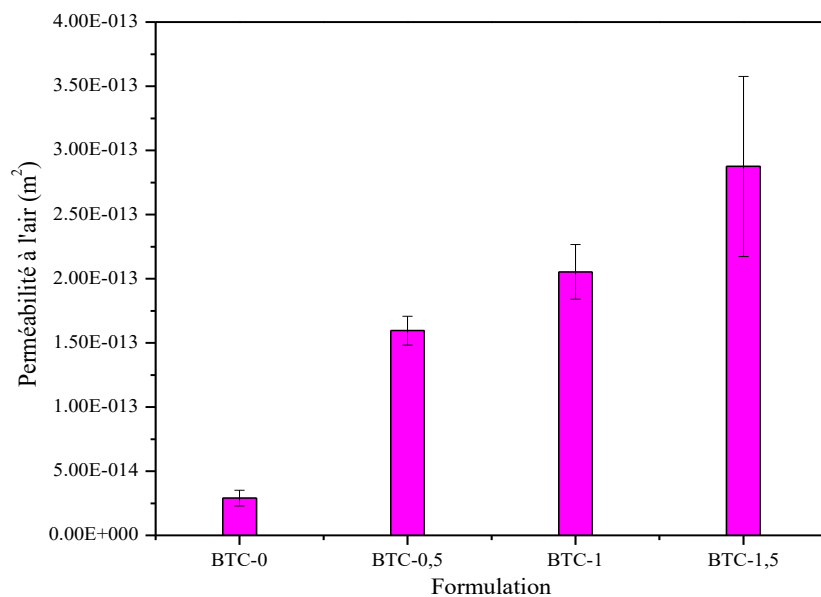
**Tableau 3.3:** Autres propriétés hygriques des BTC argile – paille de chiendent

Formulation	$\delta \cdot 10^{-12}$ (kg/m. s. Pa)	$\mu$ (-)	$MBV_{ideal}$ (g/m <sup>2</sup> . %RH)	EMPD (cm)
BTC <sub>8</sub> – 0	9,24 ± 0,4	21,82 ± 1	1,98	3,33
BTC <sub>8</sub> – 0,5	9,54 ± 0,5	21,16 ± 1,3	–	–
BTC <sub>8</sub> – 1	10 ± 0,3	20,23 ± 1,6	2,14	3,35
BTC <sub>8</sub> – 1,5	11,6 ± 0,7	17,41 ± 0,6	–	–

### 3.2.4 Perméabilité à l'air

La Figure 3.18 montre une augmentation de la perméabilité à l'air des BTC en argile – paille de chiendent en fonction de la teneur en paille. La valeur obtenue pour le BTC<sub>8</sub> – 0 est  $2,91 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ . Cette dernière est 5 fois plus faible lorsque 0,5% de paille est incorporée dans la matrice de terre. Les perméabilités à l'air mesurées pour les blocs contenant de la paille de chiendent sont alors de  $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$  pour le BTC<sub>8</sub> – 0,5 ;  $2,05 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$  pour le BTC<sub>8</sub> – 1 et  $2,88 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$  pour le BTC<sub>8</sub> – 1,5. De telles augmentations se justifient par la création de chemins préférentiels dans la matrice de terre par la paille de chiendent. La perméabilité à l'air des matériaux dépend de la taille, de la distribution et de l'interconnectivité des pores (Wei Ai, 2016). Cela est d'autant plus vrai que l'ajout de la paille de chiendent au matériau terre a augmenté sa porosité de 27% à 33% pour des teneurs en paille de 0 à 1,5%.

Le tableau 3.4 résume l'ensemble des résultats obtenus à l'issue des différents essais de caractérisation physique, mécanique, hygrothermique et de durabilité.



**Figure 3.18:** Perméabilité à l'air des BTC argile – paille de chiendent

**Tableau 3.4:** Propriétés physiques, mécaniques, hygrothermiques et de durabilité des BTC en argile – paille de chiendent

Propriétés		<i>BTC<sub>8</sub> – 0</i>	<i>BTC<sub>8</sub> – 0,5</i>	<i>BTC<sub>8</sub> – 1</i>	<i>BTC<sub>8</sub> – 1,5</i>
Physiques	Masse volumique ( $kg/m^3$ )	1932	1835	1753	1692
	Porosité (%)	27,1	28,35	31,35	33
	Absorption capillaire ( $g/cm^2 \cdot s^{0,5}$ )	6,43	9,37	16,19	22,65
Mécaniques	Résistance à la compression sèche (MPa)	5,1	3,85	2,84	1,76
	Résistance à la compression humide (MPa)	3	1,82	1,02	0,56
Durabilité	Coefficient d'abrasion ( $cm^2/g$ )	29,7	17,06	7,72	7,11
	Profondeur d'érosion à 500 kPa ( $mm/h$ )	6,6	12,9	23,3	32,6
Thermiques	Conductivité thermique à 40% de HR ( $W/m.K$ )	0,74	0,72	0,70	0,6
	Capacité thermique ( $J/kg.K$ )	685	735	771	785
	Diffusivité thermique ( $m^2/s$ )	$5,57 \cdot 10^{-7}$	$5,53 \cdot 10^{-7}$	$5,23 \cdot 10^{-7}$	$4,55 \cdot 10^{-7}$
	Effusivité thermique ( $J/K \cdot m^2 \cdot s^{1/2}$ )	987	980	975	895
Hygriques	Perméabilité à la vapeur ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ )	9,24	9,54	10	11,6
	Facteur de résistance à la vapeur (–)	21,82	21,16	20,23	17,41
	$MBV_{ideal}$ ( $g/m^2 \cdot \%RH$ )	1,98	–	2,14	–
	EMDP (cm)	3,33	–	3,35	–
Aéraulique	Perméabilité à l'air ( $m^2$ )	$2,91 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$2,05 \cdot 10^{-13}$	$2,88 \cdot 10^{-13}$

### Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la caractérisation hygrothermique des différentes formulations de BTC en argile – paille de chiendent mises en œuvre. A l'issue des essais de caractérisation thermique, les conductivités thermiques des BTC à 40% d'humidité relative sont de  $0,74 W/m.K$ ,  $0,72 W/m.K$ ,  $0,7 W/m.K$  et  $0,6 W/m.K$  respectivement pour les *BTC<sub>8</sub> – 0*, *BTC<sub>8</sub> – 0,5*, *BTC<sub>8</sub> – 1*, *BTC<sub>8</sub> – 1,5*. A 85% d'humidité relative ces valeurs augmentent en moyenne de 10%, preuve du rôle de l'humidité dans le transfert de la chaleur. La diffusivité et l'effusivité thermiques des matériaux diminuent avec l'augmentation de la teneur en paille tandis que la capacité thermique augmente. Ce qui prédit une bonne inertie thermique pour ces matériaux. Sur le plan hygrique, l'évaluation de la capacité de sorption des matériaux révèle une meilleure absorption des blocs testés (*BTC<sub>8</sub> – 0* et *BTC<sub>8</sub> – 1*) à des humidités relatives



élevées. Par exemple, à 60% d'humidité relative, les teneurs en humidité d'équilibre des blocs sont respectivement 0,93% et 1%. Au-delà, ces teneurs augmentent de façon plus importante pour atteindre 2,92% et 2,6% respectivement, soit plus du double des teneurs en humidités mesurées à 60% de HR. Ce comportement s'avère utile dans les régions à forte humidité tel que Cotonou où l'humidité relative moyenne tourne autour de 85%. Ainsi, utiliser ces matériaux dans les enveloppes de bâtiments dans de telles zones contribuerait à une régulation passive de l'humidité des ambiances intérieures. Par ailleurs, les blocs en argile – paille de chiendent sont relativement moins perméables à la vapeur d'eau que la plupart des matériaux en terre identifiés dans la littérature. Les facteurs de résistance à la vapeur d'eau de ces matériaux sont de l'ordre de 20 alors que dans la littérature consultée, ce facteur tourne autour de 8 (McGregor et al., 2014).

La connaissance de ces propriétés hygrothermiques permet d'évaluer la performance énergétique des enveloppes en BTC en argile – paille de chiendent à travers des simulations. Mais avant, une campagne de monitoring et d'évaluation de confort thermique, présentée dans le chapitre suivant, a été réalisée sur un bâtiment de bureaux afin de disposer de données réelles utiles pour la calibration des modèles de simulations énergétiques.

# CHAPITRE 4

## Monitoring et évaluation du confort thermique dans un bâtiment de bureaux

---

### Sommaire

Introduction .....	106
4.1 Monitoring du bâtiment d'étude .....	106
4.1.1 Présentation de la zone d'étude et du bâtiment témoin .....	106
4.1.2 Campagne de mesure des données énergétiques et climatiques.....	107
4.2 Evaluation du confort thermique dans le bâtiment .....	114
4.2.1 Matériel et méthodes .....	114
4.2.2 Résultats .....	117
Conclusion.....	124

## **4. MONITORING ET EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE DANS UN BÂTIMENT DE BUREAU**

---

### **Introduction**

Ce chapitre est consacré à la collecte de données énergétiques et à l'évaluation du confort thermique dans un bâtiment de bureaux au sud Bénin. L'objectif est de disposer de données réelles, issues d'une étude de cas pour rendre les résultats de simulation plus proches que possible de la réalité. Pour se faire, une campagne de surveillance énergétique, hygrothermique et météorologique a été initiée. Les données collectées pourront être utilisées pour calibrer les modèles de simulation et servir d'éléments de comparaison entre les résultats de simulation énergétique avec une enveloppe de bâtiment conventionnellement utilisée au Bénin et celle en argile – paille de chiendent proposée dans la présente étude. Aussi, la réalisation d'une étude de confort basée sur le ressenti thermique réel des occupants permettra de déterminer les conditions de confort recherchées par les occupants et d'évaluer la capacité de l'enveloppe en argile – paille de chiendent à atteindre ces conditions. Sur cette base, les potentiels gains énergétiques dus à l'emploi des BTC en argile – paille de chiendent dans l'enveloppe du bâtiment et basés sur les besoins de confort thermique réels des personnes pourront être déterminés grâce à un outil de simulation.

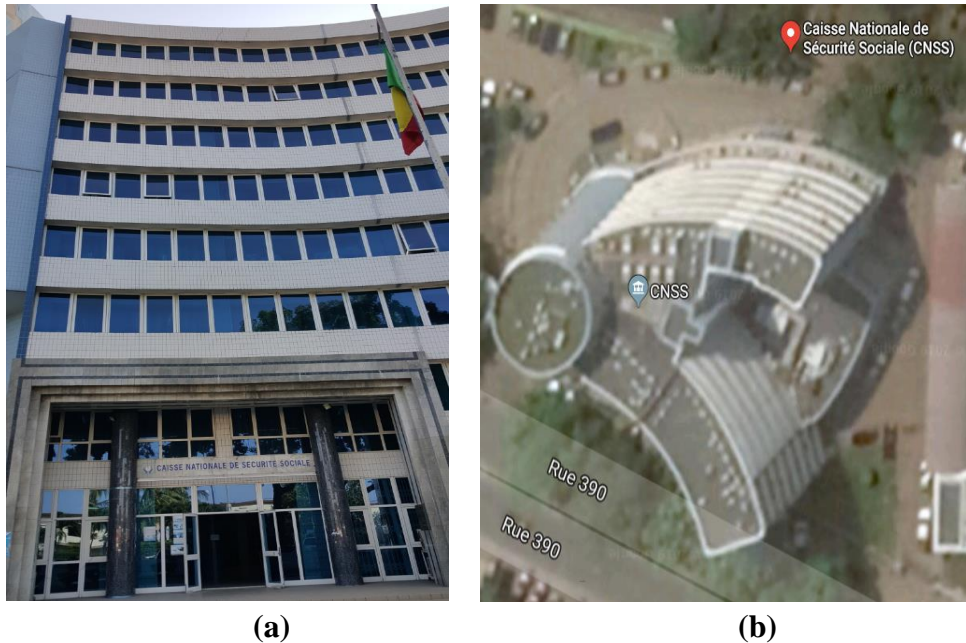
### **4.1 Monitoring du bâtiment d'étude**

#### **4.1.1 Présentation de la zone d'étude et du bâtiment témoin**

Le bâtiment retenu pour la surveillance énergétique et l'évaluation du confort thermique est un bâtiment de bureaux situé dans la ville de Cotonou au sud du Benin. Avec une superficie de 79 km<sup>2</sup>, la ville de Cotonou se situe au croisement des parallèles 6°20' et 6°23' de latitude Nord et des méridiens 2°22' et 2°28' de longitude Est. Elle jouit d'un climat tropical de type *Aw* selon la classification climatique de Köppen-Geiger (Kotteck et al., 2006). La saison la plus chaude de l'année couvre la période de février à mai avec des températures et humidités moyennes avoisinant respectivement les 30°C et 80%. Quant à la saison la plus fraîche, elle est observée en juillet – août. Les températures et humidités moyennes relevées en cette période tournent autour de 27°C et 83% respectivement. Cotonou est la capitale économique du Benin avec une population de 2.401.067 habitants, soit environ 1/5 de la population nationale (Robaa, 2011). Elle représente le pôle de développement du pays et abrite la plupart des institutions privées, nationales et internationales. Cette ville concentre une grande partie des besoins énergétiques du pays. Le Benin étant un pays très peu industrialisé, la majeure partie de l'énergie produite est consommée par les bâtiments (68,53% (DGRE, 2021)). Toujours selon les statistiques de la Direction Générale des Ressources Energétiques, 31,32% de l'énergie électrique fournie au pays en 2020 a été consommée par les bâtiments de bureaux.

A cet effet, un bâtiment de bureaux a été choisi comme bâtiment d'étude. Il s'agit du bâtiment de la direction générale de la Caisse Nationale de Sécurité Sociale (CNSS). Il est situé à 6°21'14,89''N de latitude et à 2°24'10,56''E de longitude. Le bâtiment se compose d'une tour

circulaire de neuf étages et de deux ailes A et B de sept étages chacune et de forme concave (Figure 4.1). L'aile A, comportant l'entrée principale du bâtiment (Figure 4.1a) est orientée vers le nord. Elle fait un angle d'environ  $47^\circ$  avec l'aile B. L'enveloppe du bâtiment, construite en brique de mortier de ciment et recouverte à l'extérieur par des carreaux, comporte 38% de surface vitrée. Le bâtiment dispose principalement d'un hall d'entrée au rez-de-chaussée, de 88 bureaux et de sept salles de réunion, le tout réparti sur une superficie de  $6098 \text{ m}^2$ . Toutes les salles de réunions et bureaux sont climatisés ; les derniers étant occupés par 215 fonctionnaires.

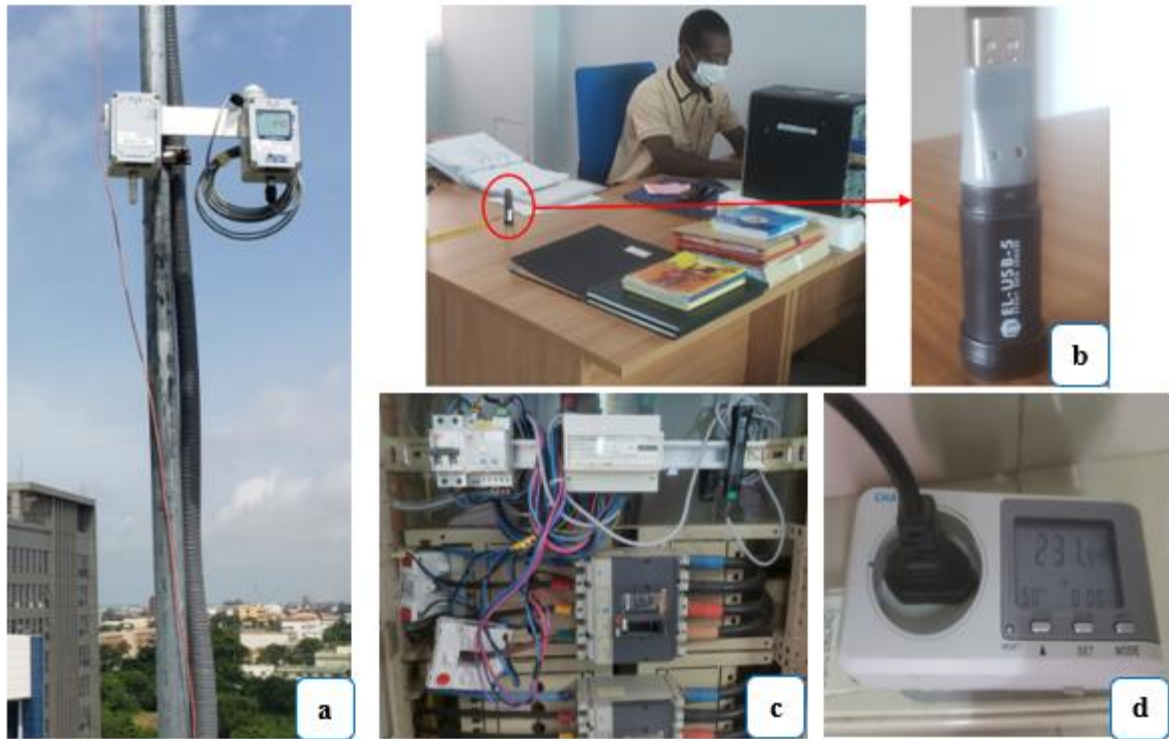


**Figure 4.1:** (a) Vue de face du bâtiment d'étude ; (b) Vue de dessus (Google Map)

#### 4.1.2 Campagne de mesure des données énergétiques et climatiques

##### ❖ Matériel

La campagne de surveillance du bâtiment a été consacrée à la collecte des données hygrothermiques des bureaux, énergétiques du bâtiment et météorologiques du site. L'instrumentation dédiée se compose principalement des capteurs Easy-Log (Figure 4.2b) pour la mesure et l'enregistrement de la température ambiante et de l'humidité relative des bureaux ; des enregistreurs de puissance pour les appareils de bureau (Figure 4.2d) ; d'un enregistreur de consommation horaire électrique (Figure 4.2c) pour les principaux postes de consommation du bâtiment et d'une mini station météorologique (Figure 4.2a) pour la mesure des paramètres tels que la température et humidité de l'air extérieur, le rayonnement solaire global, etc. Les caractéristiques des appareils ci-dessus cités sont présentées dans le Tableau 4.1.



**Figure 4.2:** (a) Mini station météorologique, (b) Capteur de température et d'humidité de l'air intérieur, (c) Enregistreur de consommation électrique ; (d) Enregistreur de puissance

**Tableau 4.1:** Spécifications techniques des appareils de mesure

Paramètre mesuré	Instrument	Quantité	Précision	Résolution interne	Tolérance
Température intérieure de l'air (°C)	EasyLog USB 2+	10	$\pm 0,55^{\circ}\text{C}$	0,5°C	$[-35^{\circ}\text{C}; +80^{\circ}\text{C}]$
Humidité relative intérieure (%)	EasyLog USB 2+	10	$\pm 0,5\% \text{RH}$	0,5%	$[0\%; 100\%]$
Température extérieure de l'air (°C)	Delta OHM HD35EDW	1	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	0,1°C	$[-20^{\circ}\text{C}; +70^{\circ}\text{C}]$
Humidité relative extérieure (%)	Delta OHM HD35EDW	1	$\pm 1,8\% \text{RH}$	0,1%	$[0\%; 100\%]$
Rayonnement solaire global ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Delta OHM HD35EDLW	1	—	$1\text{W}/\text{m}^2$	$[0 ; 2000\text{W}/\text{m}^2]$
Puissance des équipements de bureau (W)	CHACON 54357	3	$\pm 0,5\%$	0,1W	$[0\text{W}; 3500\text{W}]$
Consommation horaire électrique (kWh)	GOSSEN METRAWATT U389B	1	—	—	$[0 ; 1000\text{Imp.}/\text{kWh}]$

## ❖ Méthodologie

La campagne de surveillance, réalisée du 25 juin 2020 au 31 décembre 2020 (6 mois), n'a concerné qu'un étage du bâtiment. Ce choix a été fait en raison de la similarité architecturale et d'occupation entre les différents niveaux du bâtiment à l'exception du rez-de-chaussée. Les bureaux surveillés à cet effet sont ceux du 7<sup>ème</sup> étage (Figure 4.3). Ces bureaux sont également les plus exposés aux gains thermiques à travers l'enveloppe à cause des apports directs de chaleur à travers le toit. Ainsi, les capteurs Easy-Log ont été placés dans chaque bureau pour l'enregistrement de la température et de l'humidité relative conformément aux recommandations de la norme ISO 7726 (2001). Les enregistrements ont été faits en continu (pendant et après les heures d'occupation) avec un pas de temps de 5 *min*. Parallèlement à ces mesures, la consommation réelle des équipements de bureau (ordinateur, imprimante, etc.) a été enregistrée grâce à des enregistreurs de puissance (Figure 4.2d) suivant la norme ASHRAE 14-2014. Ces appareils ont permis de mesurer la puissance réelle en fonctionnement et en veille des équipements surveillés, de même que la consommation énergétique globale de l'équipement en fonctionnement. Ces données sont utiles pour estimer les gains thermiques effectifs générés par chaque équipement lors des simulations hygrothermiques.

Par ailleurs la mini station installée sur le toit du bâtiment (Figure 4.2a), à l'écart de tout ombrage, a permis la mesure horaire des données météorologiques du site durant toute la période de surveillance. Les paramètres tels que la température et l'humidité relative de l'air, le rayonnement solaire global, l'irradiation solaire la pression de vapeur d'eau dans l'air, etc., ont été mesurés. Sur la base de ces données, le microclimat du site sera généré dans TRNSYS et WUFI pour les différentes simulations hygrothermiques et énergétiques du bâtiment.

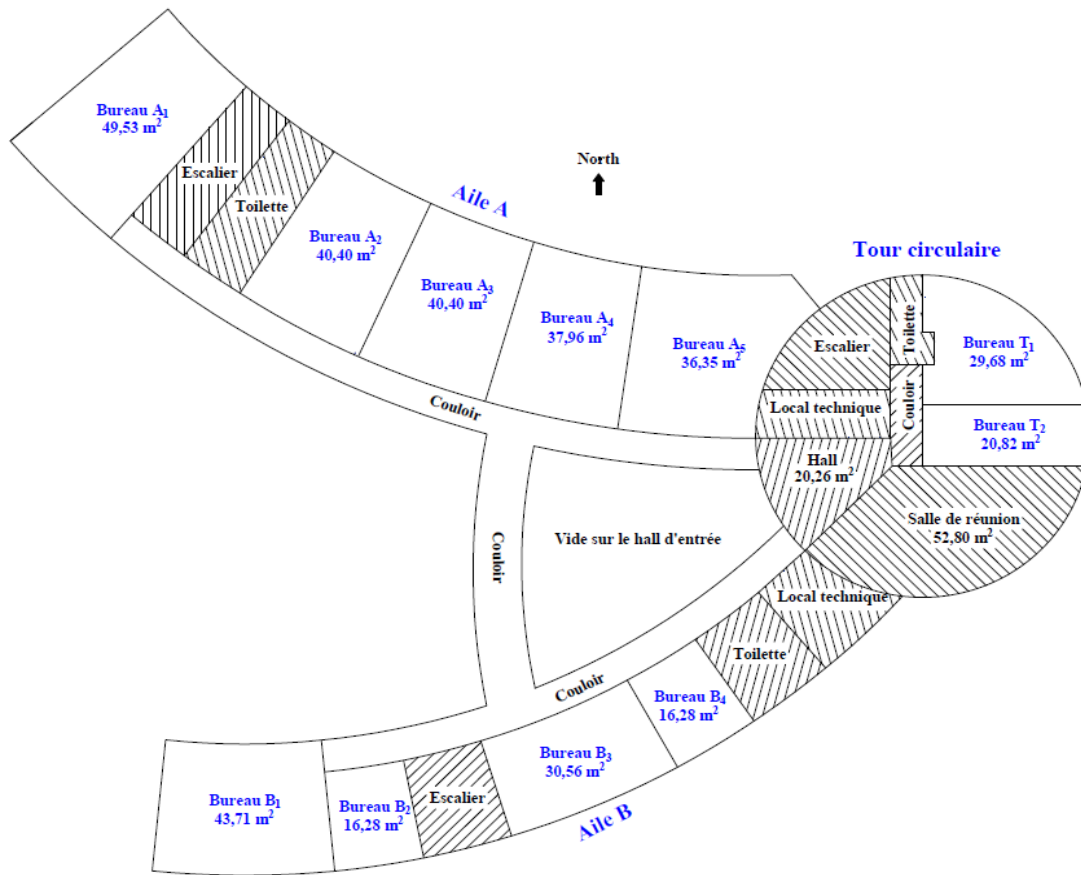


Figure 4.3: Plan du 7ème étage du bâtiment d'étude

#### ❖ Résultats

##### ▪ Données énergétiques des appareils de bureau

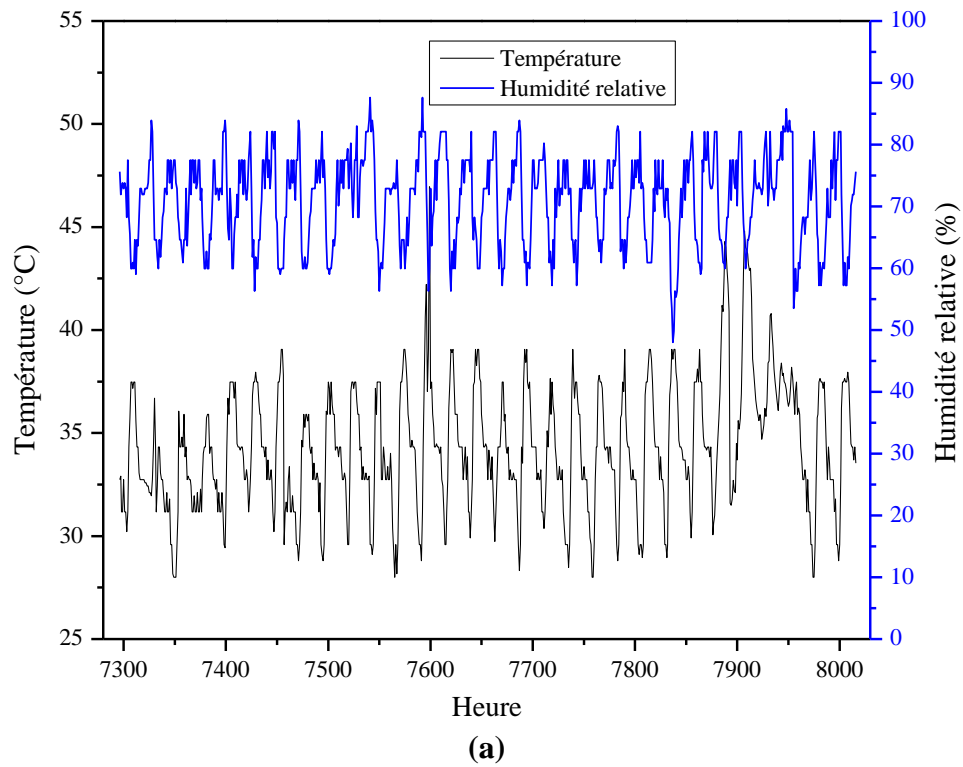
La puissance nominale lue sur les équipements de bureau, leur puissance moyenne de fonctionnement et leur puissance en état de veille sont présentés dans le Tableau 4.2. Ce dernier renseigne également sur le nombre d'appareils recensés par bureau.

Tableau 4.2 : Consommation énergétique des appareils de bureau

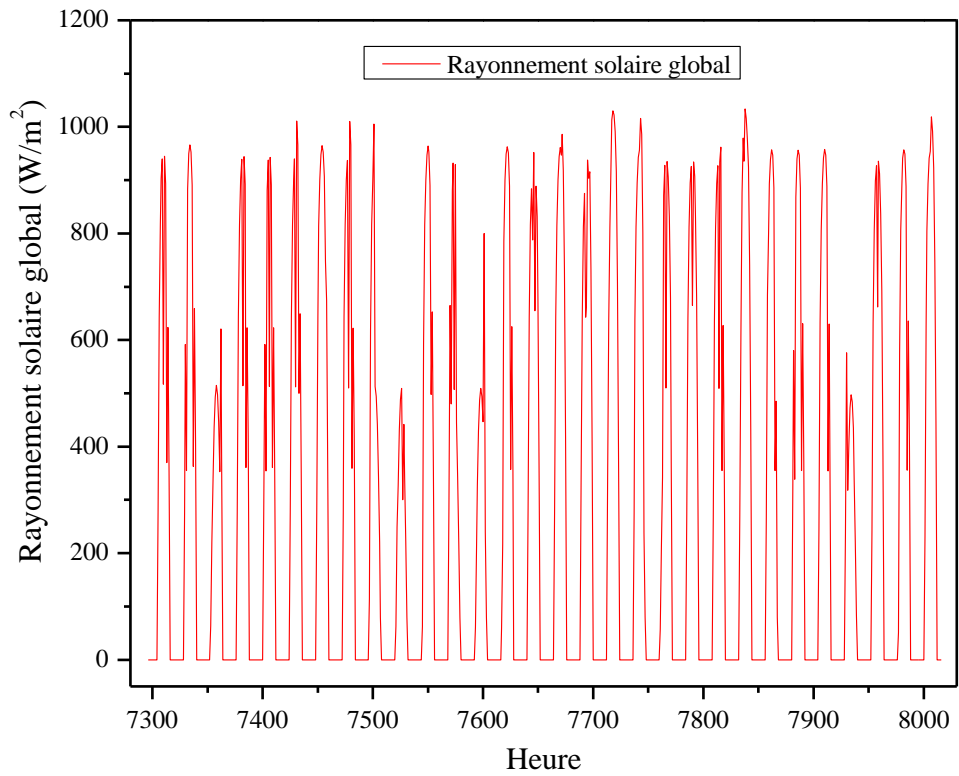
Equipement	Puissance (W)			Nombre										
	Nominale	Mesurée	En veille	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>
Ordinateur	203	60	2	3	2	4	1	1	1	1	3	0	2	1
Imprimante	570	54	2	0	1	2	1	1	1	1	2	0	2	1
Photocopieur	1450	120	14,2	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0

La Figure 4.4 illustre les données météorologiques du site pour la période du 1<sup>er</sup> au 31 novembre 2020. Sur cette figure, les évolutions horaires des paramètres de température et d'humidité de l'air et du rayonnement solaire global pendant le mois le plus chaud ont été présentées, soit le mois de novembre avec une température moyenne mensuelle de  $34,3 \pm 3^\circ\text{C}$ . Pour de telles

conditions climatiques, les données de température et d'humidité enregistrées dans les bureaux pendant les heures de fonctionnement (08h à 18h30 pour les jours ouvrables) sur toute la période de la surveillance sont présentées à la Figure 4.5. Ces illustrations ont été faites sur la base des moyennes journalières (uniquement pour les heures de fonctionnement) pour l'ensemble des bureaux surveillés et situés respectivement dans les ailes A (Figure 4.5a), B (Figure 4.5b) et dans la tour circulaire (Figure 4.5c).

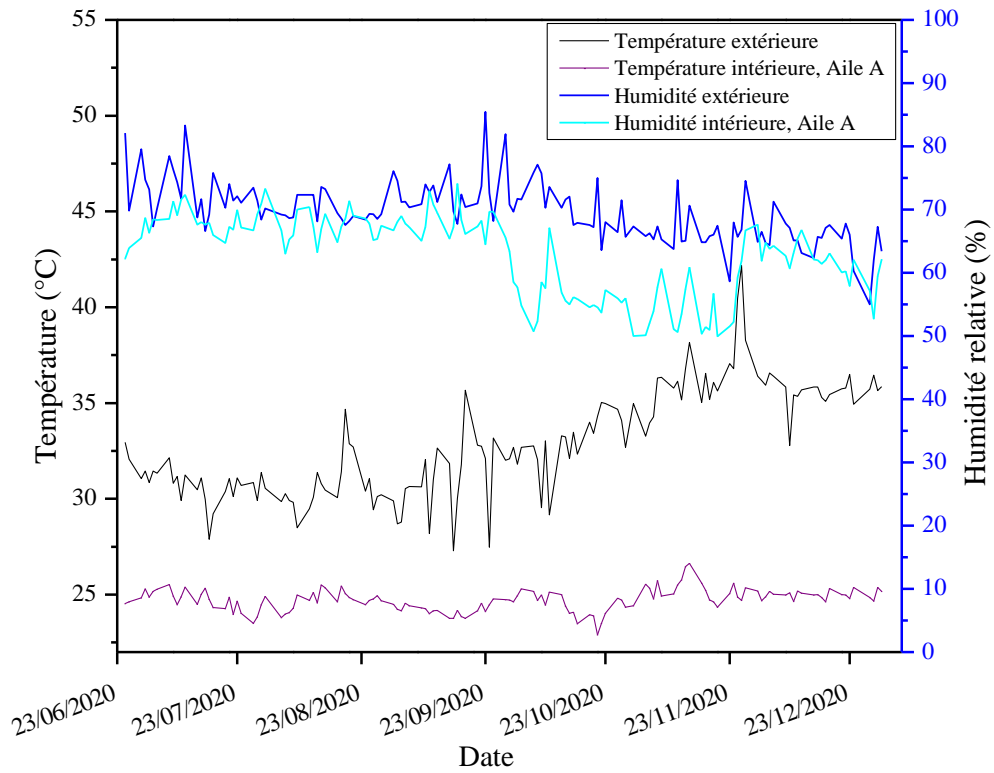


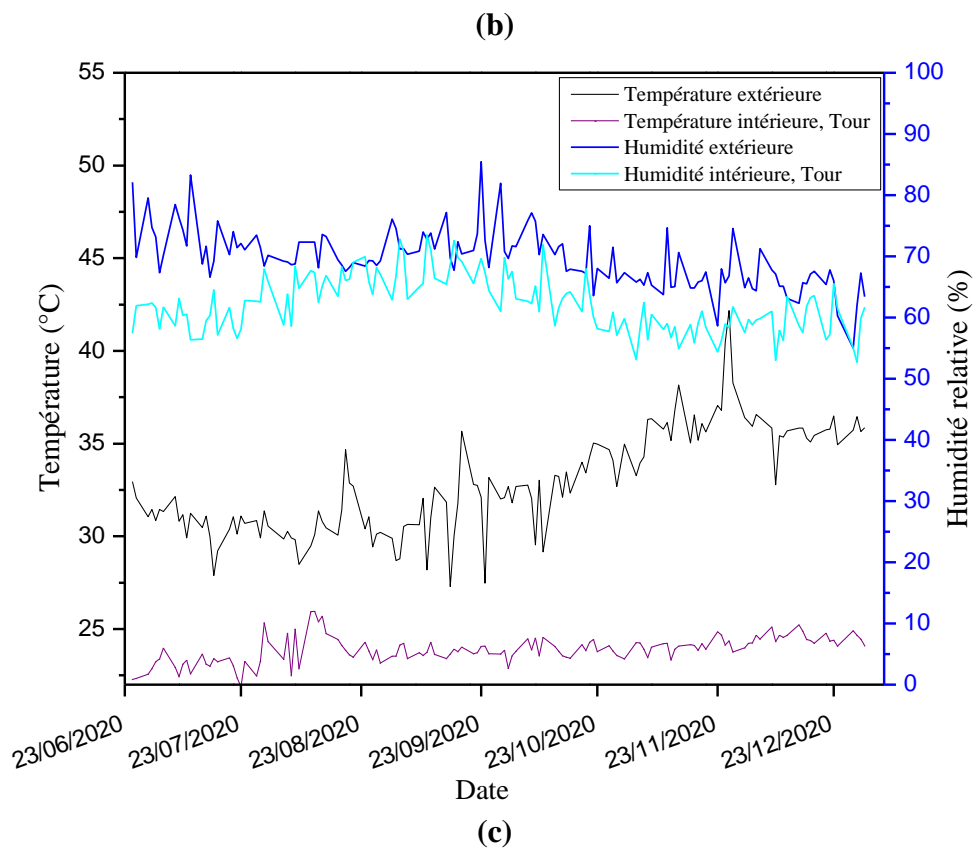
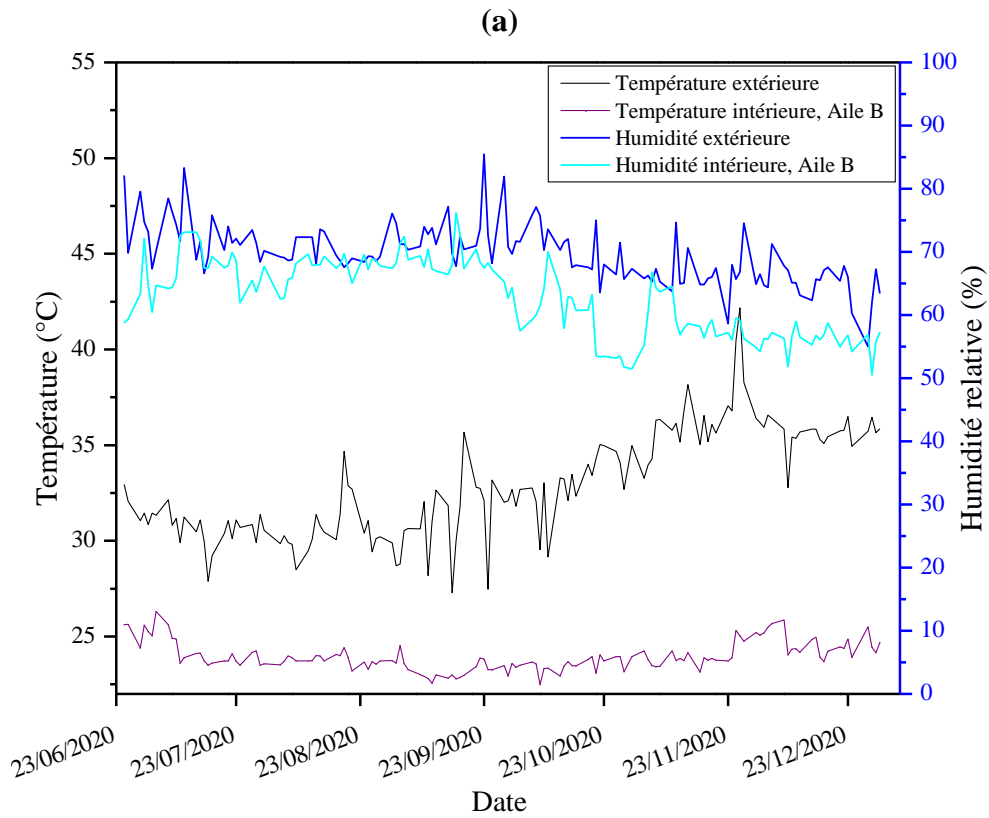




(b)

**Figure 4.4:** Evolution des paramètres météorologiques pendant le mois le plus chaud (novembre 2020) : (a) température et humidité de l'air extérieur ; (b) rayonnement solaire global





**Figure 4.5:** Conditions hygrothermiques des bureaux de (a) l'aile A ; (b) aile B ; (c) tour circulaire

## 4.2 Evaluation du confort thermique dans le bâtiment

### 4.2.1 Matériel et méthodes

#### ❖ Enquête de confort

L'évaluation du confort peut être effectuée suivant les méthodes statiques, adaptatives ou hybrides. Pour identifier la méthode la mieux adaptée à notre cas d'étude, une enquête de confort thermique a été initiée. Cette enquête vise à recueillir les ressentis thermiques réels des occupants vis-à-vis de leur environnement intérieur. Les votes de sensation thermique issus de cette enquête serviront non seulement de référence dans le choix du modèle de confort le mieux adapté, mais aussi au calcul de la température de confort avec les modèles de confort adaptatifs et hybride.

L'enquête réalisée dans ce cas d'étude est une enquête de niveau III selon la classification de Nicol & Humphreys (2002). Moujalled (2007) considère ce type d'enquête préférable pour explorer la qualité thermique d'un environnement, car il permet de collecter plus d'informations sur l'environnement thermique intérieur et sur les occupants. Un tel niveau d'enquête nécessite la mesure des six paramètres de base du confort, de même que la sensation thermique réelle des occupants à travers un vote suivant l'échelle d'ASHRAE (voir fiche d'enquête en annexe 1). Cette enquête a donc été réalisée auprès de 29 occupants répartis un peu partout dans le bâtiment. Les personnes enquêtées ont été retenues sur la base du volontariat sans aucune distinction de genre ni d'âge. Ainsi, 14 femmes et 15 hommes (Tableau 4.3) ont pris part à l'enquête qui s'est déroulée du 17 juin au 20 juillet 2019.

A cet effet, pendant environ 5 *minutes/jour*, les participants ont été invités à répondre à une série de questions réparties en quatre sections. La première section a examiné les données anthropométriques des répondants telles que le sexe, l'âge, la taille, le poids et l'état de santé (Tableau 4.3). Aucun problème de santé n'a d'ailleurs été identifié chez les participants à l'enquête. Dans la deuxième partie, la sensation thermique réelle des occupants par rapport à leur environnement thermique a été évaluée. Ainsi, des questions telles que : Quel est votre sensation actuelle vis-à-vis de votre environnement thermique ? Quelle est votre préférence thermique actuelle ? etc., ont été posées. Les réponses aux deux premières questions ont été enregistrées sur l'échelle à sept points d'ASHRAE présenté dans le Tableau 4.4. Quant à la troisième section, des informations sur le niveau d'activité et la tenue vestimentaire des occupants ont été demandées. Un tableau présentant différentes combinaisons de vêtements selon la norme ISO 7730 (2005) était proposé dans les questionnaires (voir le questionnaire en annexe 1.1). Le niveau vestimentaire de chaque participant a donc été estimé en fonction du choix effectué par chaque participant en tenant compte des vêtements portés. Enfin, dans la quatrième et dernière section, les répondants ont donné leur avis sur la maîtrise personnelle qu'ils ont de leur environnement thermique. Au total, 205 questionnaires ont été sélectionnés sur les 217 distribués ; les 12 questionnaires rejetés ont été mal remplis. Les questionnaires ont

été distribués aux occupants quotidiennement et de façon alternative entre le matin et l'après-midi.

Parallèlement aux questionnaires, les paramètres environnementaux des bureaux enquêtés ont été mesurés grâce aux capteurs de température et d'humidité EasyLog-USB et à un anémomètre (Figure 4.6b et Figure 4.6c). Ainsi, les données telles que la température de l'air, l'humidité et la vitesse de l'air ont été collectées dans chacun des bureaux enquêtés. Les mesures de température et d'humidité ont été effectuées en continu durant toute la période de l'enquête avec un pas de temps de 5 min. Dans les bureaux à usage personnel, le capteur est placé sur la table de travail du participant à bonne distance des potentielles sources de chaleur (ordinateur, imprimante, etc.) de sorte qu'elles ne compromettent pas la fiabilité des mesures effectuées. Par contre dans les pièces à occupation multiple, le capteur de température et d'humidité a été placé sur le bureau situé plus près du centre de la pièce. L'idéal aurait été d'installer un capteur par bureau pour mesurer la température, l'humidité et la vitesse de l'air. Cependant, compte tenu du nombre de capteurs disponibles et du nombre de bureaux à surveiller, l'ambiance de chaque local a été considérée comme homogène. Ce choix a été fait sur la base d'une recommandation de la norme ISO 7726 qui stipule que : « *Un environnement peut être considéré comme "homogène" du point de vue bioclimatique si, à un moment donné, la température de l'air, le rayonnement, la vitesse de l'air et l'humidité peuvent être considérés comme pratiquement uniformes autour du sujet, c'est-à-dire lorsque les écarts entre chacune de ces grandeurs et leur valeur spatiale moyenne calculée comme moyenne des localisations ne dépassent pas les valeurs obtenues en multipliant la précision de mesure requise du tableau 2 par le facteur X correspondant figurant dans le tableau 4* » (tableaux à consulter en annexe 1.2).

Ainsi, avant les enquêtes, pour les bureaux à occupation multiple, des capteurs de température et d'humidité ont été placés dans chaque bureau. Le capteur placé sur le bureau le plus proche du centre de la pièce a été considéré comme le capteur principal. Les mesures de température et d'humidité ont été effectuées sur une journée de travail. Les écarts obtenus entre les données mesurées sur chaque bureau et celles mesurées par le capteur principal étaient de l'ordre de 1,5°C et 0,2 kPa. Or, en référence à la norme ISO 7726, les écarts à ne pas dépasser sont respectivement de 1,5°C pour les températures et de 0,3 kPa (voir tableaux 2 et 4 en annexes 1.2). Quant à la vitesse de l'air, des mesures ponctuelles ont été effectuées et l'écart moyen obtenu est de 0,1 m/s contre un écart de 0,22 m/s selon la norme ISO 7726. Aussi, chaque bureau étant équipé de stores toujours fermés, l'effet du rayonnement solaire a été négligé. Cela étant, dans chacun des bureaux à occupation multiple, le capteur de température et d'humidité a été placé sur le bureau considéré comme le plus proche du centre du local.

**Tableau 4.3:** Informations sur les participants

Genre	Nombre	Age	Taille (cm)	Poids (kg)	Métabolisme (met)	Vêtture ( $I_{cl}$ )
Femme	14	[23 – 47]	[155 – 170]	[50 – 98]	1,2	[0,5 – 0,7]
Homme	15	[26 – 47]	[166 – 178]	[61 – 85]	1,2	[0,75 – 0,85]

**Tableau 4.4:** Echelle à sept points de l'ASHRAE

ASHRAE	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Sensation thermique	Froid	Frais	Légèrement frais	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
Préférence thermique			Légèrement plus froid	Pas de changement	Légèrement plus chaud		



**Figure 4.6:** (a) Vue d'ensemble d'un bureau collectif ; (b) Capteur de température et d'humidité ; (c) Anémomètre

**Tableau 4.5:** Spécifications techniques des instruments

Paramètre mesuré	Appareil	Précision	Résolution interne	Plage de mesure
Température de l'air (°C)	EasyLog USB 2+	$\pm 0,55^{\circ}\text{C}$	0,5°C	$[-35^{\circ}\text{C}; 80^{\circ}\text{C}]$
Humidité relative (%)	EasyLog USB 2+	$\pm 0,5\%$	0,5%RH	$[0\%; 100\%]$
Vitesse de l'air (m/s)	Anémomètre digital	$\pm 2\% + 1\text{d}$	0,1m/s	$[0,2 \text{ m/s}; 20 \text{ m/s}]$

#### ❖ Modèles d'évaluation du confort thermique

Le choix du modèle le plus représentatif du ressenti thermique réel des occupants a été fait en appliquant les modèles énumérés dans la revue de littérature à notre cas d'étude. Pour les modèles statiques, seul le célèbre modèle PMV-PPD de Fanger a été utilisé. Son application a été effective grâce au calculateur en ligne du Center for the Built Environment (CBE) (Hoyt et al., 2014). Les données mesurées au cours de l'enquête de confort et utile au calcul de PMV-PPD ont été renseignées dans le calculateur numérique afin de déterminer les indices de Fanger correspondants. En revanche, pour l'approche adaptative, jugée plus réaliste par de nombreux

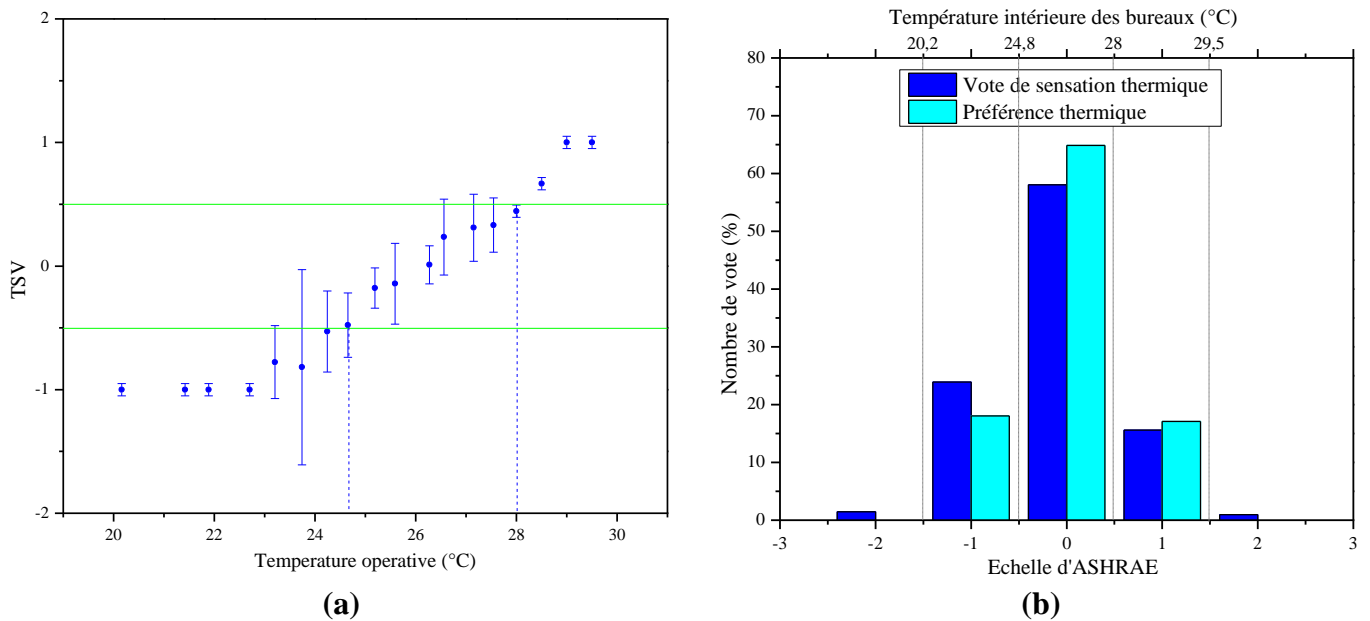
auteurs, tous les modèles identifiés pour les bâtiments climatisés ont été testés. Il en est de même pour les modèles hybrides à l'exception du CPMV qui est principalement destiné aux bâtiments à enveloppe vitrée. Malgré la surface de vitrage non négligeable sur l'enveloppe du bâtiment de référence (38%), il faut souligner que tous les bureaux enquêtés disposent de stores restés fermés tout au long de l'enquête, empêchant ainsi la transmission directe de rayonnement solaire à l'ambiance étudiée.

## 4.2.2 Résultats

### ❖ Résultats de l'enquête de confort

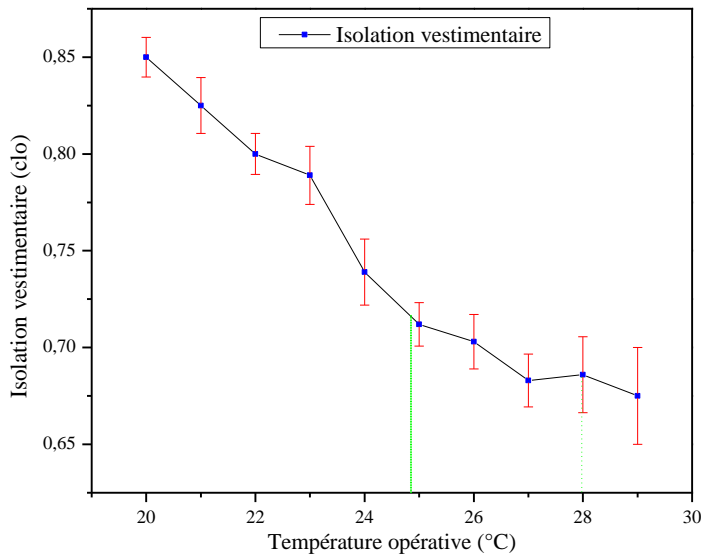
La Figure 4.7a illustre les votes de sensation thermique des occupants en fonction des températures moyennes de fonctionnement des bureaux regroupés par amplitude de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . En référence au travail de Chen et al. (2020), la même plage de confort « acceptable » que celle de Fanger a été retenue pour le vote de sensation thermique soit  $[-0,5 ; 0,5]$ . Ainsi, la température de confort des occupants se situe entre  $[24,8^{\circ}\text{C} ; 28^{\circ}\text{C}]$  (Figure 4.7). Dans cet intervalle, 58% des réponses recueillies qualifient l'environnement thermique confortable (Thermal Sensation Vote : TSV = 0). En deçà, dans l'intervalle  $[20,2^{\circ}\text{C} ; 24,8^{\circ}\text{C}]$ , 1,46% des réponses recueillies jugent l'ambiance froide (TSV = -2) et 23,9% légèrement froide (TSV = -1). Entre  $[28^{\circ}\text{C} ; 29,5^{\circ}\text{C}]$ , 15,61% des réponses expriment une sensation de légère chaleur contre 1% de sensation chaude. Il a également été remarqué que pendant les heures de remplissage des questionnaires, l'humidité des ambiances était comprise entre  $[46\% ; 70\%]$ . Or selon la norme (ISO 7730, 2005), une humidité intérieure comprise entre 30 et 70% n'affecte pas le confort thermique des occupants. Ce qui justifie le peu d'intérêt porté à l'humidité dans l'analyse de nos résultats.

En outre, il faut noter qu'un vote de sensation thermique nulle (TSV = 0) n'exprime pas toujours le confort thermique de l'occupant. Cela signifie juste que l'occupant ne ressent aucune sensation de fraîcheur ou de chaleur vis-à-vis de son environnement ; ce qui se traduit par la neutralité thermique de l'occupant. Pour autant, certaines personnes expriment leur confort dans des ambiances légèrement froides ou chaudes. Pour cela, lors des enquêtes de confort thermiques, il est souhaitable, en plus du vote de sensation thermique, de recueillir la préférence thermique des occupants. Dans le présent cas d'étude, la préférence thermique des répondants est présentée à la Figure 4.7b. Ainsi, 64,87% des répondants préfèrent un environnement de confort tel que défini par l'intervalle de neutralité thermique  $[24,8^{\circ}\text{C} ; 28^{\circ}\text{C}]$ . Par ailleurs, 18% préfèrent un environnement légèrement plus froid que la zone de confort, contre 17,1% pour un environnement légèrement plus chaud. En tout, environ 82% des répondants préfèrent une ambiance intérieure avec une température  $\geq 24,8^{\circ}\text{C}$ , qui est supérieure aux  $24,5^{\circ}\text{C}$  recommandée par le code d'efficacité énergétique des bâtiments au Bénin (Direction Générale de l'Energie Bénin & ECONOLER, 2011). Cette plage de confort correspond à un niveau d'activité de 1,2 *met* (travail de bureau) et une isolation vestimentaire comprise entre  $0,69 \pm 0,02$  clo et  $0,73 \pm 0,01$  clo. Il a également été remarqué que les personnes souhaitant un environnement légèrement plus froid ont un niveau d'habillement moyen  $\geq 0,75$  clo.

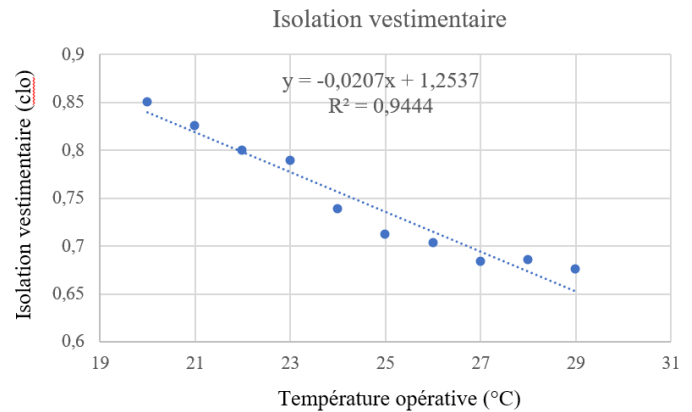


**Figure 4.7:** (a) Vote de sensation thermique en fonction de la température opérative ; (b) Répartition du vote sensation thermique et préférence thermique des occupants

Par ailleurs, la Figure 4.8a présente la distribution du niveau d'habillement des personnes enquêtées par rapport aux températures intérieures mesurées. On peut y observer une évolution du niveau d'habillement au fur et à mesure que la température des locaux diminue. La régression linéaire de ce nuage de points permet d'affirmer que les occupants s'habillent en fonction de la température intérieure de leur bureau ( $R^2 = 0,94$ ). Cette hypothèse mathématique a été confirmée par les personnes enquêtées qui affirment s'habiller en fonction de l'environnement thermique de leur lieu de travail. Cette affirmation est encore plus vraie dans les pièces à occupation multiple où les occupants ont un niveau d'habillement relativement plus élevé. Dans ces pièces, la température de consigne des systèmes de climatisation est généralement plus basse afin de satisfaire les exigences thermiques de certaines personnes. Ce qui amène les autres occupants à s'adapter à l'ambiance en augmentant leur niveau de vêtiture. Cela n'est pas le cas dans les bureaux personnels où l'occupant a le loisir de régler la température de consigne selon son ressenti thermique et son niveau d'habillement. L'isolation vestimentaire moyenne mesurée dans les bureaux à occupation multiple est de  $0,81 clo$  contre une isolation moyenne globale de  $0,74 clo$ . Selon la norme ISO 7730 (2005), une isolation vestimentaire maximale de  $0,75 clo$  peut être jugée adéquate pour les activités de bureau. Cette valeur correspond à un ensemble vestimentaire composé de caleçon, pantalon, chemise, chaussette et chaussure. En appliquant un tel niveau d'habillement, les températures de fonctionnement des ambiances fortement climatisées peuvent augmenter de 2 à 3°C. Ce qui aura pour avantage de réduire la consommation énergétique du bâtiment tout en maintenant le confort thermique des occupants.



(a)



(b)

**Figure 4.8:** (a) Résistance vestimentaire des occupants en fonction de la température intérieure ; (b) Courbe de régression

#### ❖ Choix d'un modèle de confort

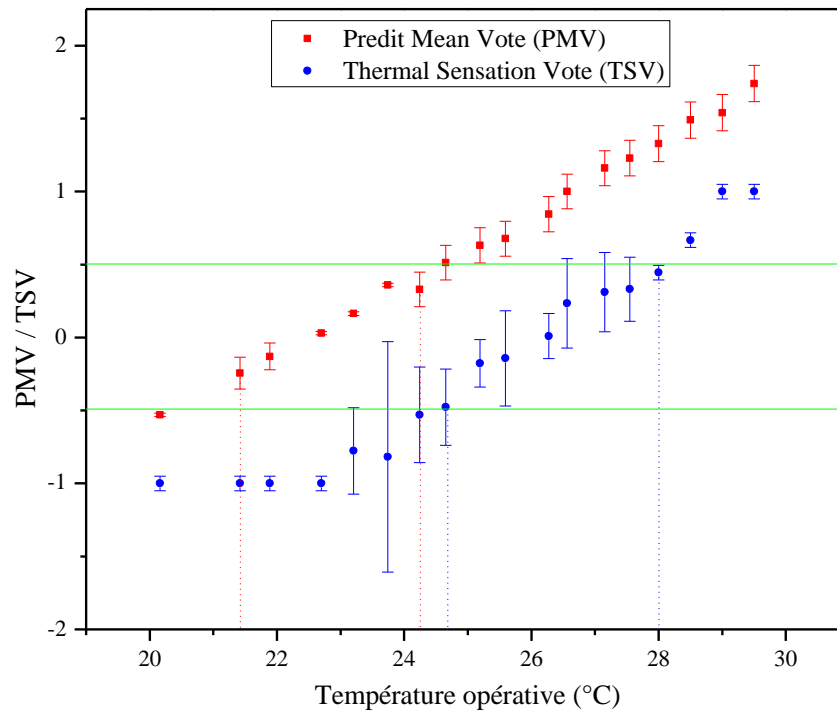
##### ▪ *Modèle statique*

Les résultats issus de l'application du modèle PMV sont illustrés à la Figure 4.9. Ce graphe sert d'élément de comparaison entre les résultats du PMV et ceux du TSV. L'utilisation du modèle de Fanger (PMV) donne un intervalle de température de confort de  $[21,5^{\circ}\text{C} ; 24,3^{\circ}\text{C}]$  ; ce qui est non conforme à l'intervalle de confort défini par les occupants  $[24,8^{\circ}\text{C} ; 28^{\circ}\text{C}]$ . Autrement dit, le modèle de PMV de Fanger a tendance à sous-estimer la capacité d'adaptation des personnes enquêtées à des températures de fonctionnement relativement élevées. Cette observation rejoint celles faites par Olissan et al. (2016). Selon les auteurs, le PMV n'est pas approprié pour l'évaluation du confort thermique intérieur dans les régions chaudes. Utiliser ce modèle pour la prédiction du confort thermique dans notre cas d'étude reviendrait donc à abaisser le point de consigne des systèmes de climatisation dans les bureaux. Cela aura pour conséquence de créer une ambiance thermique inconfortable et une augmentation inutile de la consommation énergétique du bâtiment. Tout ceci témoigne de l'incapacité du modèle de Fanger à prédire le confort thermique dans notre contexte d'étude.

Il faut cependant souligner que les incertitudes associées à ces valeurs ont été estimées en utilisant la méthode développée dans le Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) (JCGM, 2008). Ce guide recommande la combinaison des incertitudes de type A (liées aux statistiques) et des incertitudes de type B (liées à l'équipement et aux autres sources qui influencent la mesure). Ainsi, les incertitudes relatives au PMV, ont été obtenues en composant les incertitudes résultant de l'intervalle de confiance calculé selon la loi de Student et de la



précision des capteurs utilisés pour la mesure des variables environnementales. En fait, l'équilibre réalisé entre les sources d'influence et le modèle mathématique de Fanger pour le calcul de la PMV nous a permis d'appliquer la loi de propagation composée des incertitudes de mesure avec des variables corrélées, développée dans le GUM (JCGM, 2008) et utilisée par Can Ekici dans son étude sur le 'Measurement Uncertainty Budget of the PMV Thermal Comfort Equation' (Ekici, 2016).



**Figure 4.9:** Evolution du PMV et du TSV en fonction de la température de fonctionnement prédite

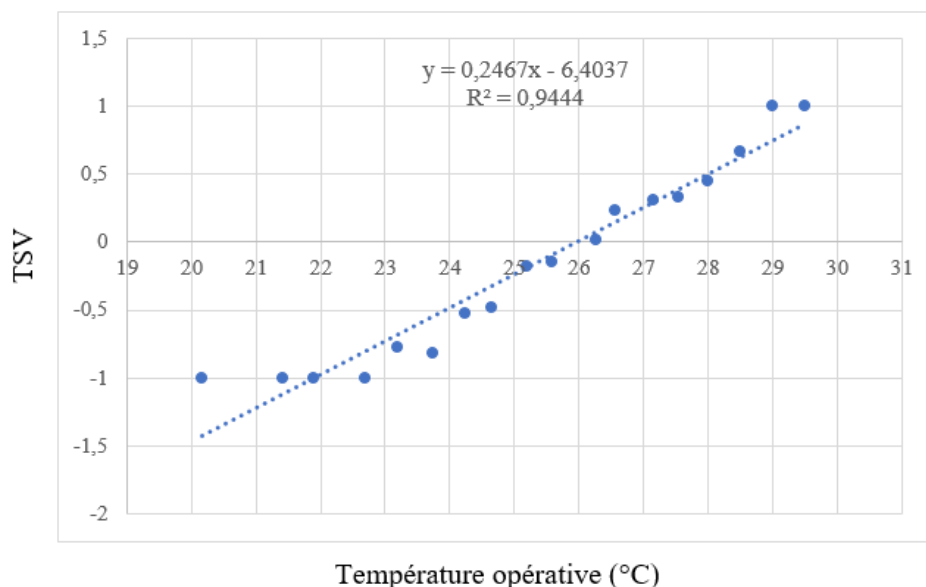
▪ **Modèles adaptatifs**

Le Tableau 4.6 présente les résultats de l'application des modèles de confort adaptatifs (ACM : Adaptive Comfort Model) destinés aux bâtiments climatisés et précédemment présentés dans le Tableau 1.6. Les températures de confort obtenues avec les modèles adaptatifs varient de 23,8°C à 26,1°C. A l'exception du modèle d'Indraganti & Boussaa (2018), toutes les autres températures de confort adaptatif appartiennent à la plage de confort définie par les occupants. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle d'Indraganti et Boussaa ait été développé pour la région de Doha au Qatar où cohabitent le climat chaud – désertique et le climat chaud – humide. Ce qui n'est pas le cas de la ville de Cotonou où règne généralement un climat chaud et humide tout au long de l'année.

Pour des raisons de comparaison, la température de confort des personnes enquêtées a également été déterminée. Elle a été obtenue par régression linéaire entre la température opérative des bureaux et le vote de sensation thermique des occupants en déterminant

l'intersection entre la droite de régression et l'axe des températures tracé au point  $TSV = 0$  (Figure 4.10). La température de confort ainsi trouvée est égale à  $26^{\circ}C$ . Dans ce cas de figure, la température de confort a été assimilée à la température de neutralité obtenue avec les votes de sensation nuls ( $TSV = 0$ ). Ce choix s'explique par le fait qu'environ 90% des votes de sensation nuls jugent l'environnement confortable. Aussi, en appliquant la moyenne pondérée des températures de fonctionnement des bureaux correspondant aux votes de sensation thermique nuls ( $TSV = 0$ ), la température de confort est égale à  $26,1 \pm 0,5^{\circ}C$  avec un niveau de confiance de 95% selon la loi normale. Par ailleurs, l'application du test t de Student sur les températures de confort obtenues avec les cinq ACM a permis de mettre en évidence les modèles de López-Pérez et al. (2019) et d'Indraganti et al. (2014) (Tableau 4.6). En effet, ces deux modèles donnent des températures de confort statistiquement égales à la température moyenne neutre avec des probabilités critiques supérieures au niveau de signification du test utilisé (0,05). Par contre, les modèles d'Indraganti & Boussaa (2018), du CISBE (2006) et de Humphreys & Nicol (1998) donnent des températures de confort statistiquement différentes de la température neutre avec des risques inférieurs à  $2,2e-14\%$  (Tableau 4.6).

En plus des analyses statistiques, une similitude peut être observée entre les conditions climatiques des régions où les deux modèles choisis ont été développés et la région où la présente étude a été réalisée (Cotonou). En effet, les modèles adaptatifs de López-Pérez et al. et d'Indraganti et al. ont été conçus respectivement pour Mexico et le Sud de l'Inde, qui sont soumis à un climat chaud et humide tout comme Cotonou. Cela permet d'affirmer que l'historique thermique des participants à l'enquête a une grande influence sur leur sensation thermique, contrairement aux valeurs culturelles étant donné que les peuples de ces trois régions ne partagent pas les mêmes cultures.



**Figure 4.10:** Détermination de la température de confort par régression linéaire

**Tableau 4.6:** Analyse statistique de l'ACM

Modèles	(López-Pérez et al., 2019)	(Indraganti & Boussaa, 2018)	(Indraganti et al., 2014)	(CISBE, 2006)	(Michael A. Humphreys & Nicol, 1998)	Référence
Température de confort (°C)	26,1	23,8	26	25	25,1	26,1 ± 0,5
Probabilité critique du test t-Student	0,7688	$p - valeur < 2,2e - 16$	0,141	$p - valeur < 2,2e - 16$	$p - valeur < 2,2e - 16$	

- **Modèles hybrides**

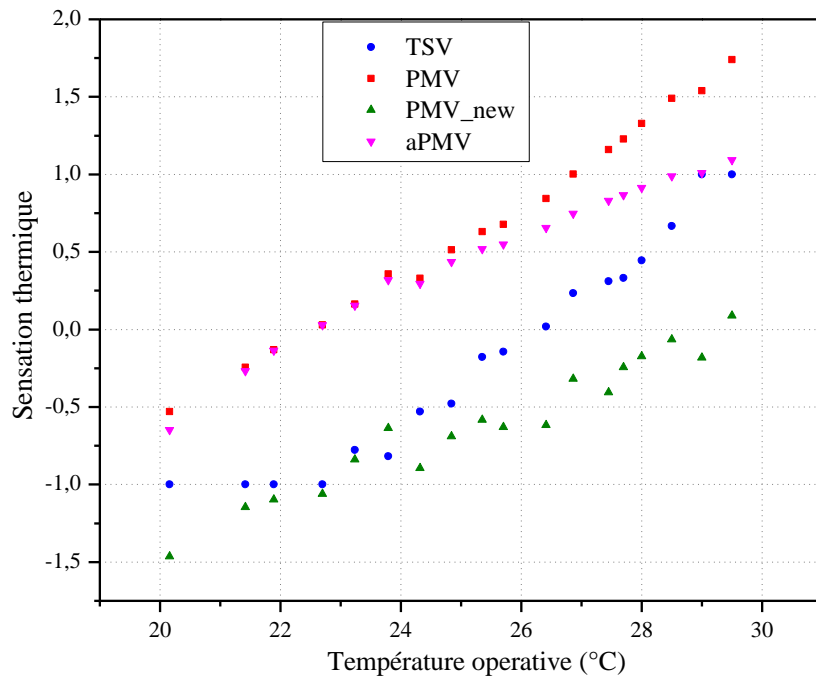
L'évaluation du confort thermique avec des modèles hybrides permet de prendre en compte un plus grand nombre de paramètres que les modèles statiques et adaptatifs. La combinaison des paramètres environnementaux (température, humidité relative et vitesse de l'air, température radiante) et des votes de sensation thermique est un atout dans la recherche d'une estimation plus précise du confort thermique. Cependant, leur application systématique pour l'évaluation du confort ne garantit pas des résultats fiables. Pour preuve, l'adoption de PMV adaptatifs pour l'évaluation du confort dans notre étude ne reflète pas la réalité de la sensation thermique des occupants (Figure 4.11).

La Figure 4.11 présente les résultats obtenus avec les modèles adaptatifs de Yao et al. (2009) ( $aPMV$ ) et d'Olissan et al. (2016) ( $PMV_{new}$ ). Les  $aPMV$  ont été calculés avec un coefficient d'adaptation  $\lambda_a = 0,34$ . Cette valeur a été obtenue par application de l'équation (4.1) sur les votes de sensation thermique des occupants. Les résultats obtenus avec ce modèle montrent une très faible variation entre l' $aPMV$  et les  $PMVs$  pour les sensations thermiques inférieures à 0,5, l'écartant ainsi du vote de sensation thermique des occupants. Au-dessus de cette valeur, on observe un rapprochement progressif entre les  $aPMV$  et les votes de sensation thermique ( $TSV$ ). Cela peut s'expliquer par le fait que  $aPMV$  a principalement développé pour les bâtiments à ventilation naturelle dans lesquelles les températures de fonctionnement sont relativement plus élevées que dans les bâtiments climatisés. Cependant, Chen et al. (2020) ont obtenu de bons résultats en évaluant le confort thermique dans les résidences à fonctionnement mixte avec l' $aPMV$ , ce qui justifie la capacité du modèle à évaluer avec une meilleure précision le ressenti thermique réel des occupants à partir d'une température de fonctionnement de 29°C dans le bâtiment étudié.

Les résultats du modèle  $PMV_{new}$  ont été obtenus sur la base des coefficients de régression du facteur de correction défini par les auteurs pour la bande côtière du sud du Bénin. A cet effet, l'équation (4.1) devient :

$$PMV_{new} = PMV - (0,13T_a - 0,032RH) \quad (4.1)$$

A l'intérieur de l'intervalle  $[-1 ; -0,5]$ , le  $PMV_{new}$  exprime plus ou moins bien le sentiment réel des occupants. Au-delà de cet intervalle, le  $PMV_{new}$  surestime la capacité des occupants à s'adapter à des températures de fonctionnement élevées. Avec ce modèle, la plage de confort thermique est de  $26,8^{\circ}\text{C}$  à près de  $30^{\circ}\text{C}$  pour des votes de sensation thermique compris entre  $[-0,5 ; 0,5]$ . Au vu des résultats obtenus, l'équation (4.1) du  $PMV_{new}$  semble inadaptée pour l'évaluation du confort thermique dans notre étude de cas. Pour cela, il a alors été décidé de déterminer les coefficients de régression à partir des données issues de notre propre enquête en suivant le principe de développement de  $PMV_{new}$ .



**Figure 4.11:** TSV, PMV,  $PMV_{new}$ , aPMV en fonction de la température de fonctionnement

#### *Adaptation de $PMV_{new}$ à notre étude de cas*

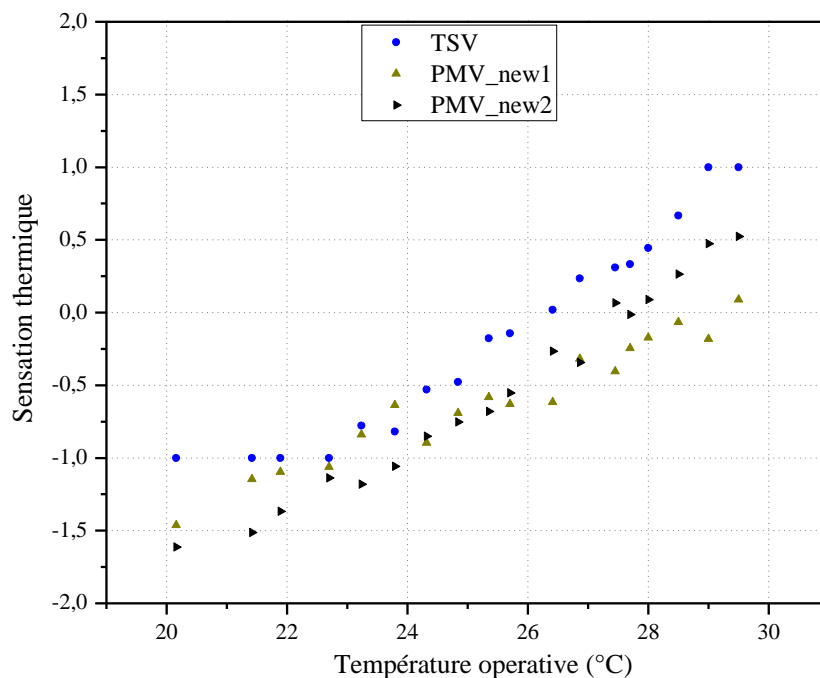
Le principe du  $PMV_{new}$  consiste à effectuer une régression multilinéaire entre  $\Delta PMV$  ( $\Delta PMV = PMV - TSV$ ) et les deux variables explicatives que sont la température et l'humidité intérieures. Ainsi, l'équation (4.2) a été appliquée à la présente étude de cas et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 4.12.

$$PMV_{new} = PMV - (0,054T_a + 0,041RH) \quad (4.2)$$

Le test de signification globale de Fisher sur cette régression donne une probabilité ( $p = 0,04136$ ) inférieure à  $0,05$ . Le modèle est donc globalement significatif. Parallèlement, selon le test de significativité des paramètres (t-Student), seule la probabilité t-student de la constante ( $p = 0,4261$ ) est supérieure à  $0,05$ . Cette constante n'est donc pas significative et sera

considérée comme nulle dans le modèle. Par ailleurs, la valeur du coefficient de détermination ( $R^2 = 0,3656$ ) suggère que la régression n'est pas idéalement ajustée entre les variables  $\Delta PMV$ ,  $T_a$  et  $RH$ . Cela peut s'expliquer par la petite taille de l'échantillon considéré dans cette étude. Dans ce cas d'étude, l'écart ( $\Delta PMV$ ) observé entre les votes de sensation thermique des occupants et le modèle  $PMV$  de Fanger ne peut que se justifier par les paramètres environnementaux que sont les températures et humidités intérieures des bureaux.

La Figure 4.12 met en évidence la similitude entre les résultats de  $PMV_{new\_2}$  adaptée à notre étude et le vote de la sensation thermique des occupants. L'écart moyen entre le vote de sensation thermique des occupants et les résultats de l'équation (4.2) est égal à 0,38 contre 0,47 lorsque l'équation (4.1) est utilisée.



**Figure 4.12:** TSV,  $PMV_{new\_1}$ ,  $PMV_{new\_2}$  en fonction de la température de fonctionnement

## Conclusion

Les travaux de terrain présentés dans ce chapitre concernent le monitoring du bâtiment d'étude. Il s'agit du bâtiment de la direction générale de la Caisse Nationale de Sécurité Sociale (CNSS) du Bénin. Les activités de surveillance ont duré six (6) mois et ont permis la collecte des données météorologiques du site, des conditions hygrothermiques de fonctionnement des bureaux et des consommations énergétiques des équipements de bureaux. Toutes ces informations ont été récoltées pour faciliter la calibration des modèles de simulation en vue de l'évaluation des performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes en argile – paille de chiendent.

Parallèlement à cette campagne de monitoring, une enquête de confort a été réalisée auprès des occupants du bâtiment, l'objectif étant d'évaluer les performances des enveloppes en argile –

paille de chiendent sur la base des conditions de confort hygrothermique réellement souhaitées par les occupants et non sur la base des données de la littérature. L'enquête a duré deux semaines et a permis de récolter 205 réponses auprès de 29 participants volontaires. Les résultats de l'enquête ont révélé que la température de confort souhaitée par les occupants était de  $26,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  au lieu des  $24,5^{\circ}\text{C}$  recommandée par le code d'efficacité énergétique du Bénin dans les bâtiments de bureaux. Le modèle de confort prédisant le mieux la température de confort des occupants est le modèle adaptatif d'Indraganti et al. (2014). Avec ce modèle, la température de confort obtenue est  $26^{\circ}\text{C}$ . Dans le même temps, le modèle *PMV/PPD* de Fanger prédisait une sensation légèrement chaude à une telle température, de même que le modèle de confort (hybride) *aPMV* de Yao et al. (2009). Le modèle hybride d'Olissan et al. (2016) (*PMV<sub>new</sub>*) quant à lui a prédit une sensation thermique légèrement froide.

# CHAPITRE 5

## Performances hygrothermique et énergétique des enveloppes en argile – paille de chiendent

---

### Sommaire

Introduction .....	127
5.1 Description de l’approche de simulation des performances des enveloppes en argile – paille de chiendent .....	127
5.2 Optimisation des paramètres thermo-physiques de l’enveloppe conventionnelle...	128
5.3 Evaluation de la performance hygrothermique de l’enveloppe en argile – paille de chiendent.....	134
Conclusion.....	152

## **5. PERFORMANCE HYGROTHERMIQUE ET ENERGETIQUE DES ENVELOPPES EN ARGILE – PAILLE DE CHIENDENT**

---

### **Introduction**

La performance énergétique des enveloppes hygroscopiques dépend du couplage des transferts de chaleur et d'humidité en leur sein. La nature non linéaire du couplage de ces deux types de transfert rend la modélisation analytique du phénomène délicate et très complexe. Pour résoudre ce problème, des outils de simulation prenant en compte les modèles de transferts HAM (Heat Air and Moisture) ont été développés. Sur la base de ces outils, ce chapitre se consacre à l'évaluation des performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes en argile – paille de chiendent.

Pour commencer, une brève description du mécanisme de transfert couplé de chaleur et masse à travers les parois hygroscopiques a été réalisée. Les principales lois gouvernant ce phénomène ont également été énoncées. Par la suite, les principaux outils de simulation généralement utilisés dans la littérature pour étudier ce mode de transfert ont été passés en revue. Ainsi, l'outil de simulation le mieux adapté au contexte de cette étude a été identifié. Pour finir, les performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes en argile – paille de chiendent par rapport à l'enveloppe conventionnelle du bâtiment d'étude ont été évaluées et analysées à travers différents scénarios.

### **5.1 Description de l'approche de simulation des performances des enveloppes en argile – paille de chiendent**

Pour évaluer la performance énergétique des BTC en argile – paille de chiendent par rapport aux matériaux de construction conventionnels utilisés au Bénin, un bâtiment de bureau a été choisi. Comme décrit dans le chapitre précédent, il s'agit d'un immeuble construit en matériaux conventionnels et dont l'enveloppe (en maçonnerie carrelée) servira d'élément de comparaison avec l'enveloppe en argile – paille de chiendent proposée dans cette étude. Pour se faire, une série de simulations seront réalisées avec les logiciels TRNSYS et WUFI. Dans un premier temps, TRNSYS sera utilisé pour estimer les propriétés thermo-physiques (masse volumique, conductivité thermique et capacité thermique) optimales de l'enveloppe conventionnelle. En adoptant la méthode inverse, les données récoltées lors du monitoring du bâtiment d'étude (données météorologiques) et celles issues de la littérature (propriétés thermo-physique de l'enveloppe) seront utilisées pour simuler les conditions hygrothermiques dans l'un des bureaux surveillés. Une calibration, basée sur les paramètres de confort telle qu'effectuée par Nguyen & Reiter (2012) et Perneti et al. (2013) sera entreprise pour ajuster au mieux les résultats de simulation aux données thermiques internes mesurées. Ainsi, des ajustements seront notamment effectués sur les paramètres d'entrée liées à l'enveloppe du bâtiment jusqu'à l'obtention de valeurs optimales correspondant à des résultats de simulation de la température intérieure proches des valeurs mesurées dans le bâtiment d'étude. Ensuite, les paramètres physico-thermiques de l'enveloppe issus de cette calibration et les propriétés hygrothermiques des BTC en argile – paille de chiendent déterminées expérimentalement seront utilisés pour



simuler les performances énergétiques des deux enveloppes avec le logiciel WUFI. Cela est d'autant plus important lors de l'évaluation de la performance hygrothermique d'une enveloppe hygroscopique telle que celle en argile – paille de chiendent. En revanche, pour les enveloppes très peu hygroscopiques comme celle du bâtiment d'étude, TRNSYS donne de bons résultats. D'où son utilisation pour l'estimation des valeurs optimales des propriétés thermo-physiques de l'enveloppe en maçonnerie carrelée.

## **5.2 Optimisation des paramètres thermo-physiques de l'enveloppe conventionnelle**

Selon Coelho et al. (2018), la précision des résultats de simulation énergétique des bâtiments peut être remise en cause en raison des incertitudes liées aux propriétés hygrothermiques de leur enveloppe. Les valeurs les plus fiables sont celles mesurées expérimentalement. Or, ces expérimentations sont pour la plupart part des cas destructifs pour des bâtiments existants. Cette difficulté peut être contournée en utilisant des données issues de la littérature pour des matériaux de construction similaires. Cependant, cette approche génère des incertitudes par rapport aux valeurs choisies étant donné que les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment étudié n'ont pas forcément la même composition et encore moins le même âge. Ainsi, pour minimiser ces incertitudes, des simulations TRNSYS calibrées ont été réalisées sur l'un des bureaux surveillés pendant la campagne de surveillance du bâtiment d'étude. Cette stratégie vise à déterminer les propriétés thermo-physiques optimales de l'enveloppe après calibration des résultats de simulation obtenus sur la base de variables d'entrée thermo-physiques de l'enveloppe issues de la littérature.

A cet effet, le local aléatoirement retenu est un bureau à occupation multiple situé au 7<sup>ème</sup> étage du bâtiment d'étude. Il s'étend sur une superficie de 40,4 m<sup>2</sup> et se compose de 4 parois verticales dont seule la façade en contact avec le milieu extérieur et orientée vers le nord est en maçonnerie carrelée (Figure 5.1a) avec une surface en simple vitrage portée par un cadre en aluminium. Les trois autres parois, dont deux en contact avec deux autres bureaux et la troisième avec un couloir, sont réalisées en maçonnerie simple (Figure 5.1b). La porte d'accès donnant sur le couloir est en bois d'épaisseur 4 cm. La toiture est en dalle de béton armé recouvert à l'extérieur par un revêtement d'étanchéité. La composition et les caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe sont présentées dans le Tableau 5.1.

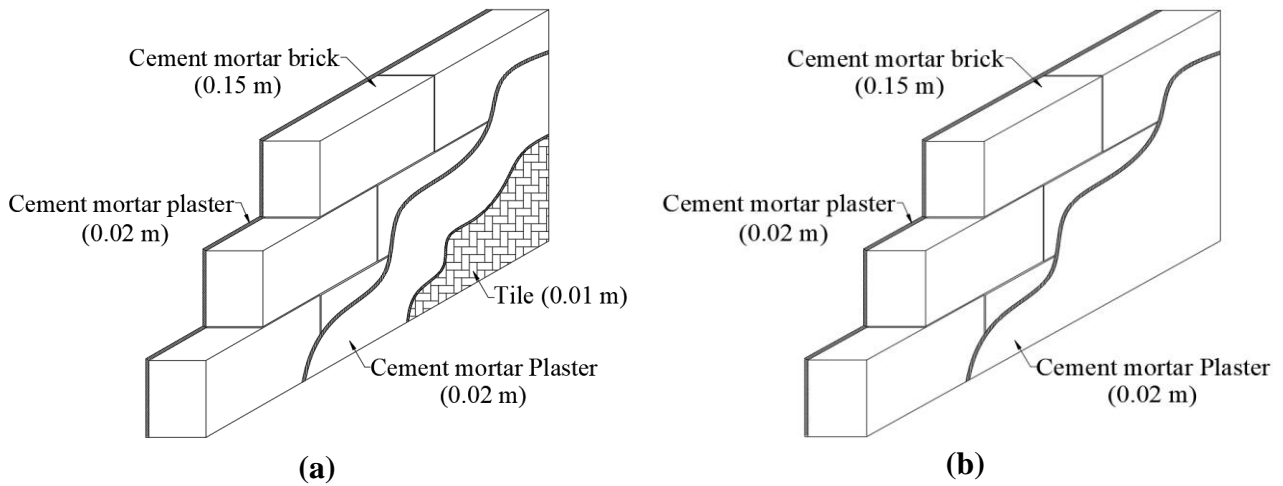


Figure 5.1: Composition des parois, (a) externes ; (b) internes

Tableau 5.1: Propriétés thermo-physiques des différentes couches composants les parois du bureau

Matériau	Epaisseur (m)	Masse volumique ( $kg/m^3$ )	Conductivité thermique ( $W/m.K$ )	Chaleur spécifique ( $J/kg.K$ )	Source
<b>1) Paroi interne</b>					
Enduit de mortier de ciment	0,02	1650	0,72	840	(Conductivité thermique des matériaux ( $\lambda$ ) - Energie Plus Le Site, s. d.)
Parpaing creux	0,15	[1700 ; 2200]	[1,04 ; 2,06]	1000	
Enduit de mortier de ciment	0,02	1650	0,72	840	
<b>2) Paroi externe</b>					
Carreaux	0,01	2000	1,3	1000	(Conductivité thermique des matériaux ( $\lambda$ ) - Energie Plus Le Site, s. d.)
Enduit de mortier de ciment	0,02	1650	0,72	840	
Parpaing creux	0,15	[1700 ; 2200]	[1,04 ; 2,06]	1000	
Enduit de mortier de ciment	0,02	1650	0,72	840	
<b>3) Toit</b>					
Mastic de toiture	0,005	2330	1,15	840	Conductivité thermique des matériaux ( $\lambda$ ) - Energie Plus Le Site, s. d.)
Enduit de mortier de ciment	0,04	1650	0,72	840	
Dalle	0,20	2400	1,7	1000	
Enduit de mortier de ciment	0,02	1650	0,72	840	
<b>4) Plancher</b>					
Carreaux	0,01	2000	1,3	1000	

Enduit de mortier de ciment	0,04	1650	0,72	840	<i>(Conductivité thermique des matériaux (<math>\lambda</math>) - Energie Plus Le Site, s. d.)</i>
Dalle	0,20	2400	1,7	1000	
Enduit de mortier de ciment	0,02	1650	0,72	840	
<b>5) Fenestration (simple vitrage)</b>			Coefficient de transmission ( $W/m^2.K$ )		
Vitrage avec épaisseur de 3,18 mm			6,98		(ASHRAE, 2009)
Vitrage acrylique/polycarbonate d'épaisseur 3,18 mm			5,45		
Vitrage acrylique/polycarbonate d'épaisseur 6,35 mm			4,99		
Cadre en aluminium sans rupture de pont thermique			6,87		
Cadre en aluminium avec rupture de pont thermique			6,24		
Accessoire d'ombrage (Persienne en PVC repliable)			R = 0,26 m <sup>2</sup> .K/W		(Cédar, s. d.)

### 5.2.1 Simulations TRNSYS

Les simulations ont débuté par une modélisation 3D des 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> étages du bâtiment dans google SketchUp via le plugin Trnsys3d (Figure 5.2). Les étages ainsi modélisés ont été importés dans TRNSYS où l'orientation du bâtiment, les paramètres thermo-physiques de l'enveloppe, les gains internes et les infiltrations ont été renseignés dans TRNBuild. Face au manque de données réelles sur la vitesse et la direction du vent, un calcul précis de l'infiltration d'air dans le local n'a pu être effectué. Les valeurs des infiltrations ont donc été estimées entre 0,3 ach (Jiang et al., 2020; Liuzzi et al., 2013) et 0,5 ach (L. Zhang et al., 2020) en considérant les fenêtres et portes fermées. Quant aux gains internes, ils ont été considérés comme étant nuls. En effet, pour apprécier spécifiquement l'impact de l'enveloppe sur les conditions hygrothermiques de l'ambiance intérieure, les simulations ont été effectuées uniquement pendant les week-ends où le local est inoccupé et le système de climatisation est à l'arrêt. Cette approche a pour avantage de limiter les sources d'erreur liées aux variations incontrôlées des gains internes et de renouvellement d'air dus aux comportements des occupants (ouverture de portes et/ou fenêtres).

Pour finir, le local a été simulé dans TRNSYS Studio sous le climat de la ville de Cotonou. TRNSYS 18 ne disposant pas des données climatiques de Cotonou dans sa base de données, les données météorologiques horaires mesurées sur le site ont été implémentées dans le logiciel. Ces données concernent notamment le rayonnement solaire global, la température, l'humidité et la pression de l'air extérieur. Etant donné que la campagne de surveillance n'a duré que 6 mois (juillet à décembre 2020), les données météorologiques horaires des premiers mois de l'année (janvier à juin) ont été téléchargées sur la plateforme du National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). En raison de l'écart existant entre les données mesurées sur le site et celles du NOAA, seuls les résultats de simulations couvrant la période de juillet à décembre ont été pris en compte. Ainsi les paramètres du modèle thermique du bureau

considéré peuvent être calibrés avec les mesures in situ. Le scénario de simulation prenant en compte l'intégration des données météorologiques réelles du site est illustré en annexe 2.1.

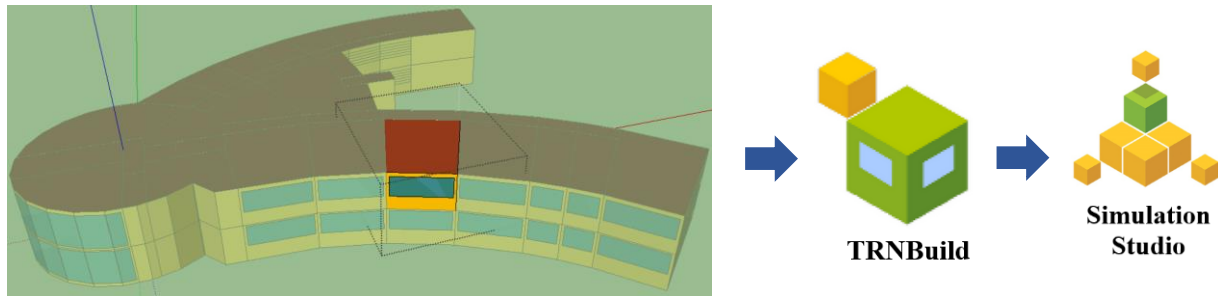


Figure 5.2: Etapes de la simulation dans TRNSYS 18

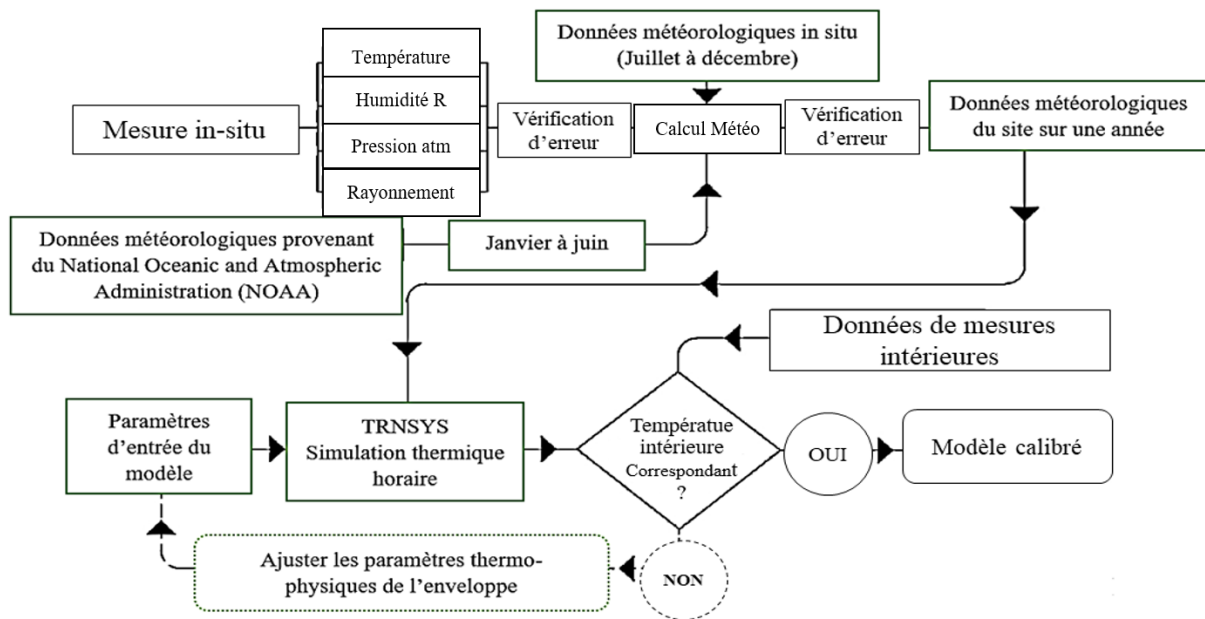
### 5.2.2 Calibration du modèle de simulation

La calibration d'un modèle de simulation consiste en un ajustement des paramètres d'entrée du modèle afin de faire correspondre au mieux les résultats de simulation aux données réelles mesurées. Perneti et al. (2013) définissent la calibration comme une approche itérative basée sur la variation des données d'entrée d'un modèle pour réduire les écarts entre les comportements énergétiques simulé et réel d'un bâtiment. Elle peut être réalisée suivant quatre approches que sont (Reddy, 2006) :

- les **méthodes de calibration manuelles** : elles se basent sur l'expérience et l'expertise de l'utilisateur pour ajuster les paramètres d'entrée suivant une approche itérative ;
- les **méthodes de calibrations graphiques** : elles se servent des représentation graphiques par pas de temps horaire, journalier ou mensuel pour identifier avec exactitude où se situent les écarts entre les données simulées et celles mesurées afin d'orienter l'utilisateur dans l'ajustement du modèle ;
- les **méthodes de calibration basées sur des tests spéciaux et des procédures analytiques** : elles font recours à des approches automatisées telles que les tests d'infiltrométrie, les mesures de transmittance thermique des parois ou le monitoring à court terme (Fabrizio & Monetti, 2015) des paramètres nécessaires à l'ajustement des modèles de simulation.
- les **méthodes de calibration analytiques et mathématiques** : elles utilisent des algorithmes d'optimisation pour affiner les paramètres d'entrées et minimiser les erreurs quadratiques entre les données simulées et celles mesurées.

Le choix de l'un ou/et l'autre des méthodes dépend des objectifs de simulation et des données de terrain disponibles. A ce sujet, dans la plupart des travaux, la calibration des modèles de simulation énergétique se fait sur la base des données énergétiques (enregistrement de consommation, factures énergétiques) (Giorgio Mustafaraj et al., 2014; Raftery et al., 2011; Reddy, 2006; Silva & Ghisi, 2014). Cependant, la calibration peut également être effectuée sur la base d'indice de confort tels que la température, l'humidité, etc. Cette approche est généralement utilisée pour les bâtiments ne disposant pas de système de conditionnement

énergétique (Mateus et al., 2014; Nguyen & Reiter, 2012; Perneti et al., 2013). Ce faisant, Zhang et al. (2020) utilisent un modèle de simulation calibré sur la base des températures intérieures mesurées à court terme pour simuler l'influence des stratégies de ventilation et de conception sur le confort thermique intérieur pendant toute une année. En se référant à leur schéma de calibrage, la stratégie adoptée dans la présente étude pour la calibration du modèle de simulation thermique en vue de la détermination des propriétés thermo-physiques optimales de l'enveloppe est schématisée à la Figure 5.3. Par ailleurs, les approches de calibration manuelle itérative et graphique ont été retenues pour la calibration du modèle de simulation.



**Figure 5.3:** Approche de calibration du modèle de simulation thermique du bureau surveillé

### 5.2.3 Précision du modèle de simulation

Les normes ASHRAE Guideline 14-2002 (ASHRAE 14, 2014) et ASHRAE Handbook of Fundamentals (ASHRAE, 2009) définissent deux indices d'évaluation de la qualité des résultats issus du modèle calibré. Il s'agit de l'erreur de biais moyenne normalisée ( $NMBE$  : Normalised Mean Bias Error) et le coefficient de variation de l'erreur moyenne quadratique ( $CV(RMSE)$  : Coefficient of Variation of Root Mean Square Error) déterminés respectivement par les équations (5.1) et (5.2). Le premier traduit l'écart entre les résultats simulés et les valeurs mesurées tandis que le second permet de mettre en lumière l'aptitude des modèles de simulation à refléter la réalité. Cependant Coelho et al. (2018) affirment que l'utilisation d'un seul de ces indices peut conduire à un modèle peu fiable. Pour renforcer la robustesse du modèle, les auteurs recommandent la détermination de deux indices statistiques supplémentaires que sont le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et le coefficient de qualité de l'ajustement ( $fit$ ). Ils renseignent respectivement sur la corrélation et le niveau de fluctuation entre les données simulées et mesurées. Le modèle est déclaré fiable et suffisamment robuste lorsque les valeurs du  $NMBE$  et du  $CV(RMSE)$  sont proches de 0 et celles de  $R^2$  et  $fit$  proches de 1 et 100%

respectivement. Des intervalles de tolérance de  $\pm 5\%$  pour le  $NMBE$  et  $\pm 15\%$  pour le  $CV(RMSE)$  sont recommandés par ASHRAE 14 (2014) et Bertagnolio (2012) tandis que Kramer et al. (2013) suggèrent des valeurs de  $R^2$  et  $fit$  supérieures respectivement à 0,75 et 80%.

$$NMBE (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{is} - t_{im})}{n - 1} \times \frac{1}{\bar{t}_m} \times 100 \quad (5.1)$$

$$CV(RMSE)(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{is} - t_{im})^2}{n - 1}} \times \frac{1}{\bar{t}_m} \times 100 \quad (5.2)$$

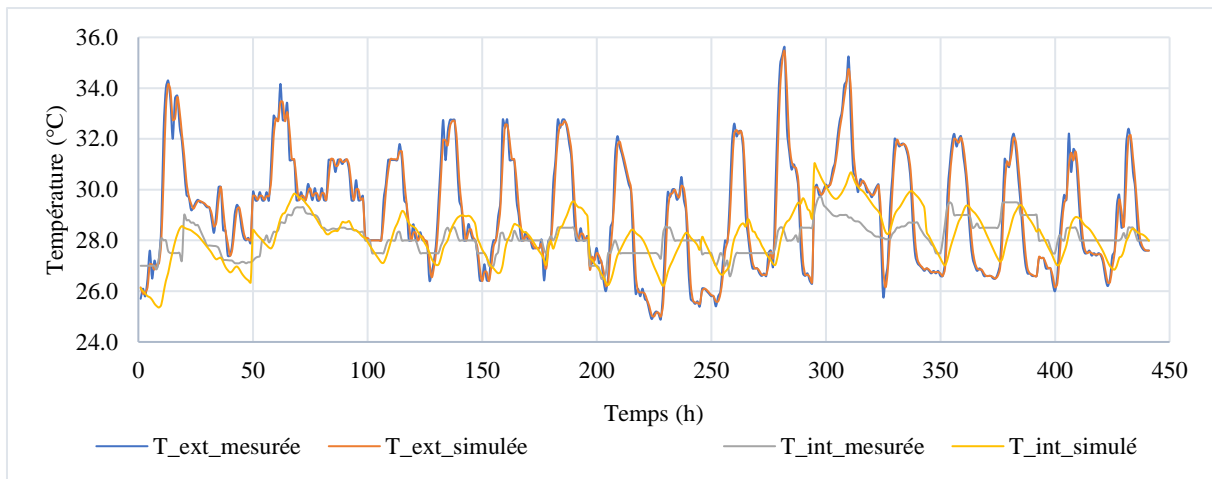
$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (t_{im} - \bar{t}_m)(t_{is} - \bar{t}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{im} - \bar{t}_m)^2 \sum_{i=1}^n (t_{is} - \bar{t}_s)^2}} \right)^2 \quad (5.3)$$

$$fit = \left( 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{is} - \bar{t}_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{is} - \bar{t}_m)^2}} \right) \times 100 \quad (5.4)$$

Où  $n$  est le nombre de données (température) mesurées,  $t_{is}$  la  $i$ ème température simulée ( $^{\circ}C$ ),  $t_{im}$  la  $i$ ème température mesurée ( $^{\circ}C$ ) et  $\bar{t}_m$  la température moyenne des  $n$  mesures.

#### 5.2.4 Résultats

La figure 5.4 présente le résultat de la simulation donnant les meilleurs indices d'évaluation parmi toutes les simulations effectuées. Ainsi, les valeurs obtenues pour le  $NMBE$  et  $CV(RMSE)$  sont proches de 0, soient respectivement 0,25% et 2,67%. Ce qui témoigne de la fiabilité du modèle. Cependant, la robustesse du modèle de simulation peut être remise en cause sur la base des valeurs de  $R^2$  et  $fit$ . Pour le premier, le résultat obtenu est égal à 0,61 ; ce qui est inférieur au seuil minimal de 0,71 (Mustafaraj et al., 2010). Il en est de même pour le  $fit$ , dont la valeur de 26,23% obtenue est bien loin de la limite inférieure fixée à 40% (Mustafaraj et al., 2010). Toutefois, ce modèle a permis de ressortir les propriétés physico-thermiques optimales de la couche 'aggl' identifiée dans l'enveloppe en maçonnerie carrelée du bâtiment d'étude. La masse volumique optimale obtenue est égale à  $2243 \text{ kg/m}^3$ . Quant à la conductivité thermique, la valeur de  $1,08 \text{ W/m.K}$  a donné les meilleurs résultats de simulation pour un taux d'infiltration de  $0,5 \text{ ach}$ . Ces propriétés serviront de référence dans le choix des composants de l'enveloppe en maçonnerie carrelée lors des simulations hygrothermiques avec le logiciel Wufi. Les indices ( $NMBE$ ,  $CV(RMSE)$ ,  $R^2$  et  $fit$ ) déterminés pour chacune des 60 simulations effectuées sont présentés dans le tableau A.5-1 de l'annexe 2.2.



**Figure 5.4:** Comparaison entre les températures simulées et mesurées

### 5.3 Evaluation de la performance hygrothermique de l'enveloppe en argile – paille de chiendent

L'évaluation de la performance énergétique de l'enveloppe en argile – paille de chiendent par rapport à l'enveloppe conventionnelle du bâtiment d'étude a été réalisée grâce à des simulations avec le logiciel WUFI Plus. La capacité de cet outil à simuler avec précision les transferts couplés de chaleur et de masse à travers l'enveloppe a été mise en évidence dans plusieurs études (Barclay et al., 2014; Cao et al., 2021; Coelho et al., 2018; Sui Jiang et al., 2021; M. Zhao et al., 2022). Cependant, pour confirmer cela et se rassurer sur le fait que les modèles mathématiques utilisés par le logiciel sont en mesure de prédire avec précision le comportement hygrothermique de l'éco-matériau mis en œuvre dans la présente étude, une validation expérimentale des modèles a été initiée.

#### 5.3.1 Validation expérimentale des modèles HAM utilisés dans WUFI

##### 5.3.1.1 Expérimentation

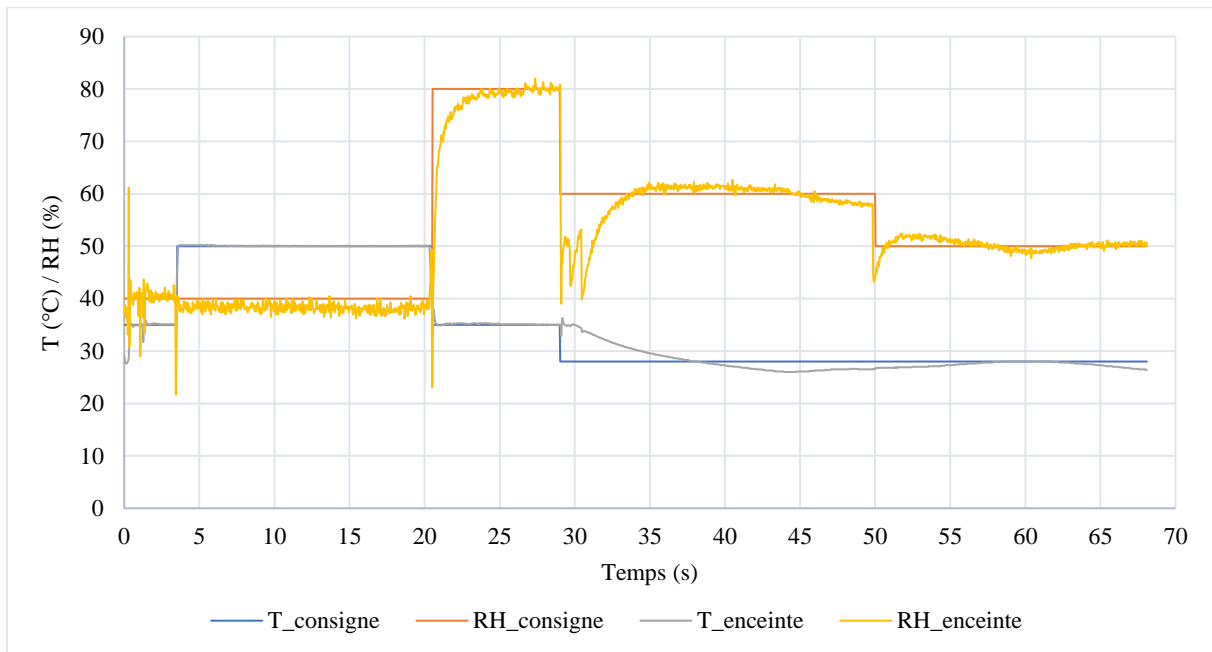
L'expérience consiste à insérer un hygro-bouton à l'intérieur du matériau étudié afin de mesurer l'évolution de la température et de l'humidité en son sein. Pour se faire, deux échantillons d'argile – paille de chiendent issus de la même formulation et de dimension  $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$  ont été assemblés et rendus solidaires l'un par rapport à l'autre grâce à un ruban en aluminium (figure 5.5.b). Une petite poche a été créée au centre de la surface de contact de l'un des échantillons afin d'y placer un hygro-bouton (figure 5.5.a). Les surfaces de contact des deux échantillons sont supposées suffisamment planes pour garantir un contact parfait. Seules les formulations  $BTC_8 - 0$  et  $BTC_8 - 1$  ont été concernées par ces essais de validation. Pour chacune des formulations, deux assemblages (échantillons + hygro-bouton) ont été réalisés.

Les assemblages ainsi obtenus ont été placés dans une enceinte climatique où le scénario de température et d'humidité présenté à la Figure 5.6 a été exécuté. Au début, la température et l'humidité relative ont été fixées respectivement à  $35^\circ\text{C}$  et 40% pendant environ trois heures.

S'en est suivie une augmentation de 15°C de la température pendant 17 heures. Après cela, une variation simultanée des deux paramètres a été réalisée faisant passer la température de 50°C à 35°C et l'humidité relative de 40% à 80% pendant 9 heures de temps. Pour finir, la température a été ramenée à 28°C tandis que l'humidité passait successivement à 60% pendant 21 heures puis à 50%. Un hygro-bouton a été placé dans l'enceinte climatique pour mesurer les conditions hygrothermiques réelles régnant dans l'enceinte. Les évolutions de température et d'humidité ainsi mesurées sont illustrées à la Figure 5.6. Le pas de temps pour l'enregistrement était de 2 min.



**Figure 5.5:** (a) Échantillon comportant un hygro-bouton ; (b) Assemblage échantillon + hygro-bouton



**Figure 5.6:** Scénario hygrothermique de validation

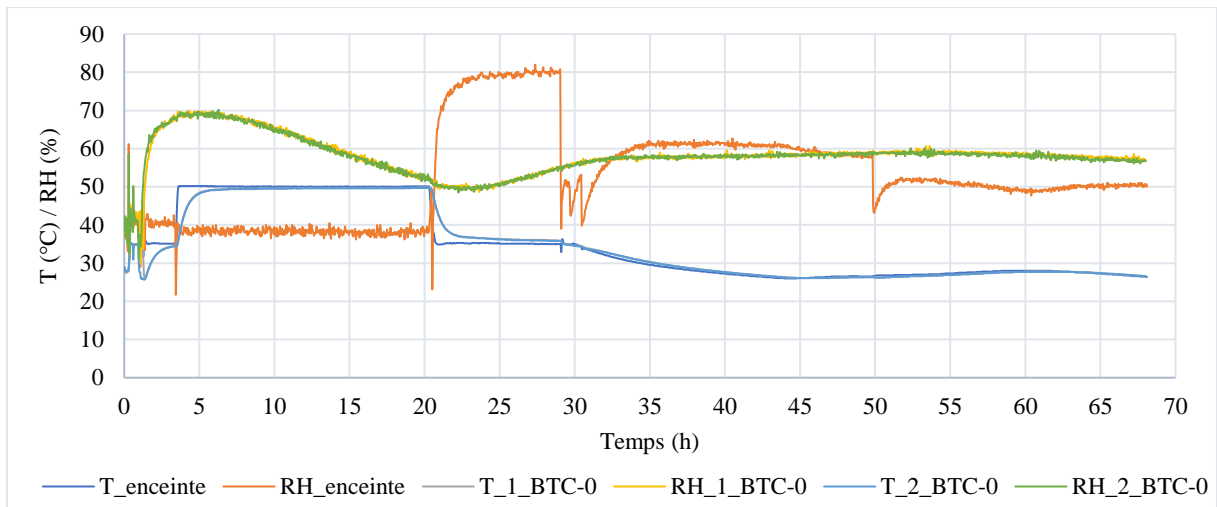


### 5.3.1.2 Résultats et validation

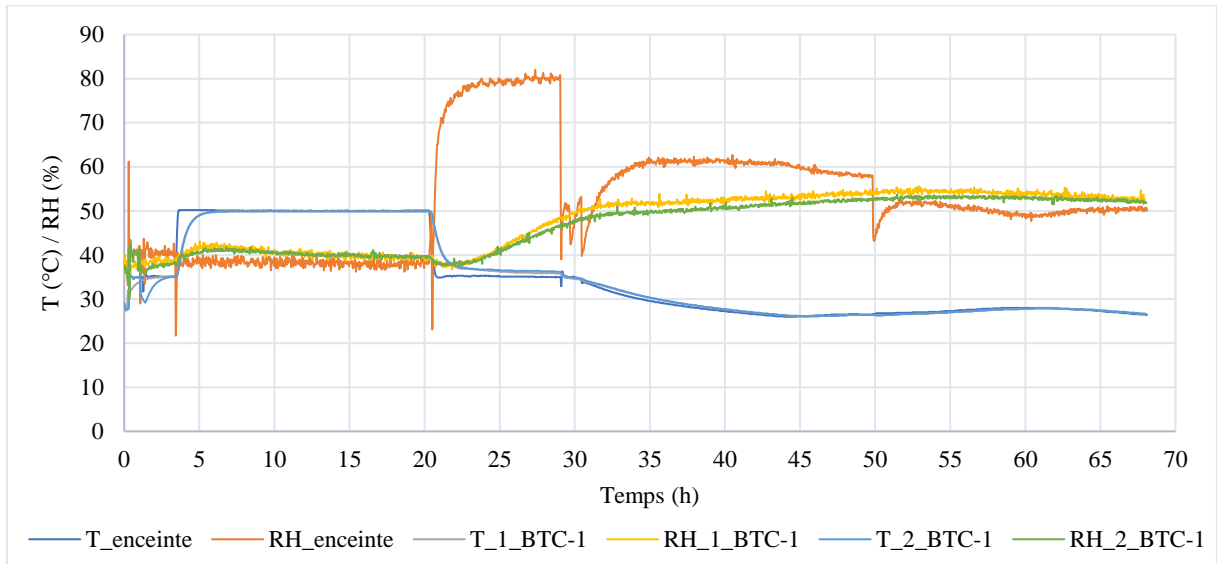
Les figures 5.7 et 5.8 présentent les évolutions de la température et de l'humidité au sein des matériaux. Comme il peut être remarqué, les échantillons testés présentent des comportements hygrothermiques presque identiques selon la formulation. Cela est d'autant plus vrai qu'aucune différence significative n'est à relever entre les courbes de température et d'humidité des deux assemblages du  $BTC_8 - 0$ . Malgré une série d'échantillons très limitée (2), ce résultat témoigne de la bonne répétabilité du comportement hygrothermique de cette formulation. En revanche, pour le  $BTC_8 - 1$ , une légère différence peut être observée entre les courbes d'humidité. Cet écart peut s'expliquer par la présence de la paille de chiendent dans la matrice de terre, dont la répartition aléatoire dans le matériau perturbe le chemin suivi par la vapeur d'eau. Contrairement à la chaleur, la vapeur se transporte à travers les pores ouverts présents dans le matériau. La structure porale du matériau étant réorganisée d'un échantillon à un autre en raison de la répartition aléatoire de la paille de chiendent dans la matrice de terre, le trajet suivi par un flux de vapeur d'eau peut donc varier selon la tortuosité de l'échantillon.

Par ailleurs, pour valider la capacité de WUFI à prédire le comportement hygrothermiques des BTC en argile – paille de chiendent, l'expérimentation réalisée au LERMAB a été reproduite dans WUFI. A cet effet, les conditions hygrothermiques enregistrées dans l'enceinte climatique ont été imposées de part et d'autre des surfaces des deux parois en  $BTC_8 - 0$  et  $BTC_8 - 1$  d'épaisseur 4 cm chacune. Pour des raisons de compatibilité, les données hygrothermiques de l'enceinte climatique mesurées toutes les 2 min ont été converties en données horaires pour les simulations. Les comportements hygrothermiques des deux parois ont été simulés pendant 72 heures et les données de température et d'humidité à 2 cm de profondeur, enregistrées. Les variations de température et d'humidité à cette profondeur sont illustrées par les Figure 5.7 et Figure 5.8. Comme le montre la figure 5.9, il existe une bonne concordance entre les températures simulées et celles mesurées expérimentalement. En revanche, un écart important subsiste entre les deux courbes d'humidité relative. Cela peut s'expliquer par une période de pré-conditionnement insuffisante pour le  $BTC_8 - 0$ . En effet, avant l'exécution du scénario dans la chambre climatique, tous les échantillons ont subi un pré-conditionnement de 36 heures à 35°C et 40%. Le comportement hygrique du  $BTC_8 - 0$  en début d'essai, malgré une humidité relative de 40% dans l'enceinte, permet d'affirmer que les échantillons avaient une humidité relative plus élevée que celle attendue. Ainsi, pendant les 20 heures où l'humidité relative de l'enceinte est maintenue à 40%, il peut être observé une chute de l'humidité relative qui passe de 70% à environ 50%. Cette humidité augmente à nouveau avec l'augmentation de l'humidité relative de l'enceinte. Au fil du temps, on observe une convergence entre les données hygriques expérimentales et celles simulées. Les différences observées dans les comportements hygriques expérimentaux et simulés du  $BTC_8 - 0$  peuvent donc être attribuées aux conditions expérimentales et non aux modèles de simulation de WUFI. Cela a d'ailleurs été vérifié par le résultat des comparaisons entre les données simulées et expérimentales pour le  $BTC_8 - 1$ . Dans ce cas, les données simulées sont en bon accord avec les données expérimentales (Figure 5.10). Ce qui confirme la robustesse et la capacité des modèles de transfert HAM implémentés dans

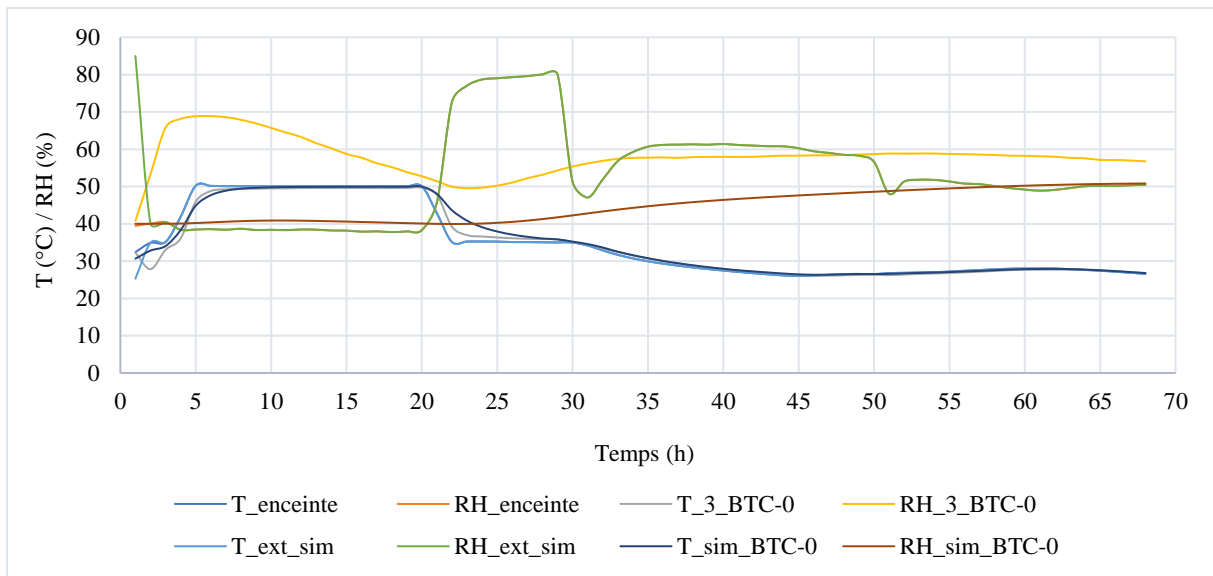
WUFI Plus à prédire de façon précise, le comportement hygrothermique des BTC en argile – paille de chiendent.



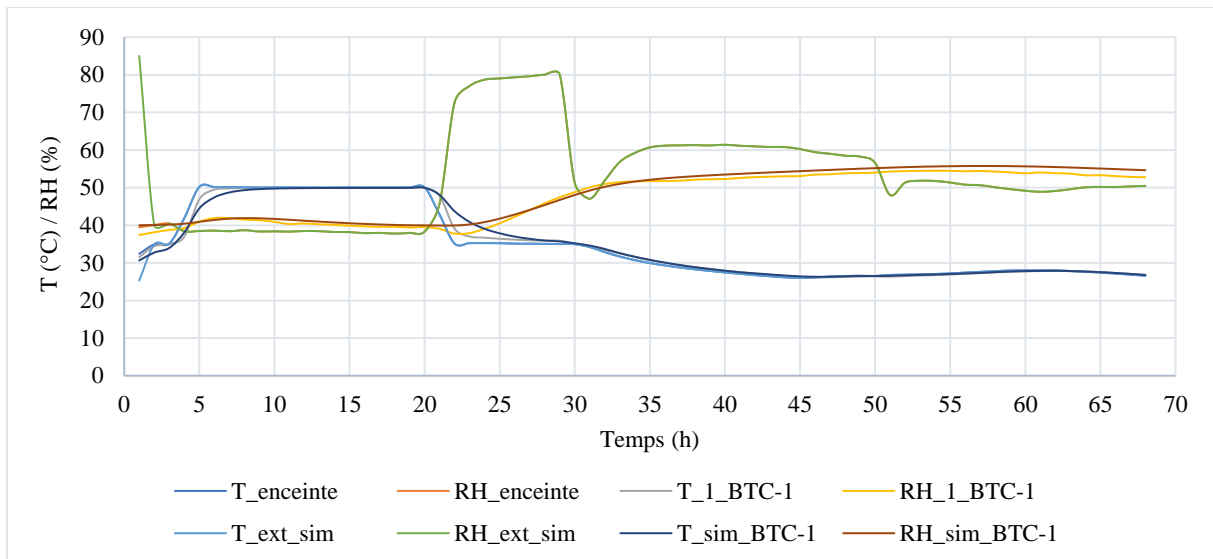
**Figure 5.7:** Comportements hygrothermiques des assemblages de  $BTC_8 - 0$



**Figure 5.8:** Comportements hygrothermiques des assemblages de  $BTC_8 - 1$



**Figure 5.9:** Comparaison entre les comportements hygrothermiques expérimentaux et simulés du BTC<sub>8</sub> - 0



**Figure 5.10:** Comparaison entre les comportements hygrothermiques expérimentaux et simulés du BTC<sub>8</sub> - 1

### 5.3.2 Performance hygrothermique des enveloppes en argile – paille de chiendent

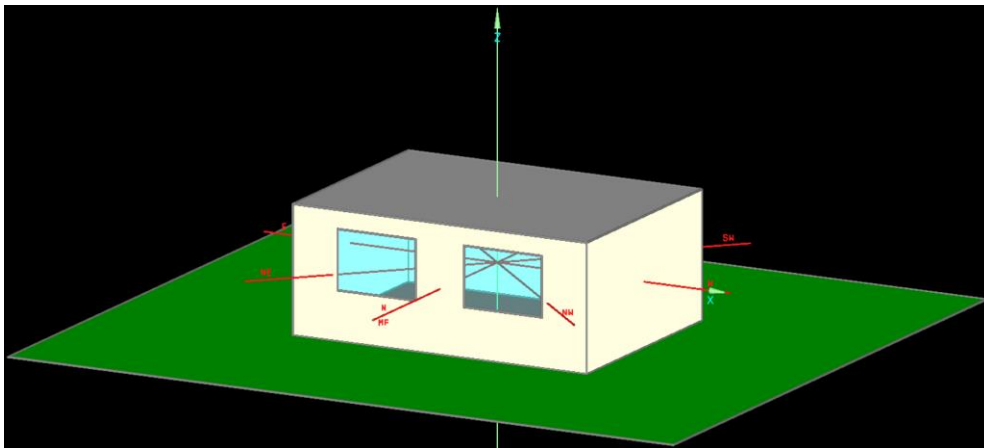
#### 5.3.2.1 Géométrie et approche de simulation

L'évaluation de la performance hygrothermique des enveloppes en argile – paille de chiendent a été réalisée en simulant l'influence des comportements hygrothermiques des enveloppes sur les conditions hygrothermiques de l'ambiance intérieure d'un local dans WUFI Plus. Pour cela, le bureau du bâtiment d'étude précédemment simulé dans TRNSYS a été modélisé en 3D dans WUFI Plus. La forme atypique de ses parois verticales (légèrement concaves) a été simplifiée en une configuration de forme prismatique (Figure 5.11). Cependant, la surface du plancher est

restée inchangée (40,4 m<sup>2</sup>), de même que la hauteur plancher/plafond (2,7 m) de sorte à avoir le même volume. Les surfaces vitrées, placées sur la façade nord du local, représentent 25% de la paroi.

Dans cette section, trois (3) scénarios de simulation ont été élaborés :

- **Scénario 1** : les simulations effectuées dans ce scénario visent à évaluer les performances hygrothermiques des BTC en argile – paille de chiendent dans leur phase d'utilisation. En effet, compte tenu de leurs propriétés mécaniques, ces matériaux seront utilisés dans la pratique comme éléments de remplissage de l'enveloppe. Ainsi, dans la géométrie simulée, seuls les murs du local simulé seront réalisés en argile – paille de chiendent ; le plancher et le toit étant réalisés avec les matériaux conventionnels de construction (Tableau 5.2).
- **Scénario 2** : il faut souligner qu'une évaluation des performances hygrothermiques des enveloppes en argile – paille de chiendent avec le scénario 1 ne permet pas de mettre en lumière les performances hygrothermiques intrinsèques des BTC. A cet effet, de nouvelles simulations ont été réalisées sur des enveloppes composées uniquement des matériaux étudiés.
- **Scénario 3** : il cherche à mettre en lumière l'importance de la prise en compte du transfert d'humidité à travers l'enveloppe dans l'évaluation des conditions hygrothermiques de l'ambiance intérieure. Pour cela, le scénario 2 a été repris, mais en désactivant cette fois-ci le transfert d'humidité à travers les enveloppes.



*Figure 5.11*: Représentation 3D dans WUFI du bureau surveillé

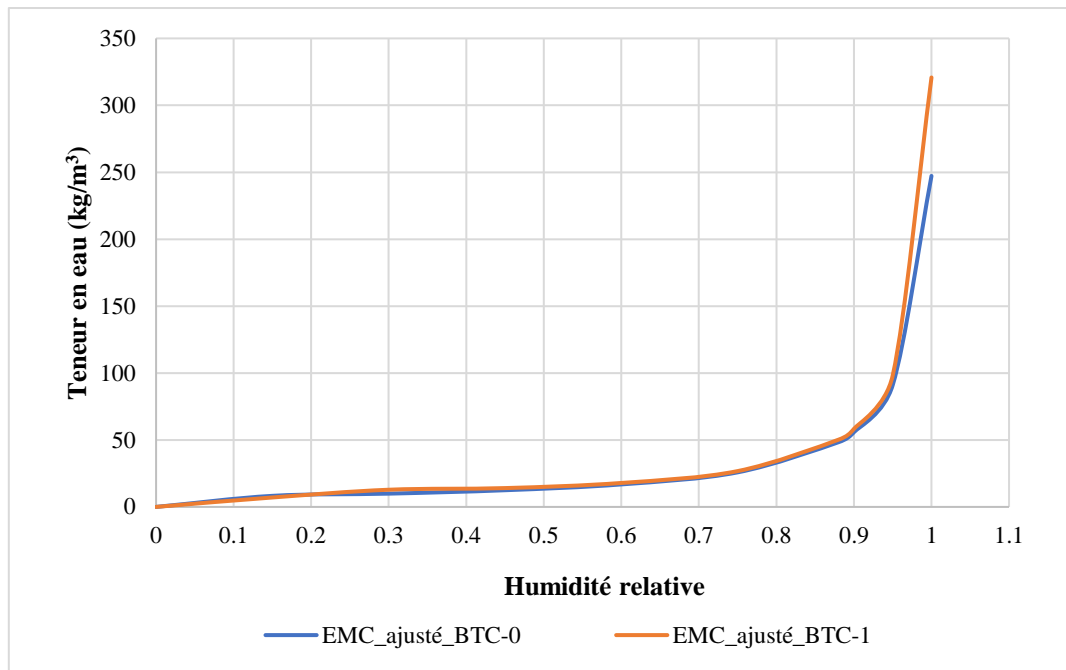
### 5.3.2.2 Données climatiques de simulation

Les simulations avec WUFI Plus nécessitent des données météorologiques plus complètes que celles utilisées dans TRNSYS pour la simulation énergétique des bâtiments. Entre autres, les paramètres tels que la pluviométrie, la vitesse et la direction du vent sont nécessaires pour les simulations WUFI. Mais, étant donné que de telles données n'ont pas pu être mesurées sur le site, les données météorologiques horaires complètes de la ville où est implanté le bâtiment d'étude (Cotonou) ont été générées dans Meteonorm. Une comparaison faite entre certaines

données générées et celles mesurées sur le site pendant la période de monitoring témoigne de l'écart existant entre ces deux catégories de données. D'ailleurs, cela a été mis en évidence par le calcul des quatre indices statistiques de précision précités. Les valeurs obtenues pour le *NMBE*, le *CV(RMSE)*, le  $R^2$  et le *fit* sont respectivement égales à  $-13,55\%$ ,  $15,32\%$ ,  $0,54$  et  $65,36\%$  pour la température de l'air extérieur et de  $-0,53\%$ ,  $10,38\%$ ,  $0,27$  et  $98\%$  pour l'humidité relative. Or selon Coelho et al. (2018), la performance hygrothermique d'un bâtiment est fortement influencée pour les données météorologiques utilisées lors des simulations. Pour preuve, Zhao et al. (2022) observent des différences significatives entre les conditions thermiques intérieures simulées lorsque les données météorologiques régionales et celles mesurées sur le site ont été utilisées. Ainsi, pour faire correspondre au mieux les données météorologiques générées par Meteonorm et celles mesurées sur le site, un ajustement de la température extérieure a été entrepris. Par ailleurs, les indices de précision de l'humidité relative étant relativement acceptables, à l'exception du  $R^2$ , aucune modification n'a été apportée aux humidités relatives générées par Meteonorm.

### **5.3.2.3 Propriétés physiques et hygrothermiques des enveloppes**

L'ensemble des données d'entrée utilisées pour modéliser le comportement hygrothermique des différentes enveloppes testées est regroupé dans le Tableau 5.2. La littérature consultée ne fournissant pas les valeurs de la porosité et de la résistance à la vapeur d'eau des composants de l'enveloppe en maçonnerie carrelée, des éléments ayant des propriétés thermo-physiques similaires à celles déterminées avec les simulations TRNSYS ont été identifiés dans la base de données de WUFI et utilisés pour constituer l'enveloppe conventionnelle. Quant aux propriétés physiques et hygrothermiques des BTC en argile – pailles, les données expérimentales déterminées dans les chapitres 2 et 3 ont été utilisées. Il s'agit de masse volumique, de la porosité accessible, de la chaleur spécifique, du facteur de résistance à la vapeur. Les évolutions des conductivités thermiques en fonction des teneurs en eau des BTC ont également été renseignées de même que leurs isothermes d'adsorption. Pour cette dernière propriété, les valeurs ajustées des teneurs en humidités d'équilibre ( $EMC_{ajusté}$ ) avec le modèle GAB ont été utilisées puisqu'elles peuvent être calculées même pour des humidités relatives de  $100\%$  tel qu'exigé dans les simulations WUFI. La Figure 5.12 présente l'évolution de la teneur en eau des BTC en argile – paille de chiendent en fonction de l'humidité relative telle que renseignée dans le logiciel.



**Figure 5.12:** Variation de la teneur en eau des BTC en argile – paille de chiendent en fonction de l’humidité relative

**Tableau 5.2:** Propriétés physiques et hygrothermiques des enveloppes

Matériau	$e$ (m)	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\lambda$ ( $W/m.K$ )	$C_p$ ( $J/kg.K$ )	Porosité (%)	$\mu$ (-)	Source
<b>1) Mur</b>							
<i>Maçonnerie carrelée</i>							
Enduit au ciment	0,01	2000	1,2	850	0,3	25	Base de données WUFI
Enduit bâtard	0,02	1900	0,8	850	0,24	19	
Brique creuse	0,15	1891	0,96	860	0,28	14	
Enduit bâtard	0,02	1900	0,8	850	0,24	19	
<i>Argile – paille de chiendent</i>							
$BTC_8 - 0$	0,2 – 0,3	1932	0,74	633	0,27	21,82	Expérimentation (Chap 2 et 3)
$BTC_8 - 0,5$	0,2 – 0,3	1835	0,72	682	0,28	21,16	
$BTC_8 - 1$	0,2 – 0,3	1753	0,70	729	0,31	20,23	
<b>2) Toit</b>							
Enduit bâtard	0,04	1900	0,8	850	0,24	19	Base de données WUFI
Béton (E/C=0,5)	0,20	2308	1,7	850	0,15	179	
Enduit bâtard	0,04	1900	0,8	850	0,24	19	
<b>3) Plancher</b>							
Dalle en béton – couche du bas	0,20	1990	1,6	850	0,175	99	Base de données WUFI
Enduit bâtard	0,04	1900	0,8	850	0,24	19	
<b>4) Fenestration (simple vitrage)</b>				Coefficient de transmission ( $W/m^2.K$ )			
Vitrage avec épaisseur de 3,18 mm				6,98			

Vitrage acrylique/polycarbonate d'épaisseur 3,18 mm	5,45	(ASHRAE, 2009)
Vitrage acrylique/polycarbonate d'épaisseur 6,35 mm	4,99	
Cadre en aluminium sans rupture de pont thermique	6,87	
Cadre en aluminium avec rupture de pont thermique	6,24	
Accessoire d'ombrage (Persienne en PVC repliable)	$R = 0,26 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	

$e$  : épaisseur ;  $\rho$  : masse volumique ;  $\lambda$  : conductivité thermique,  $C_p$  : chaleur spécifique ;  $\mu$  : facteur de résistance à la vapeur d'eau.

### 5.3.3 Performance énergétique des enveloppes en argile – paille de chiendent

Selon l'enquête de confort réalisée auprès des occupants du bâtiment d'étude, la température de confort a été évaluée à 26,1°C. Cette température s'accompagne d'une humidité relative comprise entre 40% et 70%. Pour atteindre ces conditions de confort hygrothermique, des systèmes de climatisation et de déshumidification ont été introduits dans les simulations. Pour cette étape de l'étude, deux nouveaux scénarios ont été exécutés. Dans un premier temps, des gains internes ont été appliqués à la géométrie du scénario 1, de sorte à reproduire le mode d'occupation et de fonctionnement du bureau surveillé (*scénario 4*). Les charges énergétiques pour le conditionnement de l'ambiance intérieure du local ont été déterminées pour chaque enveloppe puis comparées entre elles. Le 5<sup>ème</sup> scénario quant à lui vise à évaluer les gains énergétiques dus à la prise en compte du transfert d'humidité à travers l'enveloppe étudiée.

Par ailleurs, l'estimation des gains internes dans le local a été réalisée sur la base de l'occupation réelle et du mode de fonctionnement du bureau sélectionné dans le bâtiment d'étude. En effet, le local retenu est permanemment éclairé par quatre (4) lampes fluorescentes pendant la période d'occupation. En l'absence de données fiables sur la consommation énergétique de ces lampes, une densité d'éclairage de 12 W/m<sup>2</sup> a été retenue selon les recommandations de ASHRAE Standard 2010-90.1 (2011). Ainsi, en tenant compte de la surface du bureau simulé (40,4 m<sup>2</sup>), la puissance d'éclairage dans le local est de 484,8 W. Le gain de chaleur dû à cette puissance est déterminé par l'équation (5.19). Le bureau considéré ne disposant pas de faux plafond, tout le gain généré par les luminaires affectera le local. Pour autant, environ 70% de ce gain seront pris en charge par la climatisation (fraction convective) ; le reste étant converti en charge radiative. Les occupants utilisent quatre (4) ordinateurs, deux (2) imprimantes et une (1) photocopieuse. Les puissances moyennes de fonctionnement de chacun de ces équipements, enregistrées lors du monitoring du bâtiment, sont respectivement de 60 W, 54 W et 120 W. La fraction convective pour les ordinateurs est de 86% contre 67% pour les imprimantes et la photocopieuse. Ces différentes données sont renseignées dans le Tableau 5.3 de même que les gains de chaleur générés par les occupants. A cet effet, quatre (4) personnes, dont deux femmes, occupent le local. Les occupants exerçant un travail de bureau, le métabolisme associé à cette fonction est égal à 1,2 met, soit 70 W/m<sup>2</sup> (CIBSE, 1999). La surface corporelle correspondant à un homme adulte est de 1,8 m<sup>2</sup> (Schoen et al., 2013) avec une réduction de 15% pour celle de la femme. Pour un travail modéré dans un bureau à environ 26°C, 50% des gains de chaleur produits par les occupants sont considérés comme sensibles et le reste représente les gains latents (CIBSE, 1999). Cette chaleur latente est utilisée pour quantifier le gain d'humidité

interne généré par chaque occupant en appliquant l'équation (5.5) (R. P. Kramer et al., 2017). Par ailleurs (ASHRAE, 2009) renseigne que 60% des gains sensibles se font par rayonnement contre 40% par convection.

$$\dot{q}_{ec} = P_{el} \cdot F_{ul} \cdot F_{sa} \quad (5.5)$$

Où  $\dot{q}_{ec}$  représente le gain de chaleur interne dû à l'éclairage ( $W$ ),  $P_{el}$  la puissance électrique des luminaires installés ( $W$ ) ;  $F_{ul}$  le facteur d'utilisation (lighting use factor) et  $F_{sa}$  le facteur de tolérance spécial (lighting special allowance factor).

Dans l'expression (5.5), le  $F_{sa}$  représente le rapport entre l'énergie réellement consommée par les luminaires (lampe + ballast) et l'énergie nominale consommée par la lampe. Pour les luminaires fluorescents à ballast, le  $F_{sa}$  varie entre 1,1 et 1,2. La moyenne de 1,15 a donc été retenue pour ce cas d'étude. Quant au  $F_{ul}$ , elle correspond à la fraction de gain de chaleur interne en fonction de la conception du lieu d'implantation du luminaire (Bertagnolio, 2012). ASHRAE Handbook (2016) suggère un  $F_{ul} = 1$  pour les bâtiments commerciaux.

$$\dot{m}_{eau,vap} = \dot{q}_{latent} / \Delta h_{vap,eau} \quad (5.6)$$

Où  $\dot{m}_{eau,vap}$  est le gain d'humidité ( $g/s$ ),  $\dot{q}_{latent}$  le gain de chaleur latente ( $W$ ),  $\Delta h_{vap,eau}$  l'enthalpie spécifique d'évaporation de l'eau ( $\Delta h_{vap,eau} = 2257 J/g$ ).

Le bâtiment est occupé tous les jours ouvrables du lundi au vendredi de 08h à 17h avec une pause d'une heure entre 13h et 14h. Pendant la période de pause, les occupants sont considérés comme étant au repos avec un métabolisme de 1 *met*. Les ordinateurs sont mis en veille durant la pause et la puissance moyenne enregistrée de 2 W. La durée de fonctionnement des imprimantes et de la photocopieuse est estimée à 1h par jour d'occupation.

**Tableau 5.3:** Gains internes

Gain de chaleur et d'humidité	Gain de chaleur sensible ( $W$ )		Gain d'humidité ( $g/s$ )
	Convectif	Rayonnant	
Occupant	143,75	93,24	0,21
Luminaire	339,36	145,44	—
Ordinateur	206,4	33,6	—
Imprimante	72,36	35,64	—
Photocopieuse	80,4	39,6	—

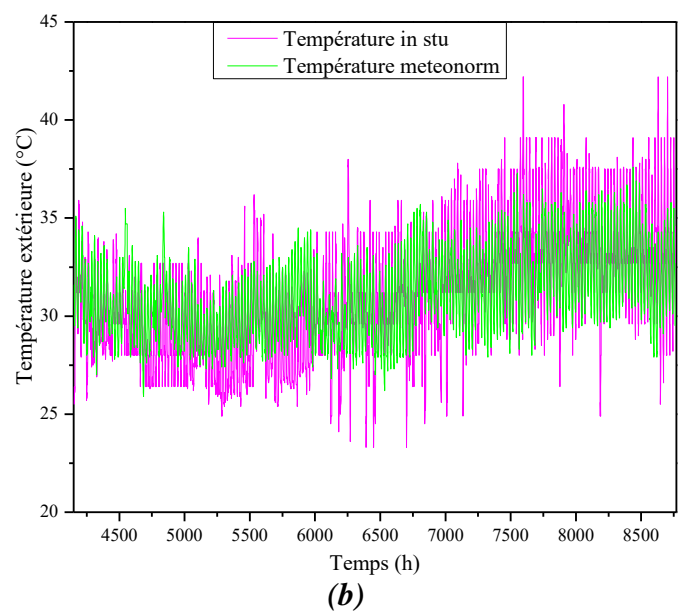
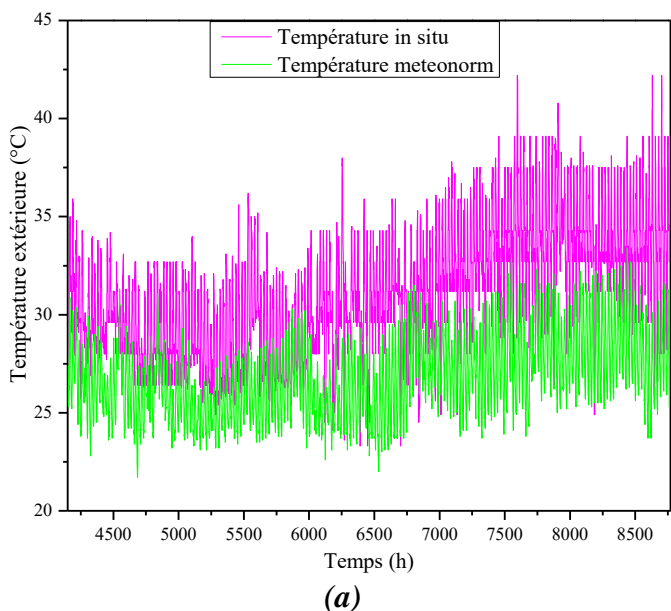
### 5.3.4 Résultats et discussions

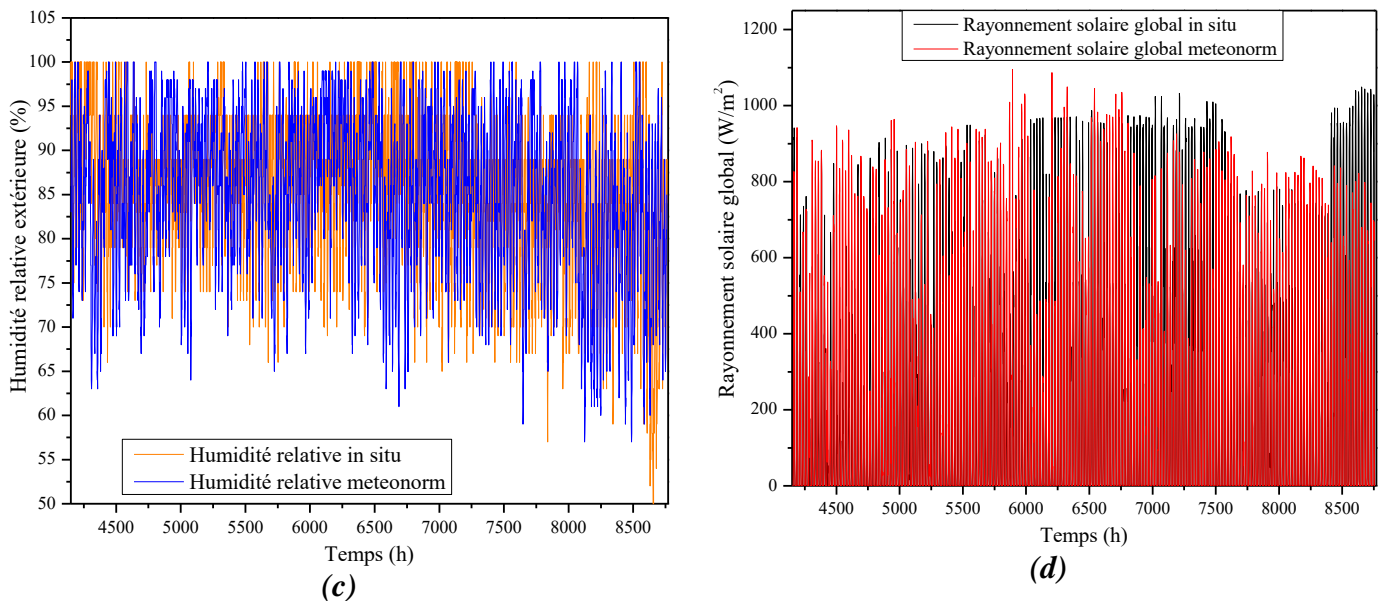
#### 5.3.4.1 Correction des données météorologiques de simulation

La Figure 5.13 (a, c et d) compare les données météorologiques générées par Meteonorm et celles in situ. Comme annoncé, un écart relativement important peut être observé entre les températures générées et celles in situ. En apportant une correction de +4,2°C aux températures générées, la nouvelle allure de la courbe de température est présentée à la Figure 5.13b. Comme



il peut être remarqué, l'augmentation générale de 4,2°C apportée aux températures générées a permis une réduction notable entre les deux types de température. D'ailleurs le *NMBE* et le *CV(RMSE)* donnent des valeurs proches de 0. Ils passent respectivement de -13,55% et 15,32%, à -0,06% et 7,15%. Ce qui traduit la bonne qualité de l'ajustement effectué à travers la minimisation des écarts. En revanche, avec un  $R^2 = 0,54$  et un  $fit = 65,36\%$  en dessous des limites de 0,75 et 80% recommandées par Kramer et al. (2013), il paraît évident que la corrélation entre les données générées et celles mesurées n'est pas aussi forte que souhaitée et que les fluctuations sont plus ou moins importantes. Pour autant, même si la robustesse de l'ajustement peut être remise en cause par les faibles valeurs de  $R^2$  et  $fit$ , les données ajustées sont suffisamment fiables pour être utilisées pour la simulation des performances hygrothermiques et énergétiques de la nouvelle enveloppe proposée. Une telle fiabilité se justifie par une erreur de biais moyenne et un coefficient de variation de l'erreur moyenne quadratique en dessous des seuils recommandés ( $NMBE < \pm 5\%$  et  $CV(RMSE) < 15\%$  (ANSI/ASHRAE, 2002)).

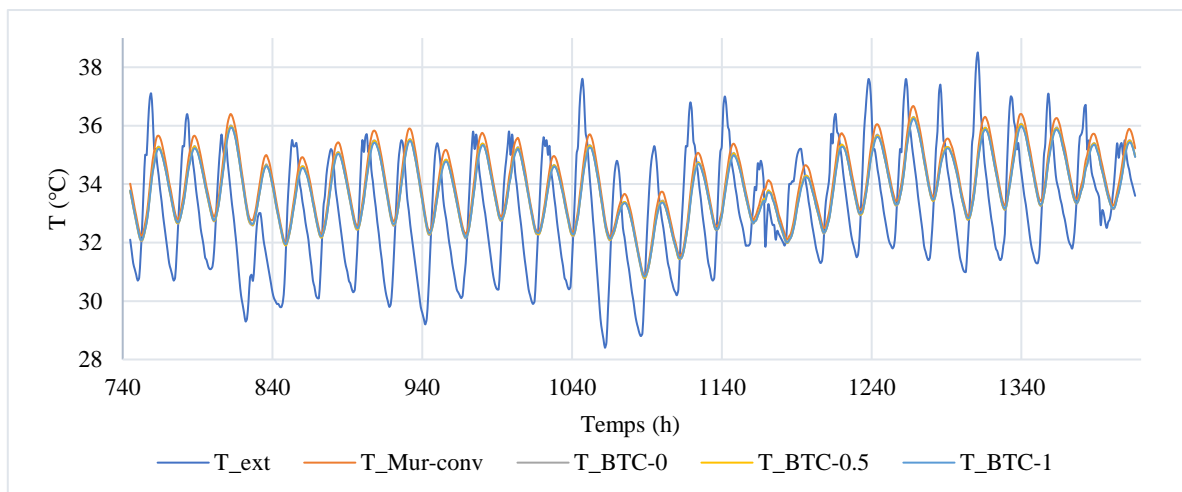




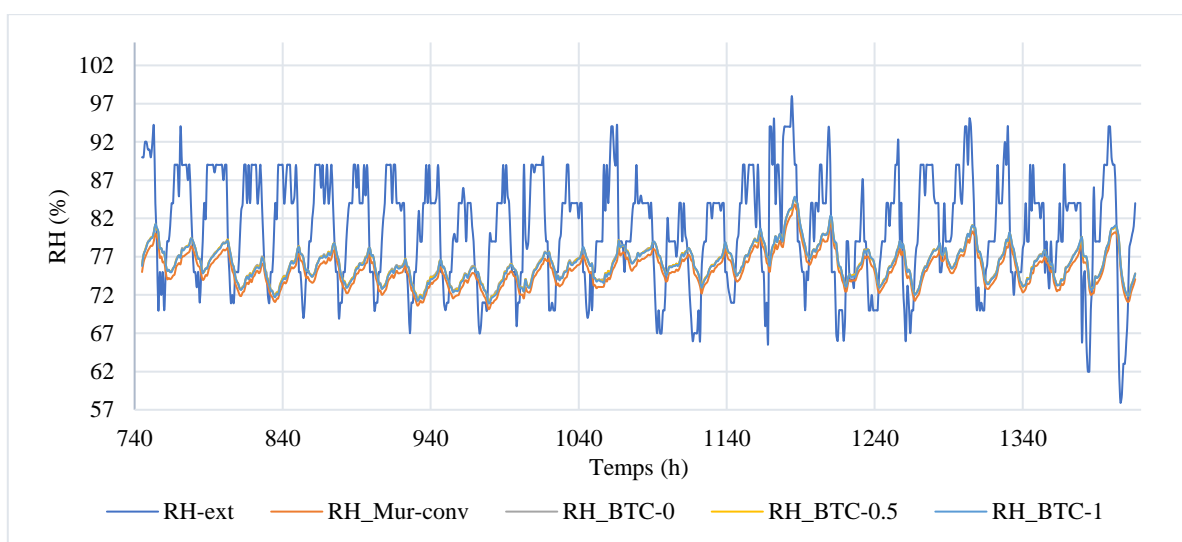
**Figure 5.13:** Comparaison entre les données météorologiques mesurées sur site et celles générées par Meteonorm ; (a) Température ; (b) Température Meteonorm ajustée ; (c) Humidité relative ; (d) Rayonnement solaire global

#### 5.3.4.2 Analyse des conditions hygrothermiques intérieures

Pour des raisons de clarté, les conditions hygrothermiques simulées de l'ambiance intérieure sont présentées pour le mois le plus chaud de l'année, soit le mois de février pendant lequel la température et l'humidité relative moyennes extérieures sont estimées respectivement à 34,7°C et 81%. Les résultats du scénario 1 sont présentés aux Figure 5.14 et Figure 5.15. Sur la Figure 5.14, il peut être observé une légère diminution de la température lorsque l'enveloppe conventionnelle est remplacée par l'enveloppe en argile – paille de chiendent. Ce qui est tout à fait logique en raison des coefficients de transmission de chaleur relativement plus faibles des murs en argile – paille de chiendent par rapport aux murs en matériaux conventionnels. Pour ces derniers, le coefficient de transmission  $U$  est égal 4,63 W/K.m<sup>2</sup> contre 3,24 W/K.m<sup>2</sup> pour l'enveloppe en BTC<sub>8</sub> – 1 et 3,34 W/K.m<sup>2</sup> pour les enveloppes en BTC<sub>8</sub> – 0 et BTC<sub>8</sub> – 0,5. Quant à l'humidité relative de l'environnement intérieur, elle augmente en présence des enveloppes en argile – paille de chiendent. Ce qui est tout à fait contraire au comportement attendu avec une enveloppe hygroscopique. Cependant, cela peut s'expliquer par la désorption d'une partie de l'humidité due aux apports solaires à travers les vitrages. En d'autres termes, l'énergie solaire reçue par les surfaces internes des parois en argile – paille de chiendent provoque l'évaporation d'une partie de l'humidité contenue dans les matériaux et par conséquent l'augmentation de l'humidité relative intérieure. Cette hypothèse a d'ailleurs été confirmée par les résultats du scénario 2 où l'humidité relative baisse lorsque l'ensemble de l'enveloppe conventionnelle est remplacé par les BTC en argile – paille de chiendent (suppression des surfaces vitrées et par conséquent des apports solaires).



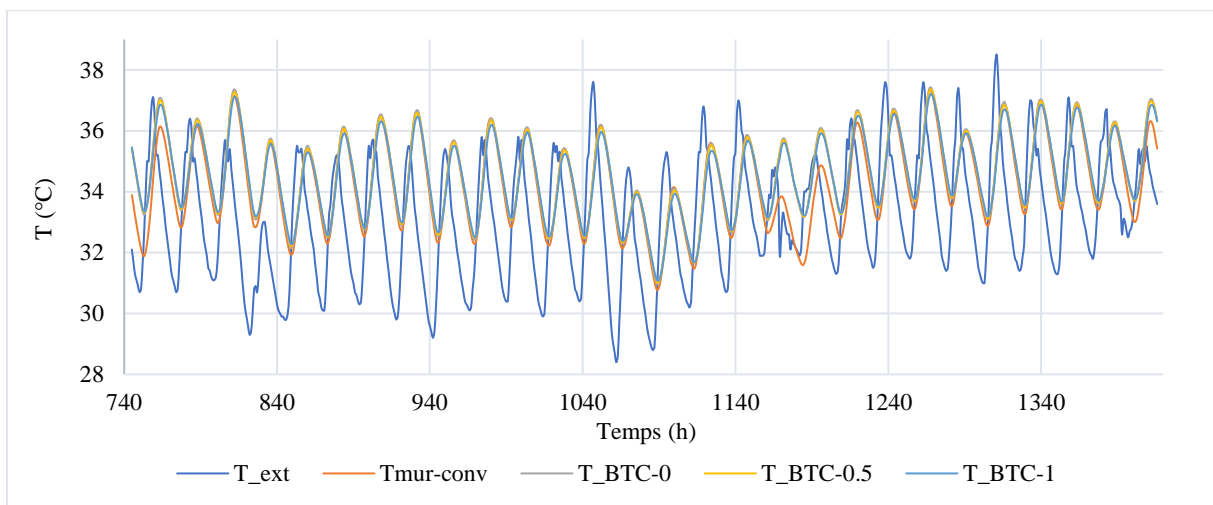
**Figure 5.14:** Variation de la température intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 1



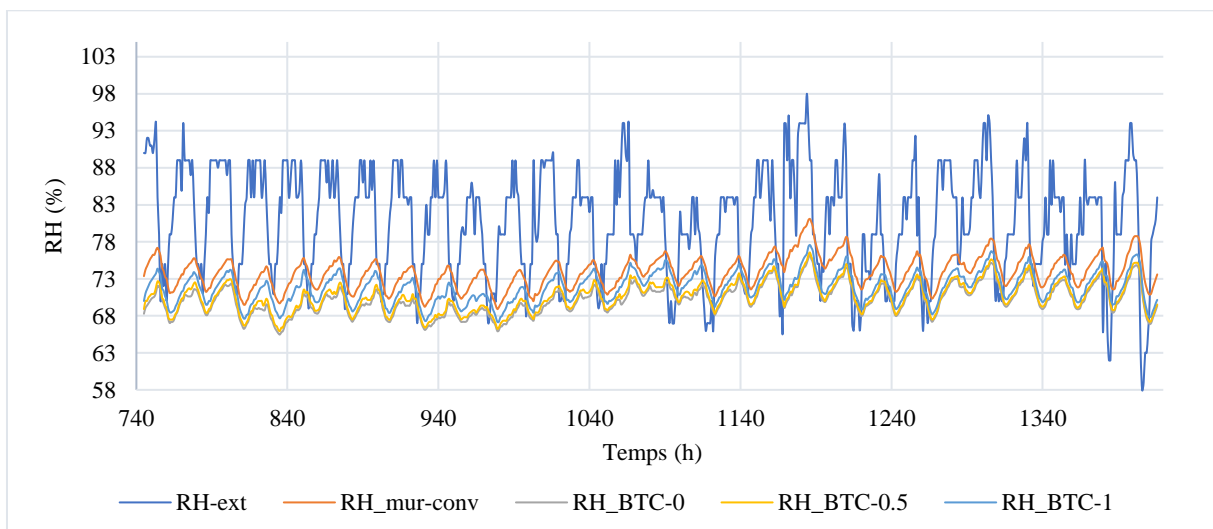
**Figure 5.15:** Variation de l'humidité relative intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 1

En effet, dans le scénario 2, les murs, le plancher et le toit ont dans l'ensemble été remplacés par les matériaux de construction conventionnels et les différentes formulations de BTC en argile – paille de chiendent. Les résultats obtenus à la suite des simulations sont présentés aux Figure 5.16 et Figure 5.17. Comme il peut être observé, une augmentation générale de la température du local est obtenue lorsque l'enveloppe en matériaux conventionnels est remplacée par les enveloppes en argile – paille de chiendent (Figure 5.16). Dans le même temps, l'humidité relative intérieure diminue passant d'une moyenne annuelle de 80% à 76% (Figure 5.17). Quant à l'humidité absolue, elle diminue d'environ 3% pour atteindre une valeur moyenne de 24,3 g/kg. Cela traduit donc l'absorption d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant par les enveloppes en argile – paille de chiendent. Ce phénomène étant exothermique, l'absorption de l'humidité intérieure par l'enveloppe provoque donc un

dégagement de chaleur qui conduit à une augmentation de la température ambiante du milieu. En scrutant de près les conditions hygrothermiques intérieures du local avec les enveloppes en argile – paille de chiendent, la plus forte baisse d’humidité relative est obtenue avec l’enveloppe en  $BTC_8 - 0$  suivie des enveloppes en  $BTC_8 - 0,5$  et  $BTC_8 - 1$ . Cela est d’autant plus normale que les essais de sorptions ont révélé une capacité d’absorption d’humidité plus importante pour le  $BTC_8 - 0$ . Ainsi, plus l’humidité relative diminue, plus de la chaleur est produite à l’intérieur du local. Ce qui justifie l’augmentation continue de la température intérieure du local lorsque l’enveloppe conventionnelle est successivement remplacée par le  $BTC_8 - 1$ ,  $BTC_8 - 0,5$  et le  $BTC_8 - 0$ . Il faut tout de même noter que les variations moyennes observées entre les différentes enveloppes sont très sensibles de l’ordre de  $1^{\circ}\text{C}$  pour la température et  $4\%$  pour l’humidité relative.

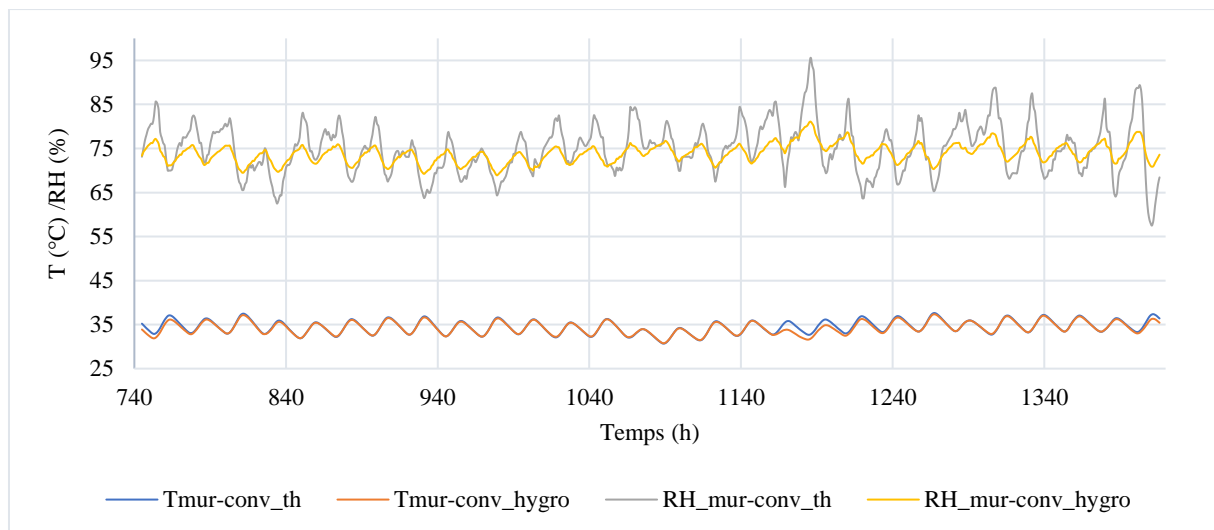


**Figure 5.16:** Variation de la température intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 2.

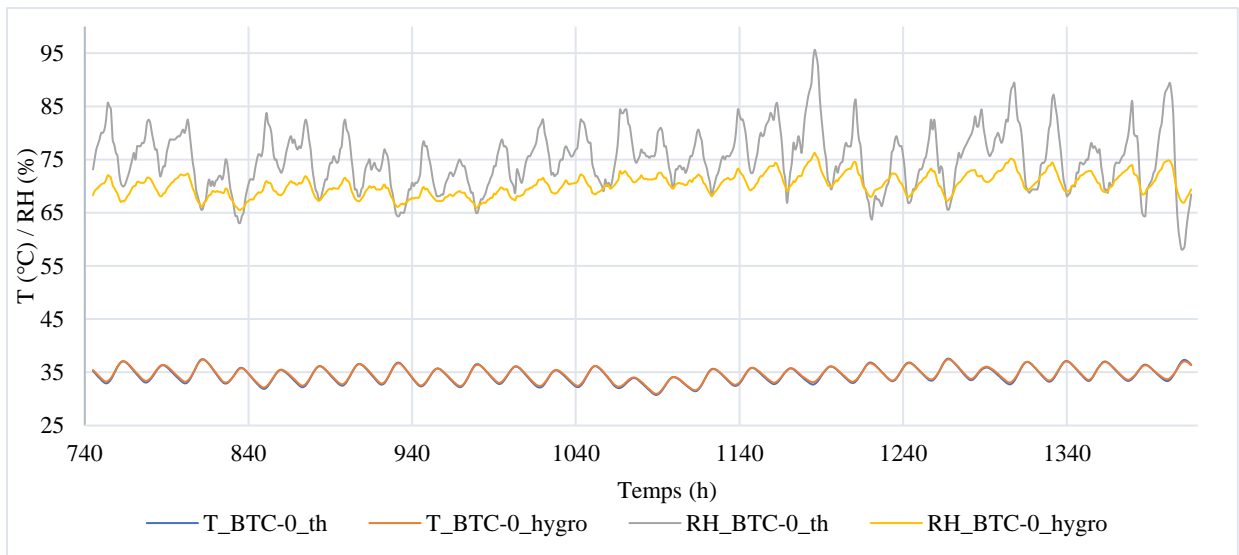


**Figure 5.17:** Variation de l’humidité relative intérieure du local pour les différentes enveloppes dans le scénario 2.

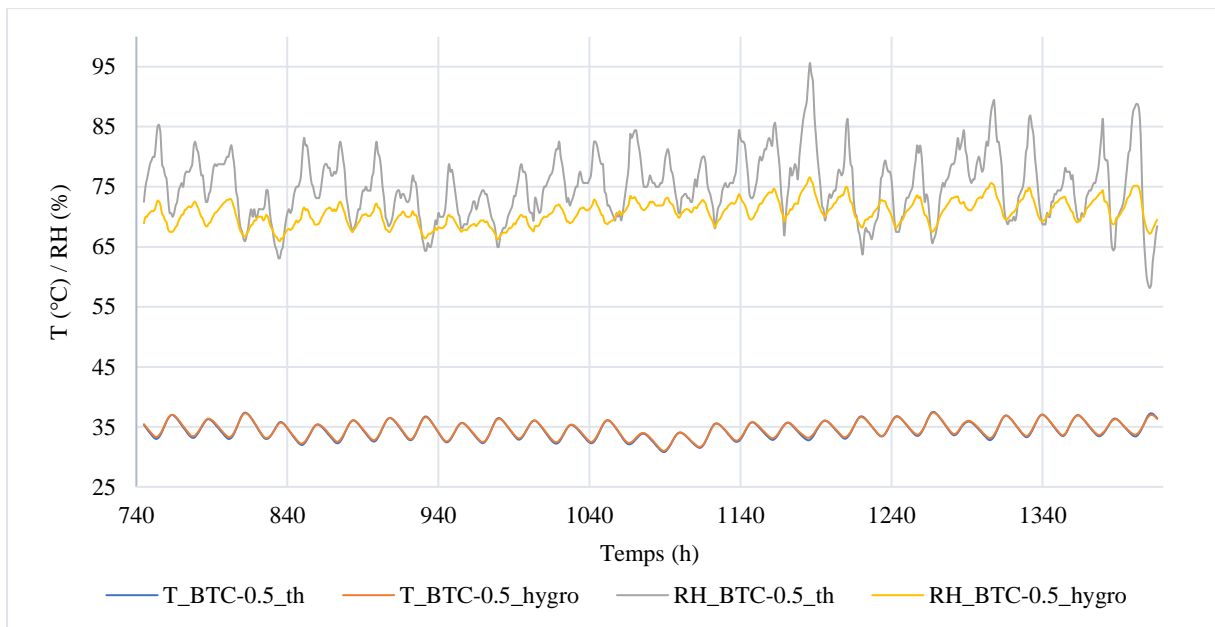
Par ailleurs, l'influence du transfert d'humidité sur les conditions hygrothermiques de l'ambiance, mise en évidence à travers le scénario 3, révèle une fluctuation plus importante de l'humidité relative intérieure lors des simulations thermiques (Figure 5.18). Quel que soit le type d'enveloppe considéré, l'humidité relative varie dans la gamme [24% ; 100%] avec une moyenne annuelle d'environ 80%. Cette moyenne reste inchangée avec la prise en compte du transfert d'humidité à travers l'enveloppe conventionnelle, justifiant la nature très peu hygroscopique de cette dernière. En revanche, lors des simulations hygrothermiques avec les enveloppes en argile – paille de chiendent, un amortissement de la variation de l'humidité relative intérieure a été constaté. Désormais, l'humidité relative fluctue entre [37% ; 87%], avec une moyenne annuelle de 76%. Les enveloppes en argile – paille de chiendent contribuent donc à la régulation passive de l'humidité intérieure et à l'amélioration du confort hygrique. De pareilles observations ont été faites par Belloum et al., (2022) et Schoen et al. (2013). Cependant, tout comme Qin et al. (2009), aucune différence majeure n'a été observée entre les températures ambiantes obtenues à la suite des simulations hygrothermiques et thermiques. Les auteurs affirment donc que le transfert d'humidité à travers l'enveloppe affecte principalement la charge de refroidissement latente.



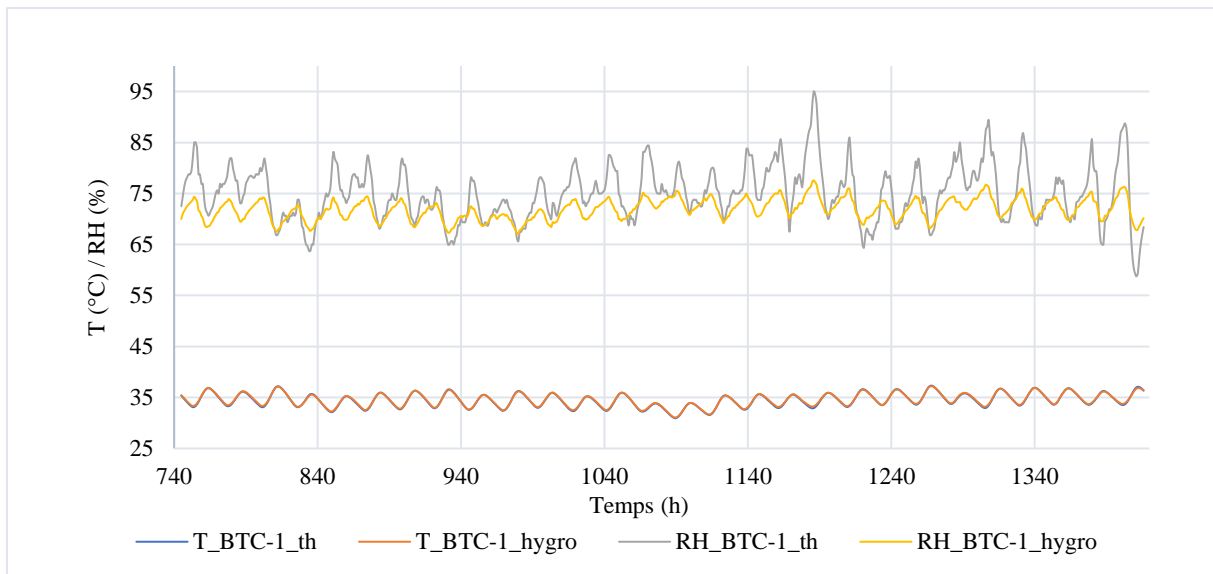
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 5.18:** Comparaison entre les données de température et d'humidité relative entre les simulations hygrothermiques et thermiques avec les enveloppes (a) conventionnelle ; (b)  $BTC_8 - 0$  ; (c)  $BTC_8 - 0,5$  ; (d)  $BTC_8 - 1$

### 5.3.4.3 Charges de climatisation et de déshumidification

L'utilisation des systèmes de conditionnement d'air pour atteindre les conditions de confort hygrothermique a nécessité des dépenses énergétiques annuelles estimées à 11 466,26 kWh pour les charges sensibles et 3741,1 kWh pour les charges latentes lorsque l'enveloppe du bâtiment est en matériaux conventionnels. Pour les enveloppes en argile – paille de chiendent, les charges de climatisation sont estimées à 10 587,8 kWh pour le  $BTC_8 - 0$ , 10 593 kWh pour le  $BTC_8 - 0,5$  et 10 527 kWh pour le  $BTC_8 - 1$ , soient des réductions respectives de 7,66%, 7,61% et 8,2% par rapport à l'enveloppe conventionnelle. Ainsi, une économie moyenne d'environ 900 kWh peut être réalisée sur la charge de climatisation annuelle du local lorsque les murs sont réalisés en argile – paille de chiendent. En ce qui concerne l'énergie nécessaire à la déshumidification de l'ambiance intérieure, la plus faible charge a été obtenue avec l'enveloppe en  $BTC_8 - 1$ , suivie de l'enveloppe en  $BTC_8 - 0,5$  puis en  $BTC_8 - 0$ . Les valeurs annuelles obtenues s'élèvent respectivement à 3640,9 kWh, 3664,16 kWh et 3672,33 kWh contre 3741,86 kWh pour l'enveloppe en matériaux conventionnels. Cette évolution des dépenses énergétiques en fonction de la formulation de BTC utilisée se justifie par la capacité d'absorption et de restitution de l'humidité (*MBV*) plus importante du  $BTC_8 - 1$  ; soit 1,5 fois plus grande que celle du  $BTC_8 - 0$ . Même s'il est évident que les économies d'énergie de déshumidification annuelles sont relativement faibles (de l'ordre de 2,2%), il faut tout de même noter que l'utilisation des BTC en argile – paille de chiendent diminue l'enthalpie spécifique de l'air ambiant également à travers sa composante latente. Selon les prédictions de Qin et al. (2009), des réductions de l'ordre de 10 à 30% de la charge de refroidissement de pointe peuvent être envisagées dans les constructions en matériaux hygroscopiques lorsque ces

dernières sont pré-refroidies avant l'occupation. Cette réduction est de 8,2% dans le présent cas étudié où le pré-refroidissement du local simulé n'a pas été réalisé. Cela confirme donc la capacité des BTC en argile – paille de chiendent à contribuer efficacement à l'amélioration simultanée du confort hygrothermique et de l'efficacité énergétique du local étudié.

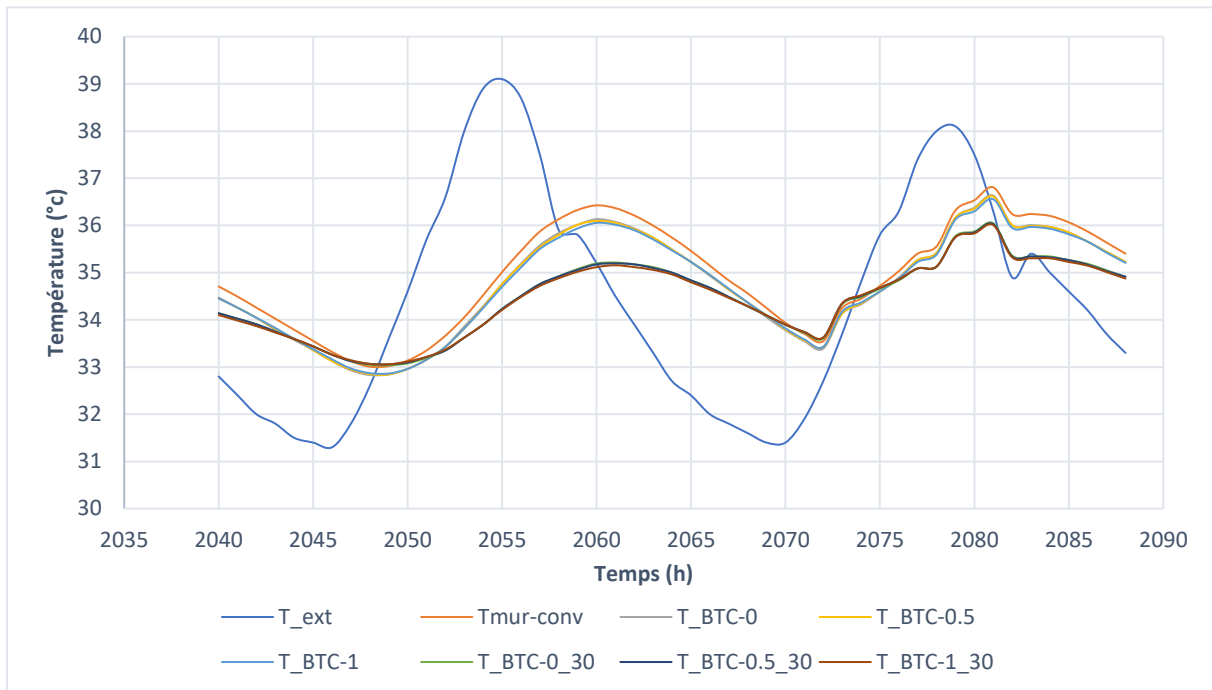
Par ailleurs, les simulations énergétiques effectuées uniquement sur une base thermique mettent en lumière l'hygroscopicité des BTC en argile – paille de chiendent. Pour ces simulations, aucune réduction de la charge de déshumidification n'a été enregistrée avec les enveloppes en argile – paille de chiendent. Qu'il s'agisse de l'enveloppe en matériaux conventionnels ou en BTC, l'énergie de déshumidification est restée inchangée. Quant à la charge de climatisation, une augmentation d'environ 9% est enregistrée quelque soit le type d'enveloppe utilisé.

#### **5.3.4.4 Importance de l'inertie thermique dans la réduction d'énergie**

L'inertie thermique de l'enveloppe joue un rôle important dans l'amélioration du confort thermique. Elle représente la capacité d'une paroi à amortir, stocker et retarder la restitution de la chaleur. Armstrong et al. (2006) définissent l'inertie thermique comme une approche passive et efficace d'amélioration du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments. Elle contribue à l'amortissement des fluctuations de température et au déphasage de l'onde thermique. Son évaluation est nécessaire pour mieux prédire l'influence du comportement thermique de l'enveloppe sur l'ambiance intérieure. A cet effet, des simulations hygrothermiques ont été faites avec des épaisseurs d'enveloppes en argile – paille de chiendent de 20 cm et 30 cm. Pour cette phase de simulation, les systèmes de climatisation et de déshumidification ont été désactivés et les gains internes maintenus. La Figure 5.19 présente l'évolution des températures intérieures simulées par rapport à la température du milieu extérieur sur les deux jours les plus chauds de l'année, soient le 27 et le 28 mars. L'analyse de la figure révèle un amortissement du flux de chaleur selon le type d'enveloppe utilisé. Pour l'enveloppe en matériaux conventionnels, le taux d'amortissement est estimé à 43%. Il est de 42% avec l'enveloppe en argile – paille de chiendent ayant une épaisseur de 20 cm et de 28% pour celle de 30 cm. Cette dernière retarde le pic de température de 6 heures contre 5 heures avec les enveloppes en matériaux conventionnels et en argile – paille de chiendent de 20 cm d'épaisseur. En supposant que la température extérieure atteint son pic journalier à 12h, la température maximale ne sera atteinte qu'à 17h avec l'enveloppe conventionnelle et 18h pour l'enveloppe biosourcée à 30 cm d'épaisseur. Ce comportement thermique de l'enveloppe est intéressant pour les bâtiments de bureaux, notamment au Bénin où la plupart des fonctionnaires des administrations terminent le service à 17h. Ainsi, les systèmes de climatisation seront moins sollicités pendant les périodes d'occupation. Cependant, les taux d'amortissement affichés sont relativement élevés. Même si une amélioration de 14% du taux d'amortissement est observée avec les 30 cm de BTC, l'amortissement de cette enveloppe reste relativement élevé comparativement à certaines valeurs de la littérature. Par exemple, Neya et al. (2021) ont obtenu des taux d'amortissement de 30% et 17% après simulation, sous le climat chaud et sec de Ouagadougou, d'un local dont l'enveloppe en BTC avait respectivement pour



épaisseur 22 cm et 35 cm. Toutefois, les auteurs obtiennent un décalage horaire de 1,8 heures. Ce qui est bien inférieur au déphasage de 6 heures enregistré dans la présente étude.



**Figure 5.19:** Impact de l'inertie thermique sur les conditions thermiques de l'ambiance intérieure

Sur le plan énergétique, le passage d'une épaisseur de 20 à 30 cm des enveloppes en argile – paille de chiendent permet des gains énergétiques de 15% de la charge de refroidissement par rapport à l'enveloppe en matériaux conventionnels. Ces économies représentent près du double de celles obtenues avec une épaisseur de 20 cm. En ce qui concerne les charges de déshumidification, une réduction moyenne de 6,6% a été enregistrée avec l'enveloppe à 30 cm, contre une moyenne de 2,2% pour les enveloppes en argile – paille de chiendent de 20 cm d'épaisseur. Ces résultats montrent l'importance de la masse thermique de l'enveloppe dans la réduction de la consommation énergétique des bâtiments en terre.

## Conclusion

Les performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes en argile – paille de chiendent ont été évaluées grâce à des simulations avec le logiciel Wufi Plus suivant cinq (5) scénarios. Dans le premier scénario où seuls les murs du local simulé ont été remplacés par les différentes formulations du BTC argile – paille de chiendent, une diminution de la température intérieure a été observée avec les enveloppes en terre biosourcée. En revanche, les apports solaires à travers les vitrages ont provoqué une évaporation de l'humidité contenue dans les parois internes du local, entraînant ainsi une hausse de l'humidité relative de l'ambiance. Ce problème a été résolu en supprimant les vitrages dans le scénario 2. Ainsi, en remplaçant la totalité de l'enveloppe par les matériaux étudiés, une baisse de l'humidité relative intérieure a

été observée avec les enveloppes en argile – paille de chiendent par rapport à l’enveloppe en matériaux conventionnels, mettant en avant la nature hygroscopique du matériau terre biosourcée. Cela a d’ailleurs été confirmé dans le scénario 3 où une comparaison a été faite entre les résultats des simulations hygrothermiques et thermiques. Il en ressort que les conditions hygriques de l’ambiance intérieure demeurent presque inchangées avec l’enveloppe en maçonnerie carrelée quel que soit le mode de simulation (hygrothermique ou thermique). Dans ce cas, l’humidité relative varie entre 24% et 100% avec une moyenne annuelle de 80%. Des conditions similaires ont été constatées avec les enveloppes en argile – paille de chiendent lors des simulations thermiques. Par contre, les simulations hygrothermiques effectuées avec les enveloppes en argile – paille de chiendent ont révélé une amélioration des conditions hygriques avec une variation de 37% à 87% de l’humidité relative et une moyenne de 76%.

Pour finir les performances énergétiques des enveloppes en argiles – paille de chiendent ont été étudiées à travers les scénarios 4 et 5. Les économies d’énergie obtenues avec les enveloppes en argile – paille de chiendent d’épaisseur 20 *cm* sont de l’ordre de 3% et 8% respectivement pour les charges de déshumidification et de climatisation. Avec une épaisseur de 30 *cm*, ces économies passent respectivement à 6,6% et 15%. D’où l’impact positif des BTC en argile – paille de chiendent et de leur inertie hygrothermique dans l’amélioration du confort hygrothermique et la réduction de la consommation énergétique des bâtiments.

# CHAPITRE 6

## Essais en chambre climatique

---

### **Sommaire**

Introduction .....	155
6.1 Choix des matières premières .....	155
6.2 Fabrication des BTC en argile – paille de chiendent.....	156
6.3 Construction et instrumentation des parois .....	157
6.4 Déroulement des tests .....	161
6.5 Résultats et discussion .....	162
Conclusion.....	171

## 6. ESSAIS EN CHAMBRE CLIMATIQUE

---

### Introduction

Selon Schoen et al. (2013), l'évaluation de la performance hygrothermique réelle de l'enveloppe d'un bâtiment basée sur les propriétés hygrothermiques du matériau peut s'avérer parfois insuffisante. Selon les auteurs, l'expérimentation à l'échelle d'une paroi fournit des résultats plus proches de la réalité. A ce titre, des essais en chambre climatique ont été réalisés sur une paroi en argile – paille de chiendent dans le laboratoire 'Jacques Geelen' de mon équipe de recherche 'Building Energy Monitoring and Simulation (BEMS)' de l'Université de Liège sur le campus d'Arlon. Pendant cette nouvelle phase expérimentale, le transfert d'humidité et de chaleur à travers une paroi en argile – paille de chiendent sera analysé. L'objectif de l'expérimentation est d'étudier l'influence du transfert couplé de chaleur et d'humidité à travers la paroi sur les conditions hygrothermiques de l'ambiance intérieure et la consommation énergétique du système de climatisation.

### 6.1 Choix des matières premières

L'évaluation expérimentale des performances hygrothermique et énergétique de l'enveloppe en argile – paille de chiendent a été réalisée grâce à des essais en chambre climatique sur une paroi en BTC argile – paille de chiendent. L'approche adoptée dans la présente étude pour la construction de la paroi fait référence à l'étude d'Obonyo et al. (2010) où les auteurs, pour des raisons d'indisponibilité des matières premières (matériau terre de la Tanzanie) dans la région d'implantation du laboratoire d'essai (en Floride aux Etats Unis), ont identifié et utilisé une terre en Floride, semblable à la terre de Dar es Salaam en Tanzanie (objet de leur étude), pour la fabrication de BTC en vue de leur caractérisation en Floride.

En effet, face aux difficultés d'acheminement du Bénin vers la Belgique de la quantité de matières premières nécessaire à la construction de la paroi en argile – paille de chiendent, il a été décidé d'utiliser les matières premières disponibles en Belgique ; notamment l'argile. Pour se faire, une étude bibliographique a été réalisée afin d'identifier une argile belge dont les propriétés géotechniques se rapprochent le plus de celles de l'argile de Zogbodomey au Bénin. Sur les 56 sites échantillonnés par Itulamy (2019), l'argile d'Andenne présente la meilleure ressemblance à l'argile de Zogbodomey (Tableau 6.1). Cette argile a donc été choisie pour la fabrication des BTC en argile – paille de chiendent nécessaires à la réalisation de la paroi. Elle a été prélevée à Bonneville dans la commune d'Andenne au point de coordonnées 50°27'45.60"N et 5° 1'59.71"E.

**Tableau 6.1:** Comparaison entre les propriétés géotechniques des argiles de Zogbodomey et d’Andenne

Propriétés	Argile de Zogbodomey	Argile d’Andenne
<b>1) Minéralogie</b>		
Kaolinite	≈ 54%	38%
Quartz	44%	43%
Hématite	≤ 1%	–
k-feldspath	≤ 1%	–
<b>2) Granulométrie</b>		
≤ 2 μm	58,1%	17%
< 63 μm	69%	96%
< 100 μm	85%	98,1%
< 250 μm	94%	100%
<b>3) Limites d’Atterberg</b>		
Limite liquide	43%	49,6%
Limite plastique	16%	26,8%
Indice de plasticité	27%	22,8%
<b>4) Valeur au bleu</b>		
	0,78	6

## 6.2 Fabrication des BTC en argile – paille de chiendent

La fabrication des BTC en argile – paille de chiendent avec des matières premières disponibles en Belgique a été réalisée dans le ‘Laboratoire des Matériaux de Construction (LMC)’ de l’Université de Liège sur le campus du Sart Tilman. Le matériel utilisé à cet effet se compose principalement d’une presse de compactage identique à celle utilisée pour la fabrication des BTC avec l’argile de Zogbodomey. Cependant, les dimensions du moule utilisé cette fois-ci diffèrent de celles de la première presse (voir section 2.2.2 du chapitre 2). Dans le cas actuel, des blocs de dimensions  $40 \times 20 \times 9,5 \text{ cm}^3$  ont été fabriqués. La formulation des blocs est restée identique à celle du  $BTC_8 - 1$ . Les blocs fabriqués se composent de 54,6% d’argile d’Andenne, 36,4% de concassé 0/5, 8% de ciment Portland, 1% de paille de chiendent et 13,42% d’eau. En tout, une vingtaine de blocs ont été fabriqués (Figure 6.1) puis emballés hermétiquement dans des sacs en plastique pour une cure de 28 jours. Les BTC ont ensuite été séchés à l’étuve à 40°C jusqu’à la stabilisation de leur masse.

Dans la suite du document, les BTC en argile – paille de chiendent fabriqués avec les matières premières disponibles en Belgique seront désignés par  $BTC_{8,Bel} - 1$ .



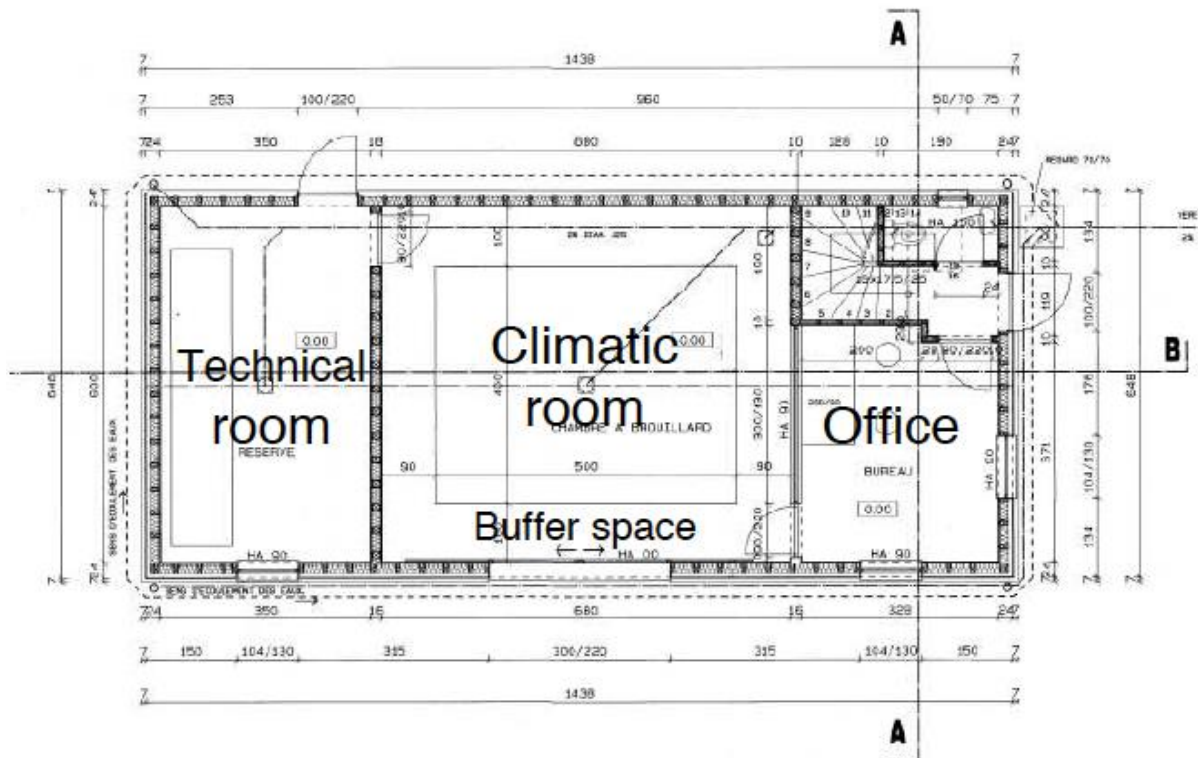
**Figure 6.1:** Les différentes étapes de production des  $BTC_{8\_Bel} - 1$

### 6.3 Construction et instrumentation des parois

L'évaluation expérimentale de la performance hygrothermique et énergétique de la paroi en argile – paille de chiendent a été réalisée en étudiant le transfert couplé de chaleur et de masse à travers la paroi considérée. Pour se faire, une paroi d'environ  $1 \text{ m}^2$ , composée de  $BTC_{8\_Bel} - 1$  a été montée dans le laboratoire BEMS. Il s'agit d'une double enceinte climatique capable de reproduire des scénarios de température et d'humidité souhaités. Elle se distingue de la plupart des chambres climatiques (destinées aux essais de transfert HAM) par sa conception atypique. Le laboratoire dispose d'une première chambre (appelée chambre climatique) de volume  $60 \text{ m}^3$  entouré d'un couloir de 1 m de largeur appelé 'Buffer' (Figure 6.3). Dans le but de limiter les transferts de chaleur et d'humidité entre les deux ambiances, l'enveloppe de la chambre climatique se compose successivement de 1 cm d'OSB (Oriented Strand Board), 14 cm de laine de roche et 1 cm d'OSB ( $U_{paroi} = 0,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Elle comporte également une surface vitrée (double vitrage) de  $3,12 \text{ m}^2$ . La surface interne des parois opaques de la chambre climatique est recouverte d'une peinture hydrofuge pour éviter toute absorption de vapeur d'eau. Les conditions hygrothermiques des deux enceintes sont contrôlées grâce à des systèmes CVC. Cette double enceinte climatique a été mise en œuvre en 2003 pour étudier la luminosité des phares de voiture dans les conditions de brouillard. Elle a cependant été adaptée au fil du temps pour répondre aux différents besoins d'expérimentation nécessités par les projets de recherche conduits par l'équipe BEMS.



**Figure 6.2:** Vue d'ensemble du laboratoire Jacques Geelen



**Figure 6.3:** Plan du rez de chaussée du laboratoire Jacques Geelen sans son extension

Pour construire la paroi en  $BTC_{8,Bel} - 1$ , le vitrage de la chambre climatique a été démonté. Un cadre en bois, surmonté d'isolant a ensuite été réalisé dans l'ouverture du vitrage pour accueillir la paroi. La paroi montée est présentée à la Figure 6.4. Dans le but concentrer le



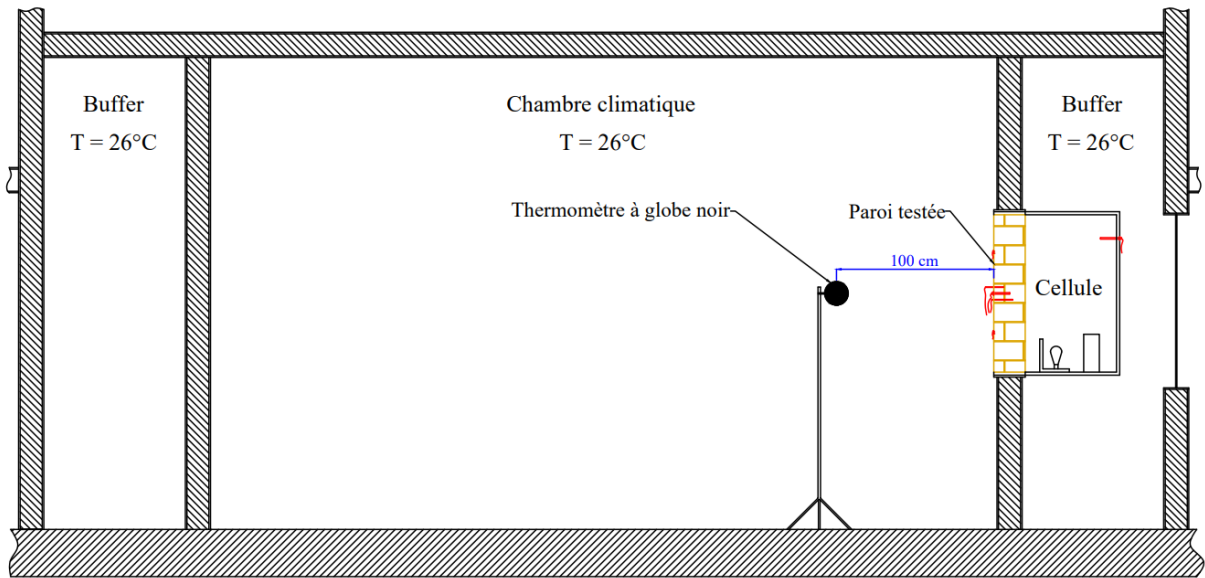
transfert couplé de chaleur et d'humidité uniquement à travers la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$ , une cellule couvrant spécifiquement la face supposée extérieure de la paroi a été réalisée (Figure 6.6). Elle a un volume de  $0,41 \text{ m}^3$  et est installée du côté Buffer. A l'intérieur de cette dernière, des générateurs de chaleur (lampe à incandescence de puissance modulable) et d'humidité (humidificateur à ultrason) ont été installés (Figure 6.7) afin de reproduire les conditions hygrothermiques du climat béninois. L'enveloppe de la boîte a été réalisée avec des panneaux d'isolation en polyuréthane de 3 cm d'épaisseur afin de minimiser les transferts hygrothermiques entre la cellule et le Buffer. Ainsi, il peut être supposé que toute la chaleur et l'humidité produites dans la cellule sont transférées à travers la paroi en argile – paille de chiendent. La couche d'isolant placée sur la surface latérale de la paroi permet de considérer le transfert unidirectionnel suivant l'épaisseur. Deux capteurs de température (PT100) ont été noyés dans la paroi à 6 et 12 cm de la surface intérieure, de même qu'un capteur de température et d'humidité relative insérés à une profondeur de 10 cm (Figure 6.7). Pour finir, deux thermocouples de type K ont été placés sur la face intérieure de la paroi (Figure 6.4). Toute cette instrumentation vise à surveiller l'évolution de la température et de l'humidité à travers l'épaisseur de la paroi. Les conditions hygrothermiques de part et d'autre de la paroi sont surveillées par deux capteurs de température et d'humidité.

Pour comparer les performances hygrothermiques et énergétiques de l'enveloppe en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  à celles d'une enveloppe en matériau conventionnelle, une paroi en bloc de béton creux de même superficie que celle en argile – paille de chiendent a été construite (Figure 6.6). L'instrumentation (cellule et capteurs) est la même que celle de la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$ . Lors des tests d'évaluation de performance d'une paroi, les générateurs de chaleur et d'humidité installés au niveau de la seconde paroi restent éteints et la cellule est ouverte afin d'avoir les mêmes conditions hygrothermiques que dans le Buffer.

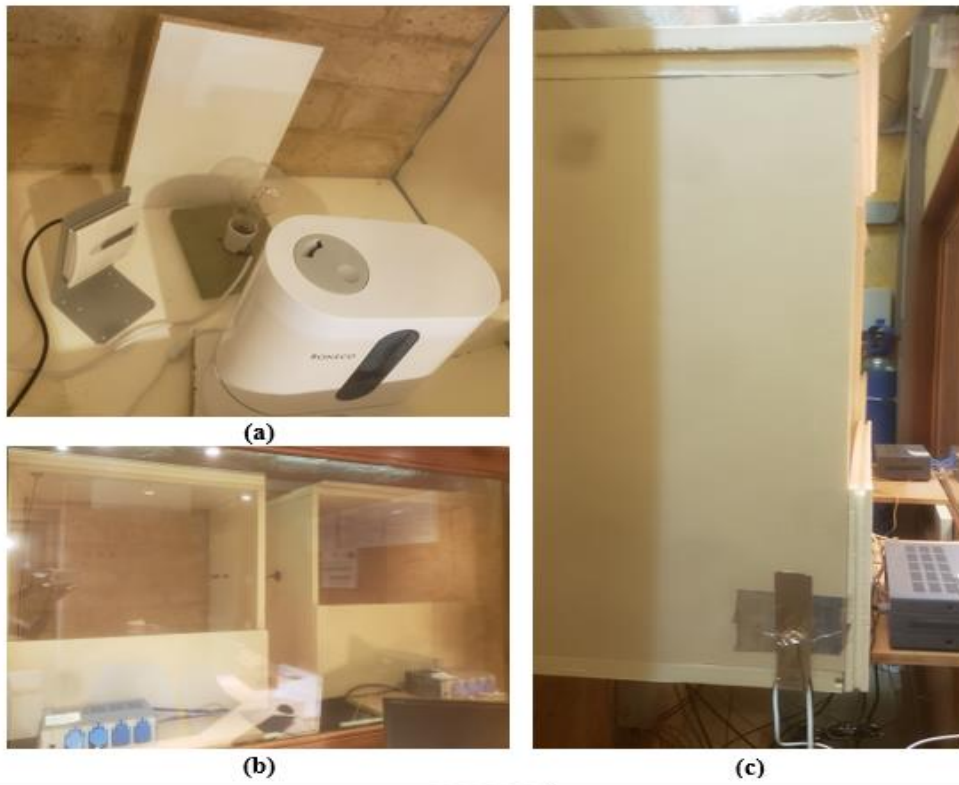


**Figure 6.4:** Instrumentation des parois en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  et en blocs de béton creux

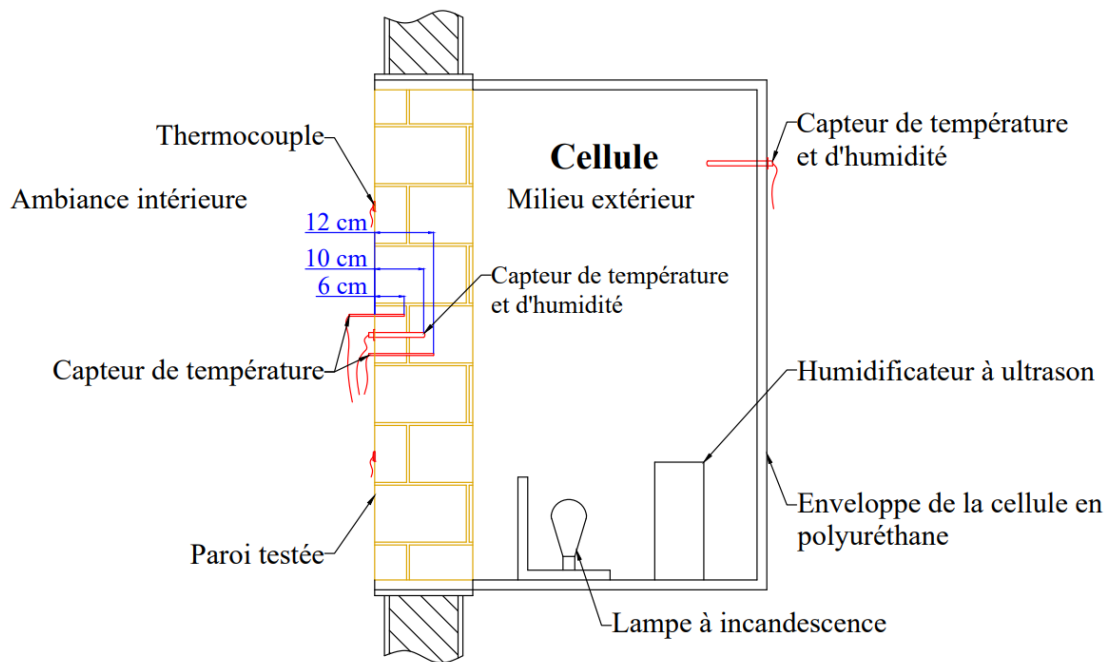




**Figure 6.5:** Schéma descriptif de l'installation



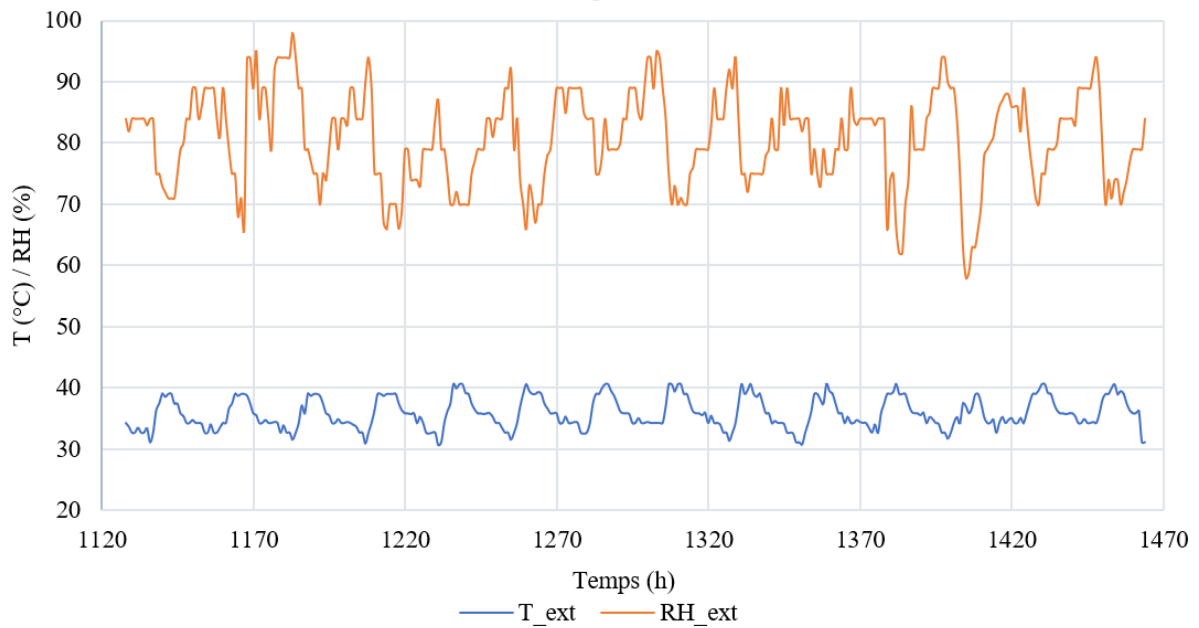
**Figure 6.6:** Cellules



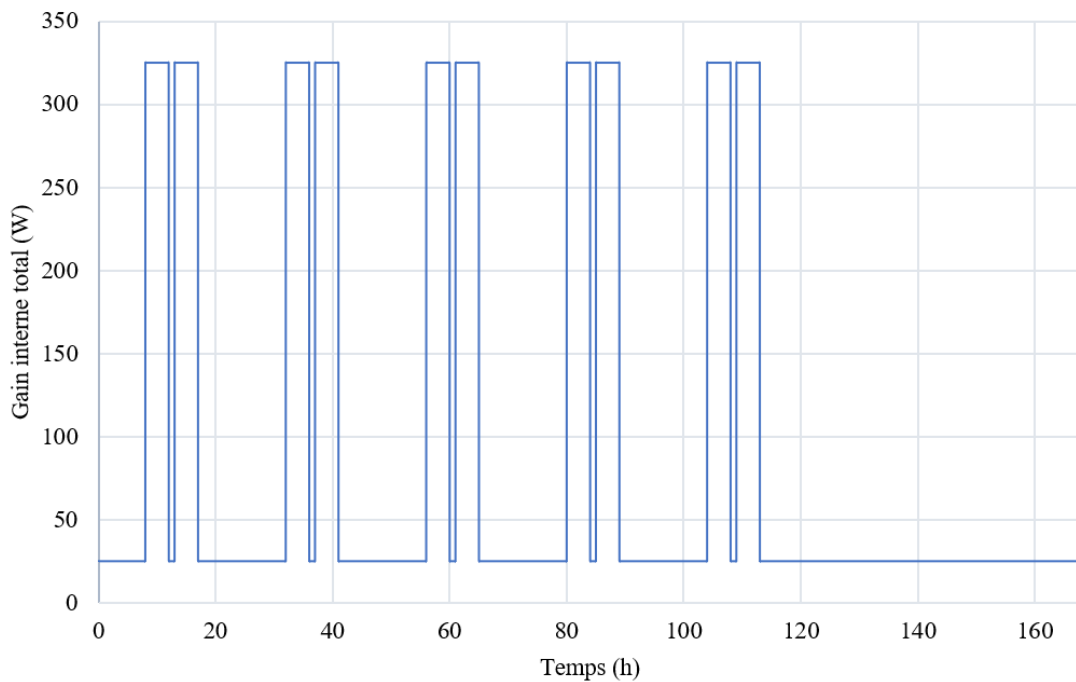
**Figure 6.7:** Schéma descriptif de l'instrumentation d'une paroi testée

#### 6.4 Déroulement des tests

L'évaluation des performances hygrothermique et énergétique des parois a débuté par une phase de pré-conditionnement de 3 à 5 jours. Pendant cette phase, les deux enceintes (chambre climatique et Buffer) sont restées à la même température et humidité, soient 26°C et 40%. Les cellules où les conditions hygrothermiques du climat de la ville de Cotonou doivent être reproduites sont restées ouvertes pendant la période de pré-conditionnement pour qu'il y règne les mêmes conditions hygrothermiques que dans le Buffer. Un scénario (Figure 6.8) simulant les conditions hygrothermiques des deux semaines les plus chaudes de l'année (du 17 février au 2 mars) à Cotonou a été exécuté successivement dans les deux cellules disposées au niveau des deux parois. Une phase de mise en régime a été respectée afin que les conditions de départ soient similaires. Dans ce scénario, la température et l'humidité varient entre [34,3°C ; 40,6°C] et [58% ; 98%] avec des moyennes respectives de 35,9°C et 80,6%. A l'intérieur de la chambre climatique, la température a été maintenue à 26°C ; l'idée étant de quantifier les charges de climatisation nécessaires au maintien de la température de consigne malgré les apports de chaleur à travers chacune des deux parois. Par ailleurs, un gain de chaleur interne, variant de 25 à 325 W et correspondant aux gains provenant des personnes et équipements électriques (ordinateurs, imprimante, etc), a été imposé dans la chambre climatique pour des périodes d'occupation allant du lundi au vendredi de 8h à 17h (Figure 6.9). Il a été généré par une résistance électrique dont la puissance a été modulée pour correspondre au scénario établi. Pour éviter toute nouvelle source d'apport ou de perte chaleur, notamment à travers l'enveloppe de la chambre climatique, la température du Buffer a également été fixée à 26°C. Les données recherchées et mesurées grâce aux différents capteurs installés ont été enregistrées tout au long des tests avec un pas de temps de 10 secondes.



**Figure 6.8:** Scénario de température et d'humidité relative de l'air extérieur



**Figure 6.9:** Scénario de gains internes sur une semaine

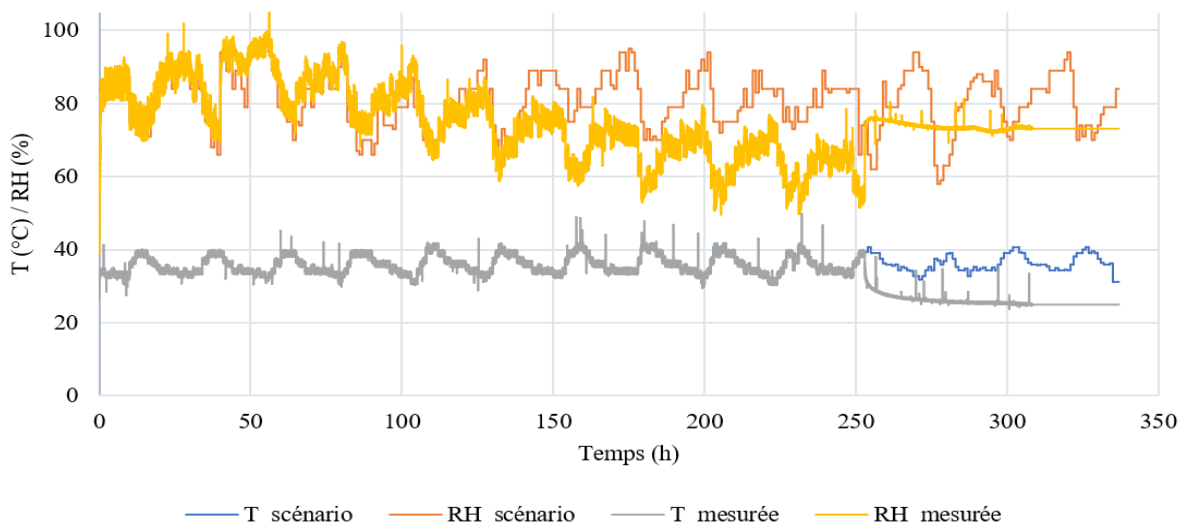
## 6.5 Résultats et discussion

### 6.5.1 Conditions hygrothermiques de réalisation des tests

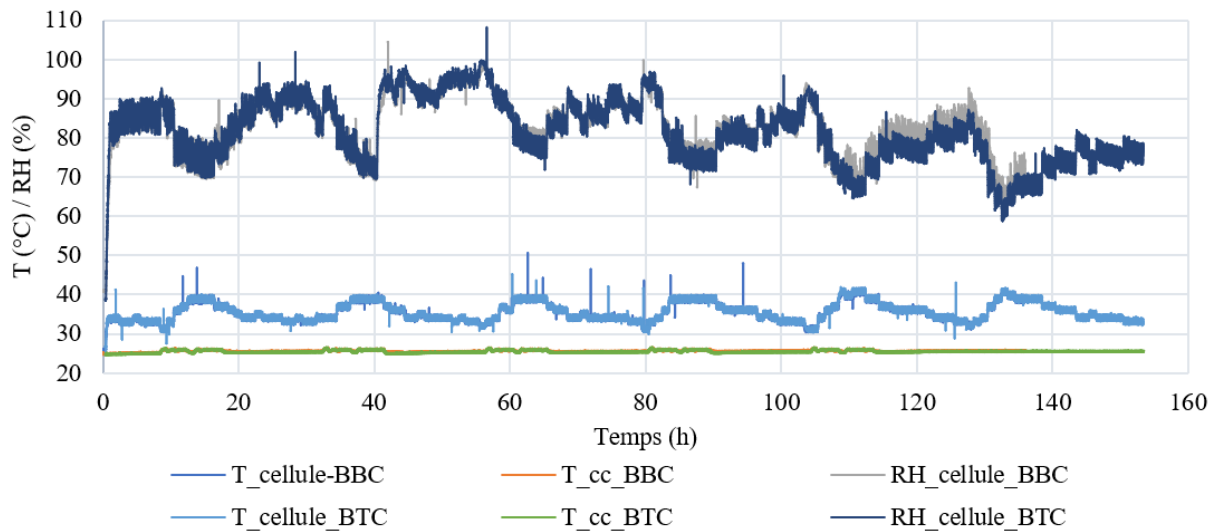
Lors de l'exécution du scénario pour le test sur la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  (test 1), les données de température et d'humidité enregistrées dans la cellule sont présentées à la Figure 6.10. En comparant ces dernières aux données de consigne, il peut être affirmé que le scénario a été bien respecté (bonne reproduction de la température de consigne). En ce qui concerne l'humidité, le

scénario a été respecté les 5 premiers jours, mais au-delà, un arrêt involontaire de l’humidificateur a perturbé l’exécution correcte de la suite du scénario prédéfini. Dès lors, une différence a été observée entre les humidités de consigne et celle mesurées dans la cellule. Cependant, les taux d’humidité relative mesurés dans la cellule restent représentatifs des conditions hygriques du climat de la ville de Cotonou puisqu’ils se situent dans la plage d’humidités relatives enregistrées lors de la campagne de surveillance du bâtiment d’étude, soit [50% ; 97%]. Ainsi, le nouveau scénario obtenu dans la cellule peut être considéré comme représentatif du climat tropical humide de la ville de Cotonou. De plus, le test programmé pour durer 14 jours a dû prendre fin 2 jours plus tôt à cause d’une panne d’électricité. Ce faisant, pour effectuer une analyse comparative pertinente entre les performances hygrothermiques et énergétiques des deux parois, le nouveau scénario obtenu dans la cellule du  $BTC_{8\_Bel} - 1$  a été reproduit dans la cellule de la paroi en blocs de béton creux pour un test réalisé sur une période de 12 jours.

Par ailleurs, la Figure 6.11 compare les données hygrothermiques enregistrées dans les deux cellules et les données thermiques mesurées dans la chambre climatique et le Buffer pendant le déroulement des deux tests. Comme il peut être observé, les conditions hygrothermiques dans les deux cellules au cours des tests sont presque identiques. Les légères différences observées au niveau des humidités relatives ( $\leq 4\%$ ) lors des deux tests peuvent être attribuées à la précision des capteurs d’humidité ( $\pm 5\%$ ). Quant aux températures enregistrées dans les deux enceintes climatiques, aucune différence majeure n’est à signaler. Elles restent constantes, autour des  $26^\circ\text{C}$  fixées pour ces deux enceintes avec une moyenne de  $25,5^\circ\text{C}$ . On peut donc considérer que les performances hygrothermiques et énergétiques des deux parois ( $BTC_{8\_Bel} - 1$  et BBC) sont évaluées dans les mêmes conditions. Il faut cependant noter qu’aucune régulation n’est appliquée à l’humidité relative de la chambre climatique ; l’idée étant d’analyser l’influence du transport d’humidité à travers les parois, sur l’humidité relative de l’enceinte climatique.



**Figure 6.10:** Comparaison entre les températures et humidités de consigne et celles mesurées dans la cellule de  $BTC_{8\_Bel} - 1$



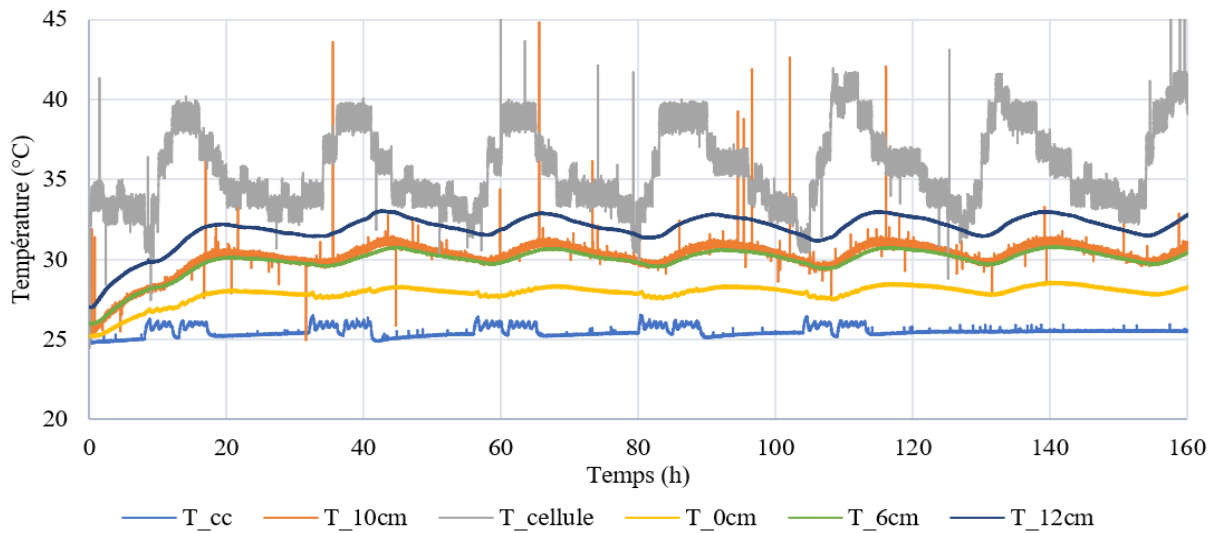
**Figure 6.11:** Conditions hygrothermiques dans les différentes enceintes au cours des tests

### 6.5.2 Analyse du transfert couplé de chaleur et de masse à travers les parois

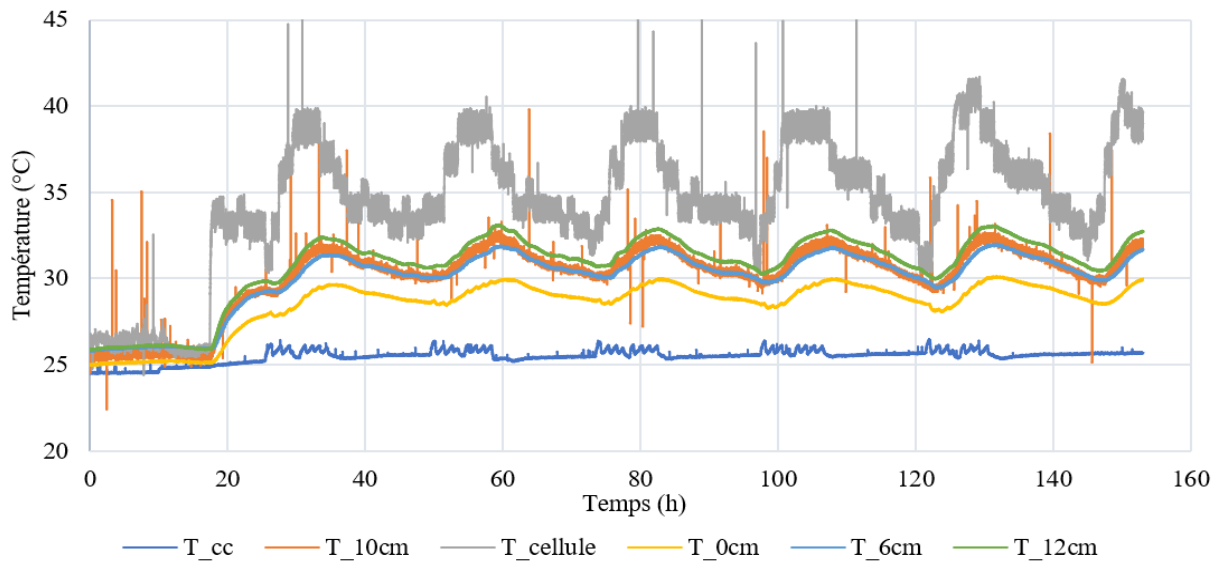
Les transferts de chaleur au sein des parois ont été mesurés par les capteurs de température placés à 12, 10, 6 et 0 cm de profondeur par rapport à la surface intérieure des parois. Les figures 6.12 et 6.13 illustrent les évolutions de la température suivant les profondeurs d'implantation des capteurs dans les parois en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  et en BBC respectivement. Sur les deux graphes, une décroissance de la température peut être observée en fonction de la distance par rapport à la surface extérieure (diminution de la profondeur). A 12 cm de profondeur (soit une épaisseur de matériau de 8 cm par rapport à la surface extérieure de la paroi), les températures mesurées fluctuent entre  $[31,1^{\circ}C ; 33,1^{\circ}C]$  pour la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  contre  $[29,9^{\circ}C ; 33,1^{\circ}C]$  pour la paroi en BBC pendant que la température de la cellule variait entre  $30^{\circ}C$  et  $41,7^{\circ}C$  (Figure 6.14). En supposant que la température des surfaces extérieures des parois est égale à la température dans les cellules, le taux d'amortissement de la chaleur à 12cm de profondeur est évalué à 15,8% avec un déphasage de 3,5 heures pour la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$ . Quant à la paroi en BBC, l'amortissement est de 28% pour un déphasage estimé à 2,5 heures. Les Figure 6.14a, b et c comparent les évolutions de température à 10, 6 et 0 cm de profondeur. L'analyse de ces graphes révèle une diminution des fluctuations thermiques au fur et à mesure que l'épaisseur du matériau augmente. Les températures moyennes mesurées à ces profondeurs sont respectivement de  $30,4^{\circ}C$ ,  $30,1^{\circ}C$  et  $28,4^{\circ}C$  pour la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$ . Ces dernières passent respectivement à  $31^{\circ}C$ ,  $30,8^{\circ}C$  et  $29,2^{\circ}C$  lorsqu'il s'agit de la paroi en BBC. Ainsi, une réduction moyenne de l'ordre de  $0,7^{\circ}C$  s'opère dans la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$ . Les taux d'amortissement et les déphasages thermiques aux différentes profondeurs d'implantation des capteurs sont illustrés à la Figure 6.15. L'amortissement de la température à la surface intérieure de la paroi  $BTC_{8\_Bel} - 1$  est de 10,5% contre 17,5% pour la paroi BBC. Cette dernière retarde la transmission du flux de chaleur de la surface extérieure à la surface

intérieure de 3 heures ; soit moins de la moitié du déphasage thermique obtenu avec le  $BTC_{8\_Bel} - 1$  (6,8 heures).

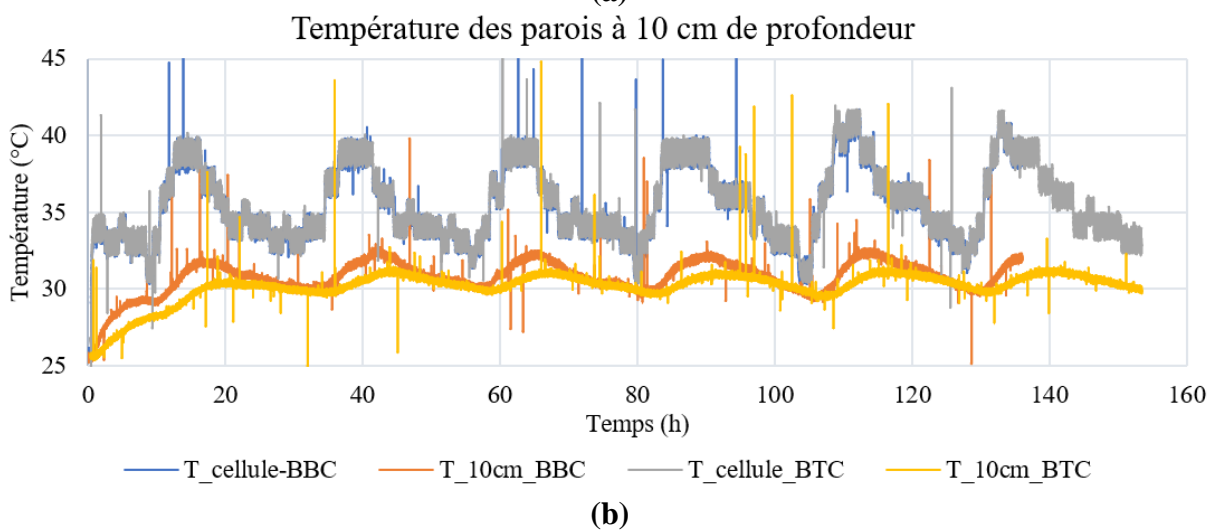
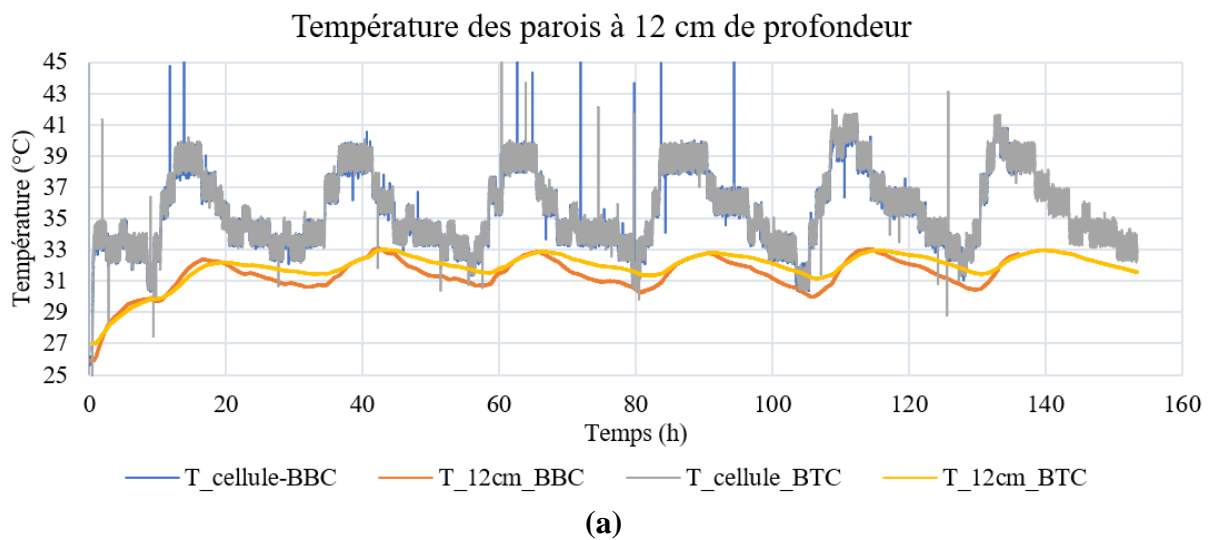
Cependant, l'influence du transfert d'humidité sur le transfert de chaleur à travers les parois n'a pu être mis en évidence en raison du temps trop court pour la réalisation des tests. Toutefois, la surveillance du transfert d'humidité, réalisé grâce aux capteurs de température et d'humidité implantés dans les parois à 10 cm de profondeur, révèle une meilleure capacité de stockage du  $BTC_{8\_Bel} - 1$ . L'humidité relative moyenne mesurée dans la paroi  $BTC_{8\_Bel} - 1$  au cours de l'essai est de 90,3%. Sur la Figure 6.12, l'humidité relative au sein de la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  paraît constante tout au long du test alors que dans la paroi en BBC, l'humidité relative évolue progressivement de 68,8% à 79,8% après 136 heures d'expérimentation. Cette différence de comportement entre les deux parois peut s'expliquer par la nature hygroscopique de la paroi en terre biosourcée ( $BTC_{8\_Bel} - 1$ ). Cette dernière présente l'avantage d'absorber et de restituer plus facilement l'humidité en fonction des conditions environnementales.



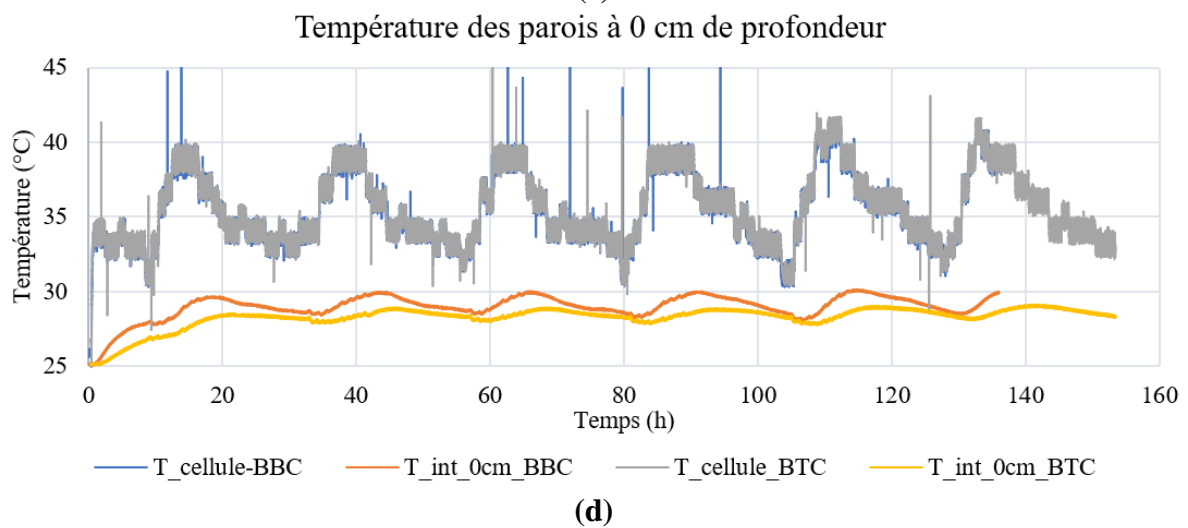
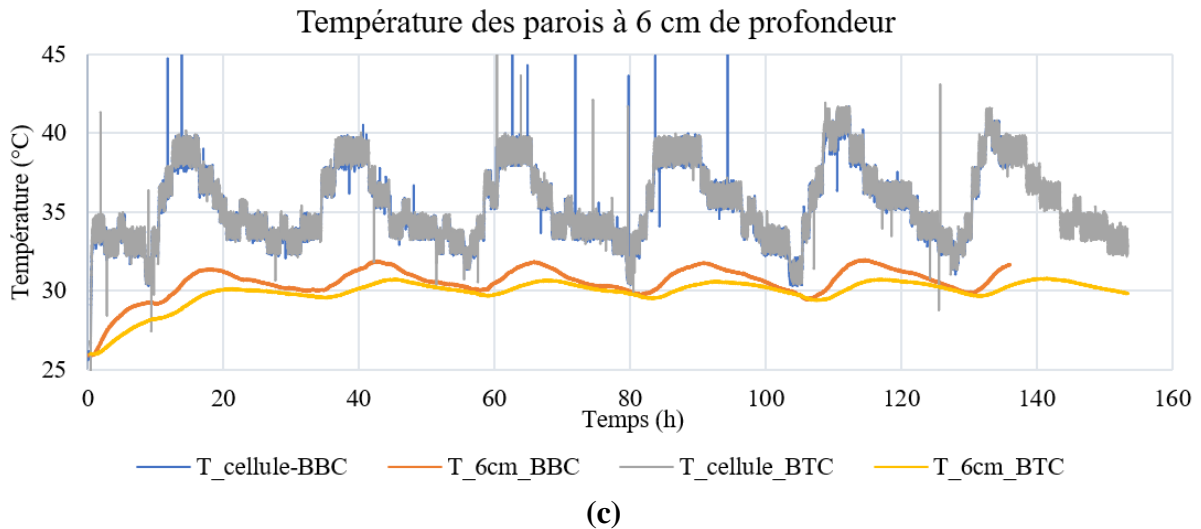
**Figure 6.12:** Evolution de la température à travers la paroi  $BTC_{8\_Bel} - 1$



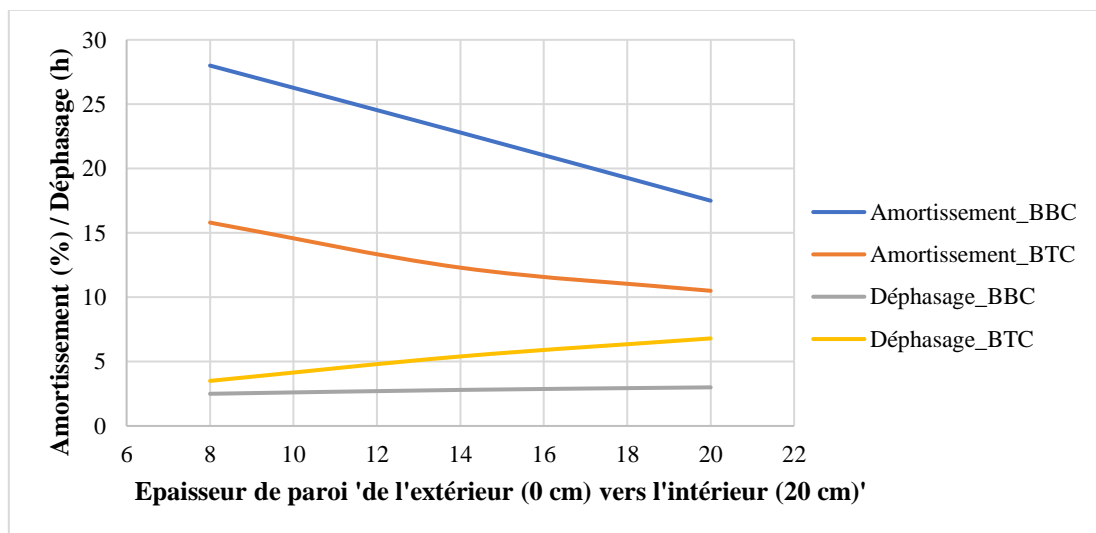
**Figure 6.13:** Evolution de la température à travers la paroi BBC





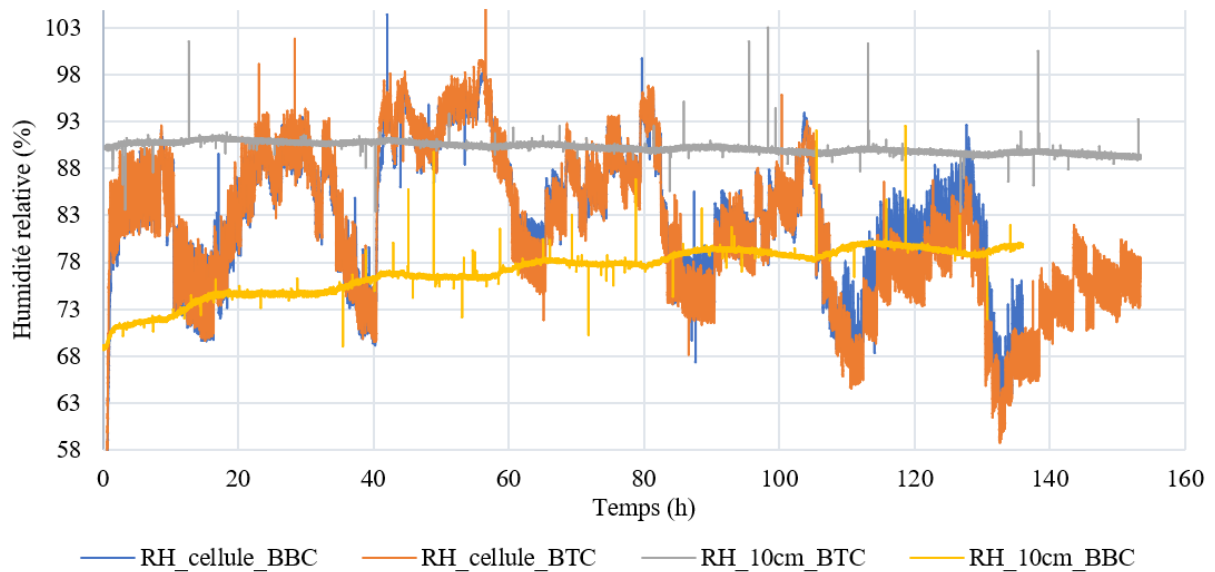


**Figure 6.14:** Evolution de température au sein des parois à des profondeurs de : (a) 12 cm ; (b) 10 cm ; (c) 6 cm ; (d) 0 cm



**Figure 6.15:** Taux d'amortissement et déphasage en fonction de la profondeur d'implantation des capteurs dans les parois

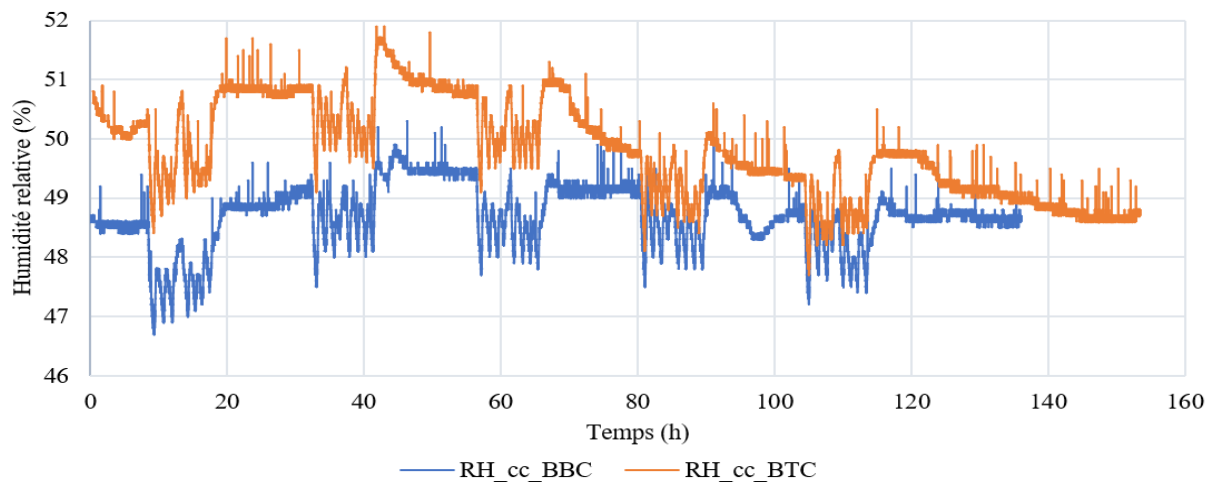




**Figure 6.16:** Evolution de l'humidité relative au sein des parois

### 6.5.3 Conditions hygrothermiques dans l'enceinte climatique

L'utilisation d'un système de climatisation pour la régulation thermique de l'enceinte climatique ne permet pas d'apprécier, sur le plan de la température, l'influence des transferts hygrothermiques à travers les parois sur l'ambiance intérieure. Cependant, étant donné qu'aucune régulation n'a été appliquée pour l'humidité relative de la chambre climatique, une attention particulière peut être portée à la variation de ce paramètre pendant les tests. Ainsi, la Figure 6.17 illustre l'évolution de l'humidité relative de l'enceinte au cours des deux tests. Comme il peut être constaté, l'influence du transfert d'humidité à travers l'épaisseur des parois n'a pas clairement pu être mise en évidence. Les variations observées entre les humidités relatives de l'enceinte climatique pendant les deux tests sont de l'ordre de 2%. Ce qui est relativement faible pour tirer une conclusion pertinente quant à l'influence du transfert d'humidité à travers les parois testées sur l'humidité relative de la chambre climatique. Cela peut être d'une part dû au volume important de la chambre ( $60 \text{ m}^3$ ) par rapport à la surface de la paroi considérée ( $\approx 1 \text{ m}^2$ ) et d'autre part à la précision des capteurs de mesure ( $\pm 5\%$ ).



**Figure 6.17:** Humidité relative de l'enceinte climatique au cours des deux tests

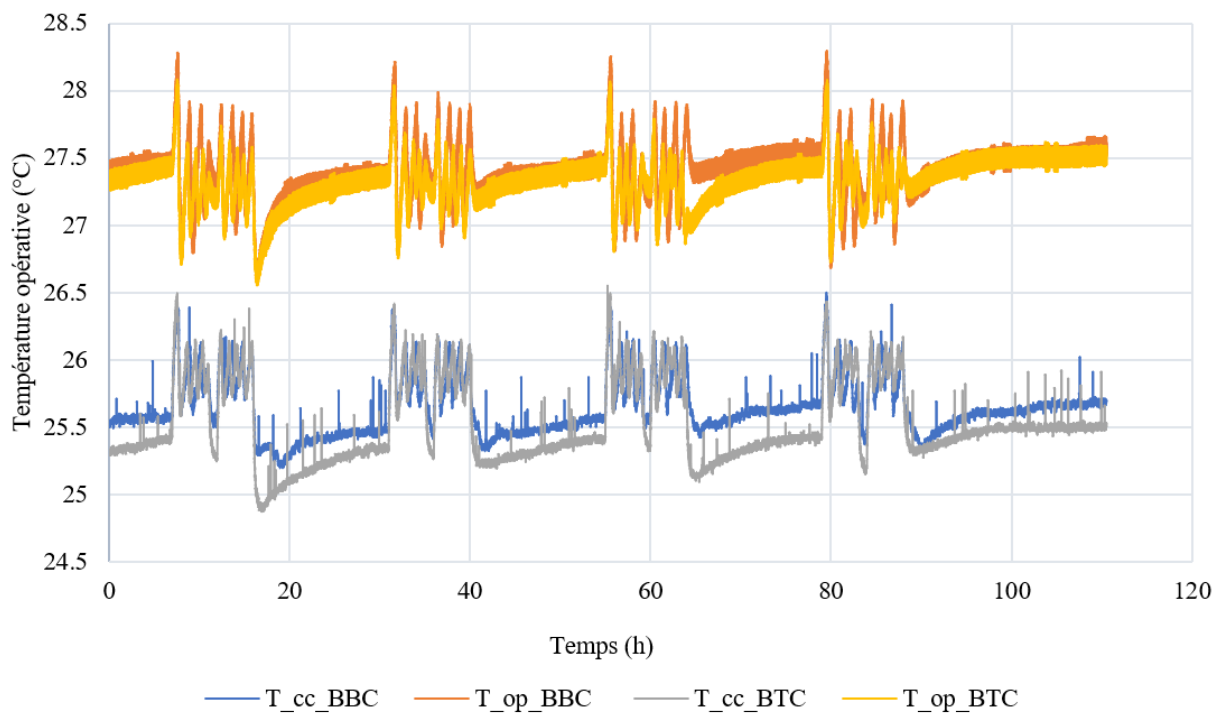
#### 6.5.4 Impact du $BTC_{8\_Bel} - 1$ sur le confort thermique

L'un des principaux facteurs environnementaux dont dépend le confort thermique d'un individu est la température résultante ou « opérative » ( $T_{op}$ ) du milieu. Cette dernière est considérée comme la température réellement ressentie par les occupants. Elle combine les effets de la température de l'air et de la température moyenne radiante et peut être mesurée grâce à un thermomètre à globe noir. Il s'agit d'un appareil constitué principalement d'une boule de couleur noire, d'environ 15 cm de diamètre à l'intérieur de laquelle la température résultante ou « opérative » est mesurée.

Ainsi, lors de chaque test, le thermomètre à globe noir est placé à une distance de 1m par rapport à la paroi concernée et à une hauteur de 1,5 m (Figure 6.18). La Figure 6.19 présente les évolutions des températures résultantes pendant les tests. Sur le même graphique, la température de l'air ambiant dans l'enceinte climatique ( $T_{cc}$ ) y est représentée. Au cours des deux tests, la température moyenne de l'air dans l'enceinte est de 25,6°C. Les températures résultantes moyennes mesurées sont respectivement de 27,5°C et 27,3°C pour les parois en BBC et  $BTC_{8\_Bel} - 1$ . Dans un contexte de refroidissement, une température radiante élevée constitue une source d'inconfort. La recherche du confort thermique nécessitera alors plus d'énergie. De ce fait, avec 0,2°C de moins que la température opérative mesurée auprès de la paroi en BBC, un local en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  consommera moins d'énergie. Même si l'écart observé entre les deux températures paraît faible, il faut garder à l'esprit qu'il n'a été obtenu qu'avec une surface d'environ 1 m<sup>2</sup> par rapport à une surface latérale de 54 m<sup>2</sup>. Une différence plus importante peut donc être attendue si l'ensemble de la surface latérale de chambre était réalisé avec les matériaux étudiés. D'où l'impact positif du  $BTC_{8\_Bel} - 1$  sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments.



**Figure 6.18:** Thermomètre à globe noir

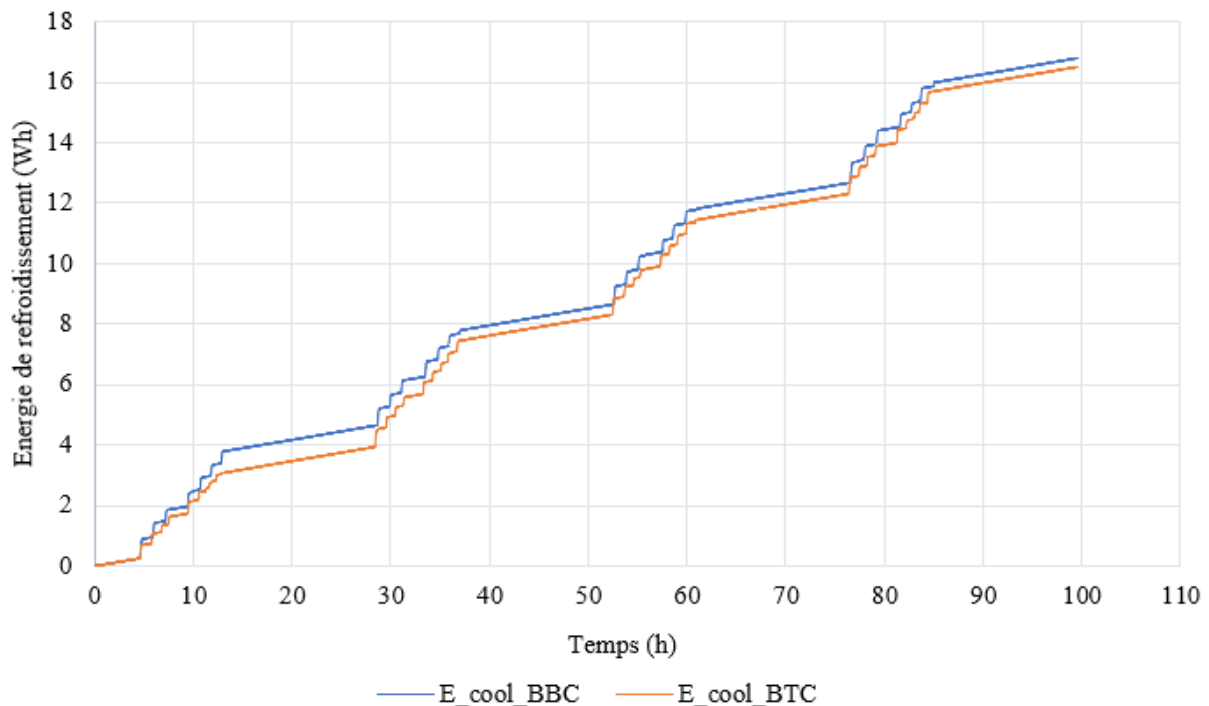


**Figure 6.19:** Comparaison entre les températures opératives obtenues avec les deux parois

### 6.5.5 Performances énergétiques des parois

Cette section analyse l'énergie consommée par le système de climatisation pour maintenir l'enceinte climatique à la température de consigne malgré les apports successifs de chaleur à travers les deux parois. Les consommations énergétiques sur une période donnée de l'expérimentation sont illustrées à la Figure 6.20. Lors du premier test, impliquant la paroi en

$BTC_{8\_Bel} - 1$ , l'énergie consommée pendant 100 heures d'expérimentation est égale à 16,504 kWh. Elle est 16,796 kWh avec la paroi en BBC. Ainsi, la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  a permis une économie d'énergie de 0,296 kWh, soit une réduction de 1,74% par rapport à la consommation enregistrée avec la paroi en BBC. Même si le gain énergétique reste relativement faible, il faut noter qu'il a été obtenu avec une paroi d'environ  $1 \text{ m}^2$  pour un volume à climatiser de  $60 \text{ m}^3$ . Ainsi, malgré les difficultés à réaliser une estimation précise des gains énergétiques pouvant être obtenus avec une enveloppe en argile – paille de chiendent sur l'ensemble d'un bâtiment, la présente expérimentation permet de confirmer la bonne performance énergétique des BTC en argile – paille de chiendent.



**Figure 6.20:** Energies de refroidissement pendant les tests

## Conclusion

L'objectif de cette expérimentation était d'analyser le comportement hygrothermique de l'enveloppe en argile – paille de chiendent à l'échelle d'une paroi dans le climat de la ville de Cotonou et d'évaluer son impact sur la consommation énergétique d'un local. En utilisant des matières premières de la Belgique, une paroi en  $BTC$  argile – paille de chiendent ( $BTC_{8\_Bel} - 1$ ) d'environ  $1 \text{ m}^2$  a été réalisée au sein du Laboratoire Jacques Geelen de l'Université de Liège. Dans le même temps, une paroi similaire en blocs de béton creux (BBC) a été construite pour servir d'élément de comparaison. L'instrumentation associée à ces deux parois a permis de reproduire les conditions hygrothermiques du climat de la ville de Cotonou au Bénin et de surveiller les transferts de chaleur et d'humidité à travers ces parois. Les tests ont duré environ deux mois et les résultats obtenus permettent d'affirmer que la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  présente

une meilleure performance hygrothermique que la paroi conventionnelle en BBC. Pour preuve, les taux d'amortissement du flux de chaleur enregistrés à des profondeurs de 12, 10, 6 et 0cm dans la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  sont respectivement de 15,8%, 19,2%, 12,3% et 10,5%. Tandis que dans la paroi en BBC, les taux d'amortissement s'élèvent à 28%, 30,7%, 22,8% et 17,5%. Cependant, l'influence du couplage de transfert d'humidité à celui de la chaleur n'a pas pu être mise en évidence à cause du manque de temps disponible pour réaliser les essais. Toutefois, l'absorption de l'humidité relative de l'air par les parois a été scrutée. Il ressort des analyses que la paroi en argile absorbe et stocke plus d'humidité que la paroi BBC. A 10 cm de profondeur, l'humidité relative moyenne mesurée dans la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  est de 90,3% contre 76% pour la deuxième paroi. Ce qui témoigne de la bonne capacité tampon de la paroi en argile en phase d'utilisation.

Par ailleurs, avec une différence relative de 0,2°C en moins par rapport à la température opérative de la paroi en BBC, la paroi en  $BTC_{8\_Bel} - 1$  améliorerait le ressenti thermique des occupants. Ce comportement, associé à un taux d'amortissement de la chaleur plus important et une bonne capacité tampon de la paroi, prédit une réduction de la charge de climatisation. Cela a d'ailleurs été confirmé par un gain énergétique d'environ 2% avec la paroi en argile – paille de chiendent. Cette faible réduction est principalement due à un rapport surface paroi/volume climatisé très faible. Ce qui permet de conclure que les apports de chaleur à travers les deux enveloppes sont trop faibles pour provoquer une différence notable entre les charges de climatisation pendant les deux tests. Cependant, ces essais en chambre climatique ont permis de confirmer les bonnes performances hygrothermiques et énergétiques des BTC en argile – paille de chiendent à l'échelle d'une paroi. Ainsi, l'utilisation du matériau  $BTC_{8\_Bel} - 1$  dans l'enveloppe du bâtiment améliorerait de façon passive le confort thermique de ses occupants et son efficacité énergétique.

## CONCLUSION GENERALE

---

La présente étude a traité de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments publics du sud du Bénin par utilisation des matériaux biosourcés. L'objectif était d'évaluer l'influence du couplage des transferts de chaleur et d'humidité, à travers une enveloppe hygroscopique en argile – paille de chiendent sur les conditions hygrothermiques de confort et la consommation énergétique d'un bâtiment de bureau situé dans la ville de Cotonou au Bénin. Pour se faire, une revue de littérature approfondie a été réalisée afin de connaître l'état d'avancement de la science sur le sujet. En se basant sur les acquis de la littérature, la suite de l'étude a été réalisée suivant 5 grands chapitres. Dans le premier chapitre ayant suivi la synthèse bibliographique, un matériau en terre biosourcé a été mis en œuvre. La terre utilisée à cet effet est l'argile de Zogbodomey (localité située au sud du Bénin) adaptée, selon plusieurs auteurs, à la réalisation des briques en terre cuite. De la paille de chiendent a été choisie pour améliorer les propriétés hygrothermiques de cette argile. Le choix d'une technique de construction en terre (autre que celle de la cuisson des briques, jugée relativement énergivore et non adaptée au contexte énergétique du Bénin) a également été effectué. Par la suite, les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des matériaux ont été déterminées afin de garantir l'employabilité de ces derniers dans la construction de bâtiments durables au Bénin. Quant à leurs propriétés hygrothermiques, elles ont été déterminées dans le chapitre 3. L'évaluation des performances hygrothermiques et énergétiques des matériaux en argile – paille de chiendent proposés pour emploi dans l'environnement subtropical du Sud du Bénin a nécessité le monitoring d'un bâtiment de bureaux, soit celui de la direction générale de la caisse National de Sécurité Sociale (CNSS). Ces travaux de terrain, présentés dans le chapitre 4 du manuscrit, ont permis de disposer de données utiles à la calibration des modèles de simulation. De plus, sur la base d'une enquête de confort réalisée auprès des occupants, les conditions de confort réelles ont été déterminées. Dans le 5<sup>ème</sup> et avant dernier chapitre, les performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes en argile – paille de chiendent ont été évaluées grâce à des simulations énergétiques. L'importance de la nature hygroscopique des matériaux et du couplage des transferts de chaleur et d'humidité en leur sein a été mise en évidence. Pour finir, une expérimentation en chambre climatique sur le transfert hygrothermique à travers une paroi en argile – paille de chiendent a été réalisée. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'une paroi similaire réalisée en blocs de béton creux.

Il ressort de ces différents travaux que l'argile de Zogbodomey peut également être utilisée pour la fabrication des blocs de terre comprimée (BTC) si une bonne correction de sa granulométrie est opérée. Cela étant, en y ajoutant du concassé 0/5, de la paille de chiendent et 8% de ciment, des BTC en argile – paille de chiendent ont été fabriqués. Quatre formulations ont été mises en œuvre en fonction de la teneur en paille de chiendent. Il s'agit des  $BTC_8 - 0$  (0% de paille),  $BTC_8 - 0,5$  (0,5% de paille),  $BTC_8 - 1$  (1% de paille) et  $BTC_8 - 1,5$  (1,5% de paille). Les essais physiques réalisés sur ces derniers montrent une décroissance de leur masse volumique avec l'augmentation de la teneur en paille. Elle est de  $1932 \text{ kg/m}^3$  pour le  $BTC_8 - 0$ ,  $1835 \text{ kg/m}^3$  pour le  $BTC_8 - 0,5$ ,  $1753 \text{ kg/m}^3$  pour le  $BTC_8 - 1$  et  $1692 \text{ kg/m}^3$  pour le

$BTC_8 - 1,5$ . Cette diminution se justifie par l'augmentation de la porosité au fur et à mesure que la teneur en paille augmente. Elle évolue de 27,1% à 33% lorsque la teneur en paille passe de 0 à 1,5%. Ce qui engendre une plus grande absorption d'eau du matériau. Pour preuve, avec le  $BTC_8 - 1,5$  l'absorption capillaire est de  $22,65 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  alors qu'elle n'est que de  $6,43 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  pour le  $BTC_8 - 0$ . Quant aux propriétés mécaniques, les résistances aux compressions sèche et humide les plus faibles ont été obtenus avec le  $BTC_8 - 1,5$ , soient respectivement 1,76 MPa et 0,56 MPa. Ces faibles valeurs rendent cette formulation inutilisable dans l'enveloppe de bâtiment. En revanche, les trois autres formulations peuvent être utilisées dans l'enveloppe en raison de résistances à la compression supérieures ou égales aux seuils fixés. Ainsi, les valeurs déterminées évoluent dans le sens opposé à celui de la teneur en paille et varient entre 5,1 MPa et 2,84 MPa pour la résistance à la compression sèche et de 3 MPa à 1,02 MPa pour la résistance humide. Par ailleurs, les quatre formulations présentent de bonnes résistances à l'abrasion et à l'érosion.

Pour ce qui concerne les propriétés thermiques des blocs, les essais réalisés révèlent de légères réductions de 2,7 et 5,4% lorsque des teneurs de 0,5 et 1% de paille de chiendent sont respectivement ajoutées à la matrice de terre. La réduction la plus importante a été obtenue avec le  $BTC_8 - 1,5$ , soit 18% par rapport à la conductivité thermique du  $BTC_8 - 0$  estimée à  $0,74 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  à une humidité relative de 40%. Une telle évolution de la conductivité thermique s'accompagne d'une réduction de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermique. En revanche, la capacité thermique des blocs croît logiquement avec la teneur en paille et passe de 685 à 785 J/kg.K. Quant aux propriétés hygriques des blocs, une augmentation des perméabilités à l'air et à la vapeur d'eau a été enregistrée avec l'évolution croissante de la teneur en paille, en raison de probables chemins préférentiels créés par cette dernière. Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau décroît donc de 21,82 à 17,41 avec l'augmentation de la teneur en paille. Ce qui procure une meilleure capacité tampon d'humidité (*MBV*) aux matériaux contenant plus de paille. L'incorporation de la paille de chiendent a donc un effet positif aussi bien sur les propriétés thermiques des BTC mis en œuvre, mais également sur leurs propriétés hygriques. Elle rend la matrice de terre thermiquement plus isolante et améliore son hygroscopicité. Fort de ces remarques, l'emploi de tels éco-matériaux dans l'enveloppe des bâtiments contribuerait à l'amélioration du confort hygrothermique et la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Cela a d'ailleurs été mis en évidence lors des simulations et expérimentations visant à évaluer les performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes en argile – paille de chiendent.

A cet effet, les différentes simulations réalisées dans WUFI Plus sur un bureau du bâtiment d'étude ont montré une baisse moyenne de 4% de l'humidité relative à l'intérieur du local simulé lorsque l'enveloppe conventionnelle en maçonnerie carrelée est remplacée par les enveloppes en argile – paille de chiendent. Ainsi, la régulation passive de l'humidité intérieure par l'enveloppe en terre biosourcée a permis une économie d'énergie liée à la déshumidification de 3%. Ce gain énergétique passe à 8,2% pour ce qui concerne les charges thermiques sensibles liées à la climatisation. Ainsi, pour atteindre les  $26^\circ\text{C}$  tel que souhaité par les occupants lors de

l'enquête de confort dans le bâtiment d'étude, une consommation annuelle de 10.527 kWh est théoriquement nécessaire avec les enveloppes en argile paille de chiendent. Par contre, avec l'enveloppe conventionnelle, la charge annuelle de climatisation pour le même local est estimée à 11.466,26 kWh. D'où la nature thermique plus isolante des matériaux en argile – paille de chiendent, comparativement aux matériaux conventionnels de construction au Bénin.

Enfin, l'amélioration des conditions hygrothermiques intérieures et la baisse de la consommation énergétique observées par simulation avec les enveloppes en argile – paille de chiendent ont été confirmées par les essais en chambre climatiques. La paroi en terre biosourcée testée a montré un déphasage et un amortissement plus important que la paroi en blocs de béton creux (BBC). Pour la première, le déphasage thermique et l'amortissement étaient respectivement de 6,8h et 10,5% tandis qu'ils sont de 3h et 17,5% pour la paroi BBC. Une absorption de vapeur d'eau plus importante de la paroi terre biosourcée a également été constatée. Les quantités d'énergie consommées pendant 100 heures par les systèmes de climatisation pour maintenir l'ambiance intérieure à la température de confort de 26°C malgré un apport de chaleur à travers les parois testées sont de 16,5 kWh et 16,8 kWh respectivement pour les parois en argile – paille de chiendent et en BBC.

Pour finir, les BTC en argile – paille de chiendent ont montré leur capacité à améliorer de façon passive le confort hygrothermique et l'efficacité énergétique des bâtiments. Cependant, des études complémentaires devraient être menées pour améliorer les propriétés hygrothermiques et mécaniques du matériau proposé. L'augmentation de la teneur en paille pourrait être une solution, mais le défi serait de renforcer en même temps les propriétés mécaniques de ces matériaux. Une étude d'optimisation des parois en argile – paille de chiendent devrait être réalisée pour déterminer l'épaisseur optimale des parois. L'attention devrait également être portée sur l'étude de la cinétique de croissance des moisissures et de la tenue au feu des BTC en argile – paille de chiendent étant donné qu'ils contiennent d'agrégat végétal. Il serait aussi très intéressant d'étudier l'isolation thermique des enveloppes en argile – paille de chiendent avec des isolants biosourcés afin d'en améliorer les performances hygrothermique et énergétique. Enfin, de nouvelles expériences de transferts hygrothermiques à travers les parois  $BTC_{8-Bel} - 1$  et BBC peut être menées en réalisant des cellules couvrant les faces intérieures des parois. Ainsi, les comportements réels des parois face aux conditions climatiques du Bénin et de la Belgique peuvent être mieux appréciés sur des volumes intérieurs raisonnables. La caractérisation hygrothermique du  $BTC_{8-Bel} - 1$  doit être également envisagée.



## BIBLIOGRAPHIE

---

- Abahri K. (2012). Modeling of coupled heat, air and moisture transfer in porous building materials, *PhD thesis*, La Rochelle University.
- Abanto G. A., Karkri M., Lefebvre G., Horn M., Solis J. L. & Gómez M. M. (2017). Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas : Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.02.001>
- AFNOR. (2001). XP P13 - 901 : Blocs de Terre Comprimée pour murs et cloisons.
- Agossou Y. D., Ekpo T. D., Boissiere R., Adjovi E. C., Chabi E., Amadji S. A., & Khelil A. (2022). Study of the Implementation of Fibrous Materials and Earth in Hollow Body Slab in Reinforced Concrete: Case of Laterite, Borassus aethiopum and Calamus deerratus Woods. *Waste and Biomass Valorization*, 13, 645-658. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01510-1>
- Ahmad M. R. & Chen B. (2020). Influence of type of binder and size of plant aggregate on the hygrothermal properties of bio-concrete. *Construction and Building Materials*, 251, 118981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118981>
- Ahmadi R., Soury B. & Ebrahimi M. (2020). Evaluation of wheat straw to insulate fi red clay hollow bricks as a construction material. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120043. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120043>
- Aït Oumeziane Y., Pierre A., El Mankibi F., Lepiller V., Gasnier M. & Désévaux P. (2021). Hygrothermal properties of an early 20th century clay brick from eastern France: Experimental characterization and numerical modelling. *Construction and Building Materials*, 273, 121763. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121763>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.539>
- Al-Sallal K. A., Al-Rais L. & Dalmouk M. Bin. (2013). Designing a sustainable house in the desert of Abu Dhabi. *Renewable Energy*, 49, 80-84. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.061>
- Alioua T., Agoudjil B., Chennouf N., Boudenne A. & Benzarti K. (2019). Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect. *Building and Environment*, 163, 106333. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106333>
- Amoruso F. M., Dietrich U. & Schuetze T. (2018). Development of a Building Information Modeling-parametric work flow based renovation strategy for an exemplary apartment building in Seoul, Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/su10124494>
- Amziane S., Collet F., Lawrence M., Magniont C., Picandet V. & Sonebi M. (2017). Recommendation of the RILEM TC 236-BBM : characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content , water absorption , dry density , particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures*, 50(3), 1-11. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>
- Anjorin M., Toukourou C. A., Houngan A. C., Awanto C. & Madougou L. (2018). Characterization of Cooked Bricks with Incorporation of Expanded Polystyrene for Use in Buildings. *Journal of Materials Science & Surface Engineering*, 6(1), 743-748. [10.jmsse/2348-8956/6-1.3](https://doi.org/10.1016/j.jmsse.2018.09.001)

- ANSI/ASHRAE. (2002). ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings. *Ashrae*, 8400.
- Aranda-Jimenez Y. G. & Suarez-Dominguez E. J. (2020). Determining the carbon footprint for a new earthen-based finish. *2019*, 143-148. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz045>
- Armstrong P. R., Leeb S. B. & Norford L. K. (2006a). Control with building mass - Part I: Thermal response model. *ASHRAE Transactions*, 112 PART 1, 449-461.
- Armstrong P. R., Leeb S. B. & Norford L. K. (2006b). Control with building mass - Part II: Simulation. *ASHRAE Transactions*, 112 PART 1, 462-473.
- Arthur E., Tuller M., Moldrup P. & de Jonge L. (2016). Evaluation of theoretical and empirical water vapor sorption isotherm models for soils. *Water Resources Research*, 190-205. <https://doi.org/10.1002/2015WR017681>.
- Arto I., Gallego R., Cifuentes H., Puertas E. & Gutiérrez-carrillo M. L. (2021). Fracture behavior of rammed earth in historic buildings. *Construction and Building Materials*, 289, 123167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123167>
- Asamoah-Boadu N. & Afukaar F. K. (2001). Application of earth building materials for low-income housing. *J. Appl. Sci. Technol.*, 6(1 & 2), 40-45. 10.4314/jast.v6i1.17384
- Ashour T., Korjenic A. & Korjenic S. (2015). Equilibrium moisture content of earth bricks biocomposites stabilized with cement and gypsum. *Cement and Concrete Composites*, 59, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.005>
- Ashour T., Korjenic A., Korjenic S. & Wu W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy & Buildings*, 104, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>
- ASHRAE. (2004). ANSI/ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *Ashrae*, 2004.
- ASHRAE. (2009). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *Handbook of Fundamental*, 30329 (404).
- ASHRAE 14. (2014). Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. *ASHRAE Guideline 14-2014*, 4.
- ASHRAE Handbook. (2016). *Calcul de la charge de climatisation*.
- ASHRAE Standard 2010-90.1. (2011). Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. *ASHRAE/IESNA Standard*, 2010.
- ASHRAE Standard 55-2010. (2010). Thermal Environment Conditions for Human Occupancy.
- Aslani A., Bakhtiar A. & Akbarzadeh M. H. (2019). Energy-efficiency technologies in the building envelope: Life cycle and adaptation assessment. *Journal of Building Engineering*, 21, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.09.014>
- Aubert J. E., Magniont C., Tribout C. & Bertron A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials : A review. *111*, 719-734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.046>
- Azhary K. El, 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. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.030>
- Baetens R., Jelle B. P. & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761-769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.032>
- Barclay M., Holcroft N. & Shea A. D. (2014). Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp-lime buildings. *Building and Environment*, 80, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.003>
- Barnaure M., Bonnet S. & Poullain P. (2021). Earth buildings with local materials : Assessing the variability of properties measured using non-destructive methods. *Construction and Building Materials*, 281, 122613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122613>
- Batier C. (2016). Confort thermique et énergie dans l’habitat social en milieu méditerranéen : d’un modèle comportemental de l’occupant vers des stratégies architecturales. *Thèse de doctorat*, 290p. Université de Montpellier.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109467>
- Ben-Alon L., Loftness V., Harries K. A., Dipietro G. & Cochran E. (2019). Cradle to site Life Cycle Assessment ( LCA ) of natural vs conventional building materials : A case study on cob earthen material. *Building and Environment*, 160, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.028>
- Ben M., Jelidi A., Soukaina A. & Ben S. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks ( CEB ). *Construction and Building Materials*, 104, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- Benkhalel M., Ouldboukhite S., 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. <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. *Thèse de doctorat*, 206p. Université de La Rochelle. <https://theses.hal.science/tel-01865834>
- Berardi U. (2018). Aerogel-enhanced insulation for building applications. *Nanotechnology in Eco-efficient Constructio*, 2019, 395-416. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00017-7>
- Bernstein J. A., Alexis N., Bacchus H., Bernstein I. L., Fritz P., Horner E., Li N., Mason S., Nel A., Oullette J., Reijula K., Reponen T., Seltzer J., Smith A. & Tarlo S. M. (2008). The health effects of nonindustrial indoor air pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121(3), 585-591. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2007.10.045>
- Bertagnolio S. (2012). Evidence-based model calibration for efficient building energy services. *PhD thesis*, 303p. University of Liege.
- Binici H., Eken M., Dolaz M., Aksogan O. & Kara M. (2014). An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk , textile waste and stubble fibres. *Construction and Building Materials*, 51, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.038>
- Bogas J. A., Silva M., Gomes M. G., Bogas J. A., Silva M., Unstabilized M. G. G., Silva M. & Gomes M. G. (2019). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569-584. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>
- Bohac V., Gustavsson M., Kubicar L. & Gustafsson S. (2000). Parameter estimations for measurements of thermal transport properties with the hot disk thermal constants analyzer.

- Review of Scientific Instruments*, 71(6), 2452-2455. 0034-6748/2000/71(6)/2452/4/\$17.00
- Bouguerra A., Ledhem A., de Barquin F., Dheilly R. M. & Quéneudec M. (1998). Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. 28(8), 1179-1190. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00075-1)
- Brager G. S. & de Dear R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment : a literature review. *Energy and Buildings*, 21(1), 83-96. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4)
- Brasche S. & Bischof W. (2005). Daily time spent indoors in German homes - Baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 208(4), 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.03.003>
- Brunauer S., Emmett P. H. & Teller E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J. Am. Chem. Soc.*, 60(2), 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Bui R., Labat M. & Aubert J. (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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.005>
- Buratti C., Belloni E. & Merli F. (2020). Water vapour permeability of innovative building materials from different waste. *Materials Letters*, 265, 127459. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127459>
- Burroughs S. (2007). Recommendations for the selection, stabilization, and compaction of soil for rammed earth wall construction. 5(1), 101-114.
- Cagnon H., Aubert J. E., Coutand M. & Magniont C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>
- Cao S., Li X. & Yang B. (2021). Heat and moisture transfer of building envelopes under dynamic and steady-state operation mode of indoor air conditioning. *Journal of Building Engineering*, 44, 102683. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102683>
- Carlucci S., Bai L., Dear R. De & Yang L. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137, 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>
- Casnedi L., Cappai M., Cincotti A., Delogu F. & Pia G. (2020). Porosity effects on water vapour permeability in earthen materials : Experimental evidence and modelling description. *Journal of Building Engineering*, 27, 100987. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100987>
- CCSTB. (2012). Règles Th-U Fascicule 2 : Matériaux. *Réglementation Thermique 2012*.
- Cédar R. (s. d.). Coefficients de résistance thermique additionnelle sur volets et persiennes repliables.
- CEN Standard EN15251. (2007). Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics.
- Chai J. & Fan J. (2022). Advanced thermal regulating materials and systems for energy saving and thermal comfort in buildings. *Materials Today Energy*, 24, 100925. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100925>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108842>
- Charai M., Mezrhab A., Moga L. & Karkri M. (2022). Hygrothermal, mechanical and durability

- assessment of vegetable concrete mixes made with Alfa fibers for structural and thermal insulating applications. *Construction and Building Materials*, 335, 127518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127518>
- Chel A. & Tiwari G. N. (2009). Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house – Case study of vault roof mud-house in India. *Applied Energy*, 86(10), 1956-1969. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.033>
- Chemkhi S., Zagrouba F. & Bellagi A. (2004). Thermodynamics of water sorption in clay. *Desalination*, 166(1-3), 393-399. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.094>
- Chen S., Wang X., Lun I., Chen Y., Wu J. & Ge J. (2020). Effect of inhabitant behavioral responses on adaptive thermal comfort under hot summer and cold winter climate in China. *Building and Environment*, 168, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106492>
- Choi Y., Cho W., Ozaki A. & Lee H. (2021). Energy & Buildings Influence of the moisture driving force of moisture adsorption and desorption on indoor hygrothermal environment and building thermal load. *Energy & Buildings*, 253, 111501. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111501>
- Christian A., Dègodji T. A. & Akanho T. C. (2020). Physical and Mechanical Properties of Compacted Concrete Containing Waste Glass and Laterite as Replacements of Sand. 6(1), 16-22.
- CIBSE (1999). Environmental Design: CIBSE Guide A. In *CIBSE Guide*.
- Cid-Falceto J., Mazarrón F. R. & Cañas I. (2012). Assessment of compressed earth blocks made in Spain : International durability tests. *Construction & Building Materials*, 37, 738-745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.019>
- CISBE (2006). Environmental design: Guide A. *CIBSE Guide A*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-240-81224-3.00016-9>
- Coelho G. B. A., Silva H. E. & Henriques F. M. A. (2018). Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings. *Building and Environment*, 142, 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.034>
- Colinart T. & Glouannec P. (2022). Accuracy of water vapor permeability of building materials reassessed by measuring cup's inner relative humidity. *Building and Environment*, 217, 109038. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109038>
- Collet F., Chamoin J., Pretot S. & Lanos C. (2013). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy & Buildings*, 62, 294-303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>
- CDI - CRA Terre-EAG (1998), Compressed earth blocks standards.
- Conductivité thermique des matériaux ( $\lambda$ ) - Energie Plus Le Site. (s. d.). Consulté 11 décembre 2022, <https://energieplus-lesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/conductivite-thermique-des-materiaux/>, Consulté 11 décembre 2022.
- Coquard R., Baillis D. & Quenard D. (2006). Experimental and theoretical study of the hot-wire method applied to low-density thermal insulators. 49, 4511-4524. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.05.016>
- Cornaro C., Zanella V., Robazza P., Belloni E. & Buratti C. (2020). An innovative straw bale wall package for sustainable buildings: experimental characterization, energy and environmental performance assessment. *Energy & Buildings*, 208, 109636. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109636>
- Costantini Romero A. B., Francisca F. M. & Giomi I. (2021). Hygrothermal properties of soil-cement construction materials. *Construction and Building Materials*, 313, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125518>

- Costi M., Castrillo D., Ioannou I. & Philokyrou M. (2021). Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust. *Construction and Building Materials*, 294, 123516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516>
- Cripps A., Handyside R., Dewar L. & Fovargue J. (2004). *Crops in Construction Handbook*. CIRIA.
- Cui W., Cao G., Park J. H., Ouyang Q. & Zhu Y. (2013). Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance. *Building and Environment*, 68, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.012>
- Daian J. F. (1988). Condensation and isothermal water transfer in cement mortar Part I - Pore size distribution, equilibrium water condensation and imbibition. *Transport in Porous Media*, 3(6), 563-589. <https://doi.org/10.1007/BF00959103>
- Danso H. (2017). Improving Water Resistance of Compressed Earth Blocks Enhanced with Different Natural Fibres. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 11, 433-440. <https://doi.org/10.2174/1874836801711010433>
- 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 & Building Materials*, 101, 797-809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069>
- De Dear R. J. & Brager G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549-561. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)
- Deuble M. P. & de Dear R. J. (2012). Mixed-mode buildings: A double standard in occupants comfort expectations. *Building and Environment*, 54, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.021>
- Direction Générale des Ressources Énergétiques (2021). Chiffres clés 2021 : Bilans énergétiques et indicateurs 2016 à 2020.
- Dhaka S., Mathur J., Brager G. & Honnekeri A. (2015). Assessment of thermal environmental conditions and quantification of thermal adaptation in naturally ventilated buildings in composite climate of India. *Building and Environment*, 86, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.024>
- Direction Générale de l'Énergie Bénin & ECONOLER. (2011). Elaboration d'un code d'efficacité énergétique au Bénin : normes relatives aux bâtiments publics.
- Duong D. Do. (1998). Adsorption analysis: equilibria and kinetics. *Series on chemical Engineering*, 2. [https://doi.org/10.1142/9781860943829\\_0007](https://doi.org/10.1142/9781860943829_0007)
- Doost-Hoseini K., Reza H. & Elyasi A. (2014). Composites : Part B Correlation between sound absorption coefficients with physical and mechanical properties of insulation boards made from sugar cane bagasse. *Composites part B*, 58, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.011>
- Duffin & Knowles. (1981). Temperature control of buildings by adobe wall design. *Solar Energy*, 27(3), 241-249. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90125-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90125-0)
- Duval J. (2004). Moyens de lutte au CHIENDENT (*Elytrigia repens*) en production biologique.
- Easton D. & Easton T. (2012). Modern rammed earth construction techniques. *Modern Earth Building*, 2012, 364-384. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.364>
- Egenti C. & Khatib J. M. (2016). Sustainability of compressed earth as a construction material, *Sustainability of Construction Materials*, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00013-5>
- Egenti C., Khatib J. & Oloke D. (2013). Appropriate Design and Construction of Earth Building : Contesting issues of protection against Cost. *African Journal of Basic & Applied Sciences* 5(2): 102-106. <https://doi.org/10.5829/idosi.ajbas.2013.5.2.1130>

- Ekici C. (2016). Measurement Uncertainty Budget of the PMV Thermal Comfort Equation. *International Journal of Thermophysics*, 37(5), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-2011-3>
- El-Darwish I. & Gomaa M. (2017). Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 579-589. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.011>
- El-Darwish I. & Gomaa M. (2020). Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 579-589. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.011>
- El Abd & Kabasy M. (2013). Improvement of swelling clay properties using hay fibers. *Construction and Building Materials*, 38, 242-247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.031>
- El Fgaier F., Lafhaj Z., Brachelet F., Antczak E. & Chapiseau C. (2015). Thermal performance of un fired clay bricks used in construction in the north of France : Case study. *Case Studies in Construction Materials*, 3, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.09.001>
- International Energy Agency. (2016). Total energy use in buildings Analysis and evaluation methods (Annex 53). *Project Summary Report*.
- EPS Packaging Group. (2012). Expanded Polystyrene ( EPS ) and the Environment.
- Fabrizio E. & Monetti V. (2015). Methodologies and advancements in the calibration of building energy models. *Energies*, 8(4), 2548-2574. <https://doi.org/10.3390/en8042548>
- Fang Y. & Cho S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy*, 191, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>
- Fanger, P. O. (1970). Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering. *Danish Technical Press*.
- Fanger P. O. & Toftum J. (2002). Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34, 533-536. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8)
- Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F. & Castelain C. (2020). Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>
- Félix V. (2011). Caractérisation Thermique de Matériaux Isolants Légers Application à des Aérogels de Faible Poids Moléculaire. *Thèse de Doctorat*. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE.
- Ferroukhi M. Y. (2016). Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité. *Thèse de Doctorat*, 215p. Université de La Rochelle.
- Ferroukhi, M. Y., Djedjig, R., Limam, K., & Belarbi, R. (2016). Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings : A dynamic co-simulation approach. *Build Simul*, 9, 501-512. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0292-5>
- FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS IBP. (2021). 25 years of the WUFI® Program family. 1-3.
- Frenzel C., Gröger S., Hiller M., Kessling W. & Müllner K. (2011). Simulation of thermal comfort in soccer stadia using TRNSYS 17. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 972-979.
- Friess W. A. & Rakhshan K. (2017a). A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 485-496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.026>

- Friess W. A. & Rakhshan K. (2017b). A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 485-496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.026>
- Friess W. A., Rakhshan K., Hendawi T. A. & Tajerzadeh S. (2012). Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency. *Energy and Buildings*, 44(1), 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.005>
- Gagge A. P., Nishi Y. & Gonzalez R. R. (1972). Standard effective temperature-A single temperature index of temperature sensation and thermal discomfort. *Proceedings of the CIB commission*, 229-250.
- Gao J., Wang Y. & Wargocki P. (2015). Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings. *Building and Environment*, 92, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.030>
- Ge J., Li S., Chen S., Wang X., Jiang Z. & Shen C. (2021). Energy-efficiency strategies of residential envelope in China's Hot Summer – Cold Winter Zone based on intermittent thermal regulation behaviour. *Journal of Building Engineering*, 44, 103028. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103028>
- Ghawghawe K. (2014). Determining the Trade-offs between Thermal Comfort and Cooling Consumption in Indian Office Buildings. *30th International Plea Conference*, 1-8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1061.1288>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.126>
- Gonzalez A. D. (2015). Assessment of the energy and carbon embodied in straw and clay masonry blocks. *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks*, 2015, 461-480. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00021-8>
- González A. D. (2014). Energy and carbon embodied in straw and clay wall blocks produced locally in the Andean Patagonia. *Energy & Buildings*, 70, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.003>
- Grunewald J. & Nicolai A. (2006). Program for Coupled Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulation in Building Envelope Systems. *Building Energy and Environmental Systems Laboratory*, 1, 112p.
- Guettala A., Houari H., Mezghiche B. & Chebili R. (2002). Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir*, 2, 61-66.
- Gustafsson S. E. (1991). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Scientific Instruments*, 62(3), 797-804. <https://doi.org/10.1063/1.1142087>
- Haggag M., Hassan A. & Elmasry S. (2014). Experimental study on reduced heat gain through green façades in a high heat load climate. *Energy and Buildings*, 82, 668-674. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.087>
- Halhoul G., Essaaidi M., Ben M., Qolomany B., Qadir J., Anan M. & Al-fuqaha A. (2021). Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110969. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110969>
- Hall M. & Djerbib Y. (2004). Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Construction*, 18, 281-286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.001>
- Hamard E., Cazacliu B., Razakamanantsoa A. & Morel J. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and*



- Environment*, 106, 103-119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>
- Hamdaoui M., Benzaama M., El Y. & Chateigner D. (2021). Energy & Buildings A review on physical and data-driven modeling of buildings hygrothermal behavior: Models, approaches and simulation tools. *Energy & Buildings*, 251, 111343. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111343>
- Hay B., Filtz J. R. & Batsale J.-C. (2004). Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash. *Technique de l'Ingénieur*, R2955 VI, 19p.
- He Y. (2005). Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor Part 1. Theoretical considerations. *Thermochimica Acta*, 436 (1-2), 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.06.026>
- Heathcote K. A. (2002). An investigation into the erodibility of earth wall units. *PhD thesis*, 272p. University of Technology Sydney.
- Heathcote K. A. (2007). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Material* 9(3), 185-189.
- Henderson S. M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture. *Agric. Eng.*, 33(1), 29–32.
- Hens, H. S. L. C. (2002). Heat, Air and Moisture Transfer In Highly Insulated Building Envelopes (HAMTIE). *IEA ECBCS Annex 24*, 25p.
- Herrera E., Bourdais R. & Guéguen H. (2015). A hybrid predictive control approach for the management of an energy production-consumption system applied to a TRNSYS solar absorption cooling system for thermal comfort in buildings. *Energy and Buildings*, 104, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.076>
- Hill C. A. S., Norton A. & Newman G. (2009). The water vapor sorption behavior of natural fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 112, 1524–1537. DOI 10.1002/app.2972
- Hofbauer W., Krueger N., Breuer K. & Sedlbauer K. (2008). Mould resistance assessment of building materials – Material specific isopleth-systems for practical application. *Indoor Air 2008*, 17-22.
- Homod R. Z., Almusaed A., Almssad A., Jaafar M. K., Goodarzi M. & Sahari K. S. M. (2021). Effect of different building envelope materials on thermal comfort and air-conditioning energy savings: A case study in Basra city, Iraq. *Journal of Energy Storage*, 34(2020), 101975. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101975>
- Hon C., Koh A. & Kraniotis D. (2020). A review of material properties and performance of straw bale as building material. *Construction and Building Materials*, 259, 120385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120385>
- Horne R. & Hayles C. (2008). Towards global benchmarking for sustainable homes: An international comparison of the energy performance of housing. *Journal of Housing and the Built Environment*, 23(2), 119-130. <https://doi.org/10.1007/s10901-008-9105-1>
- Houben H., Rigassi V. & Garnier P. (1996). Compressed earth blocks: production equipment. *2nd Edition*, CDI & CRATerre.
- Houngan A. C., Awanto C., Houndedako S., Anjorin M. & Vianou A. (2015). Mass Diffusivity Determination of Teak Wood (*Tectonagrandis*) Used as Building Material. *Procedia Engineering*, 127, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.327>
- Hoyt T., Schiavon S., Piccioli A., Moon D. & Steinfeld K. (2014). Web application for thermal comfort visualization and calculation according to ASHRAE Standard 55. *Building Simulation*, 7, 321–334. <https://doi.org/10.1007/S12273-013-0162-3>
- Hu Z., He W., Ji J. & Zhang S. (2017). A review on the application of Trombe wall system in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(2016), 976-987. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.003>
- Hu J. & Yu X. (2019). Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under

- different climate conditions. *Solar Energy*, 193, 866-877. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.021>
- Humphreys M. A., Rijal H. B. & Nicol J. F. (2013). Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database. *Building and Environment*, 63, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.024>
- Humphreys M. A. & Nicol J. F. (1998). Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions*, 104, 991-1004.
- Hwang R., Huang A. & Chen W. (2021). Considerations on envelope design criteria for hybrid ventilation thermal management of school buildings in hot – humid climates. *Energy Reports*, 7, 5834-5845. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.197>
- Indraganti M. & Boussaa D. (2018). An adaptive relationship of thermal comfort for the Gulf Cooperation Council (GCC) Countries: The case of offices in Qatar. *Energy and Buildings*, 159, 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.087>
- Indraganti M., Ooka R., Rijal H. B. & Brager G. S. (2014). Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India. *Building and Environment*, 74, 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.002>
- ISO 12571. (2001). Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique. In *Work* (Numéro avril).
- ISO 12572. (2001). *EN 12572 (2001): BATIMENTS - Perméabilité de la vapeur d'eau.*
- ISO 17892-4. (2018). Reconnaissance et essais géotechniques-Essais de laboratoire sur les sols- Partie 4: Détermination de la distribution granulométrie des particules.
- ISO 22007-2. (2008). ISO 22007-2: Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity — Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method. *Annual Book of ASTM Standards* (2008).
- ISO 7726. (2001). Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. *Bs En Iso 7726:2001* (1).
- ISO 7730. (2005). Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *Prüfbescheinigungen nach DIN EN 10204* (5). <https://doi.org/10.3139/9783446461208.007>
- ISO 8302. (1991). Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus.
- Issaadi N., Nouviaire A. & Belarbi R. (2015). Moisture characterization of cementitious material properties: Assessment of water vapor sorption isotherm and permeability variation with ages. *Construction and Building Materials*, 83, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.030>
- Itulama L. A. M. (2019). Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. *Thèse de Doctorat*, 157p. Université de Liège.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119346>
- Jannot Y., Felix V. & Degiovanni A (2010). A centered hot plate method for measurement of thermal properties properties of thin insulating materials. *Meas. Sci. Technol.* 21. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/3/035106>
- Jannot Y. & Meukam P. (2004). Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip. *Meas. Sci. Technol.* 15, 1932-1938. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/034>
- Jannot Y. (2011). Théorie et pratique de la métrologie thermique. 112p

- Jannot Y., Degiovanni A. & Vincent F. (2011). *Measurement of the thermal conductivity of thin insulating anisotropic material with a stationary hot strip method. Meas. Sci. Technol.* 22(3). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/3/035705>
- Janssen H. (2014). Simulation efficiency and accuracy of different moisture transfer potentials. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(5), 379-389. <https://doi.org/10.1080/19401493.2013.852246>
- Janssen H., Blocken B. & Carmeliet J. (2007). Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5-6), 1128-1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.048>
- Janssens A. (2001). Computer models: advanced numerical models for hygrothermal research: 2DHAV model description. *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*, 40, p. 177-178.
- JCGM. (2008). Évaluation des données de mesure Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.
- Jeong S. Y., Tso C. Y., Wong Y. M., Chao C. Y. H. & Huang B. (2020). Daytime passive radiative cooling by ultra emissive bio-inspired polymeric surface. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 206(2019), 110296. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110296>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107128>
- Jiménez A. & Dwyer D. O. (2020). Experimental validation for the application of the flat jack test in cob walls. *Construction and Building Construction*, 254, 119148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119148>
- Johansson P., Samuelson I., Ekstrand-tobin A., Sandberg P. I. & Sikander E. (2005). Microbiological growth on building materials – critical moisture levels . State of the art. *SP Report 2005:11*, 16p.
- Jones C. I. & Hammond G. P. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Energy*, 161(2), 87-98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- Jowkar M., de Dear R. & Brusey J. (2020). Influence of long-term thermal history on thermal comfort and preference. *Energy and Buildings*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109685>
- Kaushik A., Arif M., Tumula P. & John O. (2020). Effect of thermal comfort on occupant productivity in office buildings : Response surface analysis. *Building and Environment*, 180, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107021>
- Keefe L. (2005). *Earth Building: Methods and materials, repair and conservation. Built Environment*, 2005, 208p. <https://doi.org/10.4324/9780203342336>
- Kenai S., Bahar R. & Benazzoug M. (2006). Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil. *Journal of Materials Science*, 41, 6956-6964. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0226-1>
- Khedari J., Watsanasathaporn P. & Hirunlabh J. (2005). Development of fibre-based soil – cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 111-116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.042>
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. & Rubel F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kramer R. P., van Schijndel A. W. M. & Schellen H. L. (2017). The importance of integrally simulating the building, HVAC and control systems, and occupants' impact for energy

- predictions of buildings including temperature and humidity control: validated case study museum Hermitage Amsterdam. *Journal of Building Performance Simulation*, 10(3), 272-293. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1221996>
- Kramer R., van Schijndel J. & Schellen H. (2013). Inverse modeling of simplified hygrothermal building models to predict and characterize indoor climates. *Building and Environment*, 68, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.001>
- Kreiger B. K. & Srubar W. V. (2019). Moisture buffering in buildings: A review of experimental and numerical methods. *Energy and Buildings*, 202, 109394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109394>
- Kremer B. A. (2003). Cradle to Grave: The Life Cycle of Styrofoam. *Spring 2003*.
- Künzel H. M., Holm A., Zirkelbach D. & Karagiozis A. N. (2008). Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy*, 78(2005), 554-561. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.002>
- Künzel H. M., Karagiozis A. N. & Holm. A. (2010). A Hygrothermal Design Tool for Architects and Engineers. *ASTM International*, 136–151.
- Kwiatkowski J., Woloszyn M. & Roux J. (2009). Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials. *Building Environment*, 44(3), 633-642. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.006>
- Kyu Y., Yin J. & Tang Y. (2018). Developing an advanced daylight model for building energy tool to simulate dynamic shading device. *Solar Energy*, 163(2017), 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.082>
- Labat M., Magniont C., Oudhof N. & Aubert J. (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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>
- Labintan C. A., Adadja C. E., Gibigaye M., Zahrouni H. & Hattab M. (2019). The Influence of Rice Straw on the Physical and Mechanical Properties of Banco, an Adobe Reinforced with Rice Straw. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(2), 2363-2367. <https://doi.org/10.35940/ijeat.a2242.129219>
- Laborel-Préneron A., Giroudon M., Aubert J. E., Magniont C. & Faria P. (2019). Experimental assessment of bio-based earth bricks durability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(2019), 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012069>
- 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 & Buildings*, 178, 265-278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>
- Laibi A. B., Poullain P., Leklou N., Gomina M. & Sohounhloué D. K. C. (2018). Influence of the Length of Kenaf Fibers on the Mechanical and Thermal Properties of Compressed Earth Blocks (CEB). *KSCE Journal of Civil Engineering* 22(2), 785-793. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1968-9>
- Laibi A. B. (2018). Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses. *Thèse de doctorat*, 244p. Normandie Université.
- Laibi A. B., Gomina M., Agbahoungbata M., Poullain P., Leklou A. & Sohounhloué D. K. (2018). Physicochemical and mechanical characterization of Benin's Kenaf fibers and its effect on the building compressed Earth Blocks (CEB) mechanical properties. *Research Journal of Chemical Sciences*, 7(2), 6-15.
- Langmuir I. (1918). The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum.

- J. Am. Chem. Soc.*, 40(9), 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Lejano B. A., Gabaldon R. J., Go P. J., Juan C. G., Wong M. & Author C. (2019). Compressed earth blocks with powdered green mussel shell as partial binder and pig hair as fiber reinforcement. *International Journal of GEOMATE*, 16(57), 137-143. <https://doi.org/10.21660/2019.57.8138>
- Lejano B. A. & Pineda K. S. D. (2018). Investigation of the effects of different natural fibers on the strength of compressed stabilized earth blocks (CSEB). *International Journal of GEOMATE*, 14(42), 37-43. <https://doi.org/10.21660/2018.42.7142>
- Li Q., Zhang L., Zhang L. & Wu X. (2021). Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit. *Energy*, 237, 121509. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121509>
- Li Q., Rao J. & Fazio P. (2009). Development of HAM tool for building envelope analysis. *Building and Environment*, 44(5), 1065-1073. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.017>
- Li Y., Zhao Y., Chi Y., Hong Y. & Yin J. (2021). Shape-morphing materials and structures for energy efficient building envelopes. *Materials Today Energy*, 22, 100874. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100874>
- Li T., Zhai Y., He S., Gan W., Wei Z., Heidarinejad M., Dalgo D., Mi R., Zhao X., Song J., Dai J., Chen C., Aili A., Vellore A., Martini A., Yang R., Srebric J., Yin X. & Hu L. (2019). A radiative cooling structural material. *Science*, 364(1), 760-763. [10.1126/science.aau9101](https://doi.org/10.1126/science.aau9101)
- Lipczynska A., Schiavon S. & Graham L. T. (2018). Thermal comfort and self-reported productivity in an office with ceiling fans in the tropics. *Building and Environment*, 135, 202-212. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.013>
- Little B. & Morton T. (2001). Building with earth in Scotland: Innovative design and sustainability. *Scottish Executive Central Research Unit*, 72p.
- Liu Z., Yu Z. (Jerry), Yang T., Qin D., Li S., Zhang G., Haghghat F. & Joybari M. M. (2018). A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications. *Building and Environment*, 144, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.030>
- Liuzzi S., Hall M. R., Stefanizzi P. & Casey S. P. (2013). Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment*, 61, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.006>
- López-Pérez L. A., Flores-Prieto J. J. & Ríos-Rojas C. (2019). Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Building and Environment*, 150, 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>
- Lyn M. (2002). The development of a methodology for creating an earthen building inventory. <https://dx.doi.org/10.24382/3624>
- Maaroufi M. (2019). Modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux de construction : incidence de l'hystérésis. *Thèse de Doctorat*, 205p. Université de La Rochelle.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.001>
- Malbila E., Delvoie S., Toguyeni D., Attia S. & Courard L. (2020). An Experimental Study on the Use of Fonio Straw and Shea Butter Residue for Improving the Thermophysical and Mechanical Properties of Compressed Earth Blocks. *Journal of Minerals and Materials*

- Characterization and Engineering*, 8, 107-132. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.83008>
- Mango-Itulamy A. L., Collin F. & Fagel N. (2020). Improvement of lifetime of compressed earth blocks by adding limestone, sandstone and porphyry aggregates. *Journal of Building Engineering* 29, 101155. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.101155>
- Manuel des bâtiments « Les Bâtiments : efficacité énergétique et énergies renouvelables ». (s. d.).
- Martín-del-Río J. J., Canivel J., Torres-Gonzales M., Mascort-Albea E. J., Romero-Hernandez R., Alducin-Ochoa J. M. & Alexandre-Sanchez F. J. (2021). Analysis of the materials and state of conservation of the medieval rammed earth walls of Seville ( Spain ). *Journal of Building Engineering*, 44, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103381>
- Mateus N. M., Pinto A. & Da Graça G. C. (2014). Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. *Energy and Buildings*, 75, 511-522. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>
- Maykot J. K., Rupp R. F. & Ghisi E. (2018). *Energy & Buildings A field study about gender and thermal comfort temperatures in office buildings*. 178, 254-264. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.033>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009>
- McGregor F., Heath A., Shea A. & Lawrence M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82, 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>
- Mchirgui W. (2013). Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires. *Thèse de Doctorat*, 200p. Université de La Rochelle.
- McMinn W. A. M. & Magee T. R. A. (1999). Studies on the effect of temperature on the moisture sorption characteristics of potatoes. *Journal of Food Process Engineering*, 22, 113-128.
- Mendes N., Philippi P. C. & Lamberts R. (2001). A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(3), 509-518. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00172-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00172-7)
- Menon M., Jia X., Lair G. J., Faraj P. H. & Blaud A. (2015). Soil & Tillage Research Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations. *Soil & Tillage Research*, 150, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.02.004>
- Millogo Y., Aubert J., Hamard E. & Morel J. (2015). How Properties of Kenaf Fibers from Burkina Faso Contribute to the Reinforcement of Earth Blocks. *Materials*, 8, 2332-2345. <https://doi.org/10.3390/ma8052332>
- Milohin G., Anjorin M., Gbaguidi V. S., Donnot A. & Benelmir R. (2018). Valorisation des cendres issues de la combustion du charbon de bois dans la fabrication de briques d'argile cuite. *Revue Internationale des Sciences Appliquées*, 1(2), 3-10.
- Milohin G., Anjorin M., Gbaguidi V., Adissin C., Donnot A. & Benelmir R. (2017). Effect of the Addition of Glass Bottle Particles on the Mechanical Strengths of Compressed Blocks of Fired Clay and Stabilized Earth. *International Journal of Advanced Research*, 5(11), 860-870. <https://doi.org/10.21474/ijar01/5841>
- Minguela A. F. (2017). Bio-Composites to Tackle UK Built Environment Carbon Emissions : Comparative Analysis on Load-Bearing Capacity, Hygroscopic and Industrial Hemp Waste. 11, 395-412. <https://doi.org/10.2174/1874836801711010395>

- Minke G. (2000). *Earth Construction Handbook. The Building Material Earth in Modern Architecture*, WIT Press.
- Minke, Gernot. (2006). *Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture*.
- Mohamed A., Ahmed M., Naguib A. & Saad I. (2020a). Study on properties of clay brick incorporating sludge of water treatment plant and agriculture waste. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00397. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00397>
- Mohamed A., Ahmed M., Naguib A. & Saad I. (2020b). Study on properties of clay brick incorporating sludge of water treatment plant and agriculture waste. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00397. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00397>
- Mohamed H., Kamsah N. B., Ghaleb, F. A. & Alhamid M. I. (2018). Enhancement of thermal comfort in a large space building. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 49-65. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.12.011>
- Mora R. & Bean R. (2018). Thermal comfort: Designing for people. *ASHRAE Journal*, 60(2), 40-46.
- Morel J. C., Pkka A. & Walker P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Mostafa M. & Uddin N. (2015). Effect of Banana Fibers on the Compressive and Flexural Strength of Compressed Earth Blocks. *Buildings*, 5, 282-296. <https://doi.org/10.3390/buildings5010282>
- Mostafa M. & Uddin N. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.07.001>
- Motamedi S. & Liedl P. (2017). Integrative algorithm to optimize skylights considering fully impacts of daylight on energy. *Energy and Buildings*, 138, 655-665. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.045>
- Moujalled B. (2007). *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de Doctorat*, 330p. Institut des Sciences Appliquées de Lyon.
- Mukhopadhyaya P., Batcheller D., Kumaran M. K., Lackey J. C., Van Reenen D. & Normandin N. (2011). Correlation between water vapour and air permeability of building materials : experimental observations. *Journal of ASTM International*, 8(3), 1-14, <https://doi.org/10.1520/JAI102924>
- Murray M. C., Finlayson N., Kummert M. & Macbeth J. (2009). Live energy trnsys – trnsys simulation within google sketchup. *Building Simulation*, 2009, 1389-1396.
- Mustafaraj G., Chen J. & Lowry G. (2010). Development of room temperature and relative humidity linear parametric models for an open office using BMS data. *Energy and Buildings*, 42(3), 348-356. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.001>
- Mustafaraj G., Marini D., Costa A. & Keane M. (2014). Model calibration for building energy efficiency simulation. *Applied Energy*, 130, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.019>
- Musy M., Malys L. & Inard C. (2017). Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort : A comparative study of lawns , green walls and green roofs. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 603-610. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.134>
- Nasrollahzadeh N. (2021). Comprehensive building envelope optimization : Improving energy , daylight , and thermal comfort performance of the dwelling unit. *Journal of Building*

- Engineering*, 44, 103418. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103418>
- Nematchoua M. K., Tchinda R., Ricciardi P. & Djongyang N. (2014). A field study on thermal comfort in naturally-ventilated buildings located in the equatorial climatic region of Cameroon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 381-393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.010>
- Neya I., Yamegueu D., Coulibaly Y., Messan A. & Ouedraogo A. L. S. N. (2021). Impact of insulation and wall thickness in compressed earth buildings in hot and dry tropical regions. *Journal of Building Engineering*, 33, 101612. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101612>
- NF P18-459. (2010). *NF P18-459: Concrete - Testing hardened concrete - Testing porosity and density*.
- Nguyen A. T. & Reiter S. (2012). An investigation on thermal performance of a low cost apartment in hot humid climate of Danang. *Energy and Buildings*, 47, 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.047>
- Nguyen A. T., Singh M. K. & Reiter S. (2012). An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia. *Building and Environment*, 56, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.021>
- Nicol J. F. & Humphreys M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- Nicol J. F. & Humphreys M. A. (1986). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy Building*, 34(6), 1936, 45-59. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- Niroumand H., Antonio J., Kibert C. J. & Saaly M. (2017). Evaluation of Earth Building Tools in Construction ( EBTC ) in earth architecture and earth buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 861-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.267>
- Nofal M., Straver M. & Kumaran M. K. (2001). Comparison of four hygrothermal models in terms of long-term performance assessment of wood-frame constructions. *NRC Publications Archive*, 1-19.
- Nshimiyimana P., Hema C., Zoungrana O., Messan A. & Courard L. (2020). *Thermophysical and mechanical properties of compressed earth blocks containing fibres : By-product of okra plant & polymer waste*. *WIT Transactions on The Built Environment*, 195, 149-161. <https://doi.org/10.2495/ARC200121>
- Nshimiyimana P., Messan A. & Courard L. (2020). Physico-Mechanical and Hygro-Thermal Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders. *Materials* 2020, 13(17), 3769. <https://doi.org/10.3390/ma13173769>.
- Nshimiyimana P., Messan A. & Courard L. (2021). Hydric and Durability Performances of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders : Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash. *ASCE* 33(6), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003745)
- NZS. (1998). *NZS 4298:1998: Materials and workmanship for earth buildings*.
- Obonyo E., Exelbirt J. & Baskaran M. (2010). Durability of Compressed Earth Bricks: Assessing Erosion Resistance Using the Modified Spray Testing. *Sustainability*, 2(12) 3639-3649. <https://doi.org/10.3390/su2123639>
- Olissan O. A. (2017). Influence de la fenestration en vitre sur le confort thermique des bâtiments en climat tropical et humide: cas de la bande côtière du Bénin. *Thèse de Doctorat*, 289 p. Université de Liège.
- Olissan O. A., Kouchade C., Andre P., Awanou C. N. & Hauglustaine, J.-M. (2016). Examen du PMV/PPD de Fanger dans les ambiances naturellement ventilées de la bande côtière



- du Bénin. *RESEARCH ARTICLE*, 5, 766-777.
- Soré S.O., Messan A., Prud'homme E., Escadeillas G. & Tsobnang F. (2018). Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. *Construction and Building Materials*, 165, 333-345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>
- Organisation Météorologique Mondiale. (2020). État du climat en Afrique.
- Osséni S., Ahouannou C., Sanya E. & Jannot Y. (2017). Hot Plate Method with Two Simultaneous Temperature Measurements for Thermal Characterization of Building Materials. *International Journal of Thermophysics*, 38(6), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2217-7>
- Oswin C. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65(12), 416-421. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.5000651216>
- Ouedraogo M., Dao K., Millogo Y., Aubert J., Messan A., Seynou M., Zerbo L. & Gomina M. (2019). Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw. *Journal of Building Engineering*, 23, 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.005>
- Ouertani S., Simo-Tagne M. & Rémond R. (2022). Sorption isotherms and moisture transfer properties of seven Central Africa hardwood species. *Wood Material Science and Engineering*, 0(0), 1-10. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2051736>
- Pacheco-Torgal F. & Jalali S. (2012). Earth construction : Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512-519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- PAG1. (2016). Programme d'actions du gouvernement 2016-2021.
- PAG2. (2021). Programme d'Actions du Gouvernement 2021-2026.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.004>
- Paneri A., Wong I. L. & Burek S. (2019). Transparent insulation materials: An overview on past, present and future developments. *Solar Energy*, 184, 59-83. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.091>
- Pavan G. S., Ullas S. N. & Rao K. S. N. (2020). Shear behavior of cement stabilized rammed earth assemblages. *Journal of Building Engineering*, 27, 100966. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100966>
- Pavlík Z., Žumár, J., Medved I. & Černý R. (2012). Water Vapor Adsorption in Porous Building Materials: Experimental Measurement and Theoretical Analysis. *Transport in Porous Media*, 91(3), 939-954. <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9884-9>
- Peng H., Walker P., Maskell D. & Jones B. (2021). Structural characteristics of load bearing straw bale walls. *Construction and Building Materials*, 287, 122911. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122911>
- Pérez-Lombard L., Ortiz J. & Pout C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Pernetti R., Prada A. & Baggio P. (2013). On the influence of several parameters in energy model calibration: The case of a historical building. *Building Simulation Applications*, 2013, 263-272.
- Perré P. & Agoua E. (2002). Mass transfer in MDF (medium density fiberboard): Identification of structural parameters from permeability and diffusivity measurements. *13th International Drying Symposium*, 178-187.

- Peuportier B. (2003). Eco-Conception des bâtiments: Bâtir en préservant l'environnement. *Ecole des Mines de Paris*, 276p.
- Pilechiha P., Mahdavinejad M., Pour Rahimian F., Carnemolla P. & Seyedzadeh S. (2020). Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. *Applied Energy*, 261, 114356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>
- Plastics Europe. (2012). Plastics - The Facts 2012: An analysis of European latest plastics production, demand and waste data for 2011. *Association of Plastics & Manufacturers*, 40p.
- Qin M., Belarbi R., Aït-Mokhtar A. & Allard F. (2009). Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings. *Automation in Construction*, 18(5), 624-631. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.12.006>
- Qin M. & Yang J. (2016). Evaluation of different thermal models in EnergyPlus for calculating moisture effects on building energy consumption in different climate conditions. *Building Simulation*, 9, 15-25. <https://doi.org/10.1007/s12273-015-0263-2>
- Quagliarini E., Orazio M. D. & Lenci S. (2015). The properties and durability of adobe earth-based masonry blocks. *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks*, 2015, 361-378. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00016-4>
- Rafidiarison H. & Nicolas A. (2013). Caractérisation expérimentale des transferts couplés de chaleur et de masse dans les enveloppes de constructions en bois. *Mechanics & Industry* 13(5), 347-352. <https://doi.org/10.1051/meca/2012032>
- Raftery P., Keane M. & Costa A. (2011). Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data. *Energy and Buildings*, 43(12), 3666-3679. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.039>
- Rakhshan K., Friess W. A. & Tajerzadeh S. (2013). Evaluating the sustainability impact of improved building insulation: A case study in the Dubai residential built environment. *Building and Environment*, 67, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.010>
- Rashad A. M., Seleem H. E. H. & Shaheen A. F. (2014). Effect of Silica Fume and Slag on Compressive Strength and Abrasion Resistance of HVFA Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(1), 69-81. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0051-2>
- Rashad M., Żabnieńska-Góra A., Norman L. & Jouhara H. (2022). Analysis of energy demand in a residential building using TRNSYS. *Energy*, 254, 124357. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124357>
- Reddy, T. A. (2006). Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. *ASHRAE Transactions*, 112(1), 1-15.
- Redman A. L., Bailleres H., Turner I. & Perré P. (2012). Mass transfer properties (permeability and mass diffusivity) of four australian hardwood species. *BioResources*, 7(3), 3410-3424. <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.3410-3424>
- Reichert S., Menges A. & Correa D. (2015). Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design*, 60, 50-69. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010>
- Remki B., Abahri K., Tahlaiti M. & Belarbi R. (2012). Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient. *International Journal of Thermal Sciences*, 57, 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.005>
- Ren K. B. & Kagi D. A. (1995). Upgrading the durability of mud bricks by impregnation. *Building and Environment*, 30(3), 433-440. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)00056-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00056-1)

- Ren W., Han S., Li J. & Liu M. (2017). Investigation of the relative abrasion resistance of concrete pavement with chip-sprinkled surfaces. *Wear*, 382-383, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.011>
- Revuelta-Acosta J. D., Garcia-Diaz A., Soto-Zarazua G. M. & Rico-Garcia E. (2010). Adobe as a sustainable material: a thermal performance. *Journal of Applied Sciences*, 10(19), 2211-2216.
- Ricciardi P. & Buratti C. (2012). Thermal comfort in open plan offices in northern Italy: An adaptive approach. *Building and Environment*, 56, 314-320. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.019>
- Rigassi V. & CRITerre-EAG (1985). Compressed earth blocks: manual of production. *Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien*, 1, 143p.
- Rijal H. B., Humphreys M. A. & Nicol J. F. (2017). Towards adaptive model for thermal comfort in Japanese offices. *Building Research & Information*, 45(7), 717-729. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1288450>
- Rim K. Al, Ledhem A., Douzane O., Dheilly R. M. & Queneudec M. (1999). Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *21*(4), 269-276. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00008-6)
- Rizi R. A. & Eltaweel A. (2021). A user detective adaptive facade towards improving visual and thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 33, 101554. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101554>
- Robaa S. M. (2011). Effect of urbanization and industrialization processes on outdoor thermal human comfort in Egypt. *Atmospheric and Climate Sciences*, 1, 100-112. <https://doi.org/10.4236/acs.2011.13012>
- Rode C. & Grau K. (2008). Moisture buffering and its consequence in whole building hygrothermal modeling. *Journal of Building Physics*, 31(4), 333-360. <https://doi.org/10.1177/1744259108088960>
- Rode C., Peuhkuri R. H., Mortensen L. H., Hansen K. K., Time B., Gustavsen A., Ojanen T., Ahonen J., Svennberg K., Arfvidsson J. & Harderup L.-E. (2005). Moisture Buffering of Building Materials. *BYG Report No. R-127*, 79p.
- Roelofsen P. (2016). A computer model for the assessment of employee performance loss as a function of thermal discomfort or degree of heat stress. *Intelligent Buildings International*, 8(4), 194-215. <https://doi.org/10.1080/17508975.2015.1011071>
- Rousseau, M. Z. (2003). Heat, air and moisture control strategies for managing condensation in walls. *IRC Building Science Insight 2003 Seminar Series*.
- Rousset P., Perré P. & Girard P. (2004). Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by a thermal treatment at high temperature. *Holz als Roh - und Werkstoff*, 62(2), 113-119. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0459-5>
- Sabapathy K. A. & Gedupudi S. (2020). On the influence of concrete-straw-plaster envelope thermal mass on the cooling and heating loads for different climatic zones of India. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123117>
- Sagbo E., Laibi A., Senou M., Josse R., Mensah J., Borschneck D. & Noack Y. (2015). Physico-Chemical and Mineralogical Characterization of some Clays from Coastal Sedimentary Basin of Benin used in Ceramic. *Research Journal of Chemical Sciences*, 5(12), 1-19.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063>
- Salvalai G., Pfafferott J. & Sesana M. M. (2013). Assessing energy and thermal comfort of

- different low-energy cooling concepts for non-residential buildings. *Energy Conversion and Management*, 76, 332-341. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.064>
- Salvien S., Agbon P., Kelome N. C. & Glodji L. A. (2020). Preliminary mineralogical and geotechnical characteristics of Zogbodomey clays in the coastal sedimentary basin of Benin (West Africa). *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 12(3), 327-33. <https://doi.org/10.1080/20421338.2020.1733796>
- Samapundo S., Devlieghere F., Meulenaer B. De, Atukwase A., Lamboni Y. & Debevere J. M. (2007). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.040>
- Schijndel A. W. M. Van, & Hensen J. L. M. (2005). Integrated heat, air and moisture modeling toolkit in matlab. *Building Simulation*, Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association Conference, Montreal. 1107-1114.
- Schoen L. J., Alspach P. F., Arens E. A., Aynsley R. M., Bean R., Eddy J., Int-hout D., Khalil E. E., Simmonds P., Stoops J. L., Turner S. C., Walter W. F., Hall R. L., Anderson J. R., Barnaby C. S., Bruning S. F., Clark J. A., Emmerich S. J. & Ferguson J. M. (2013). ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy. *ASHRAE Standard*, 2013(55).
- Sekloka H. G. R., Yabi C. P., Cloots R. & Gibigaye M. (2022). Elaboration of a Road Material Based on Clayey Soil and Crushed Sand. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 18(6), 1595-1605. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.022434>
- Shahcheraghian A., Ahmadi R. & Malekpour A. (2021). Utilising Latent Thermal Energy Storage in Building Envelopes to Minimise Thermal Loads and Enhance Comfort. *Journal of Energy Storage*, 33, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102119>
- Shamsi M. H., Ali U., Mangina E. & O'Donnell J. (2020). A framework for uncertainty quantification in building heat demand simulations using reduced-order grey-box energy models. *Applied Energy*, 275, 115141. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115141>
- Silva A. S. & Ghisi E. (2014). Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. *Energy and Buildings*, 76, 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.001>
- Singh S., Singh J., Kumar R. & Gupta P. K. (2021). Stability of compressed earth blocks using sugarcane bagasse ash and wheat straw. *Materials Today: Proceedings*, 51(1), 993-997. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.023>
- Sirat A., Belhadri M., Boudjenane N. & Bennama T. (2016). Extrusion et visualisation des pâtes d' argile au travers des orifices- Application à la céramique (Extrusion and visualization of clay pulp through orifices-Application to the ceramic). *J. Mater. Environ. Sci.* 7(3), 770-780.
- Software di progettazione 3D | Modellazione 3D sul Web | SketchUp.* (s. d.). Consulté 11 décembre 2022, à l'adresse <https://www.sketchup.com/it>
- Sozer H. (2010). Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Building and Environment*, 45(12), 2581-2593. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.004>
- Steeman M., Janssens A., Steeman H. J., Belleghem M. Van & Paepe M. De. (2010). On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model. *Building and Environment*, 45(4), 865-877. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.006>
- Sterling T. D., Collett C., Rumel D., D, T., Saúde R. & Paulo S. (1991). A epidemiologia dos « edificios doentes ». *Rev. Saúde públ., S. Paulo*, 25(1), 56-63.

- Sui Jiang S. S., Hao J. L. & De Carli J. N. (2021). Hygrothermal and mechanical performance of sustainable concrete: A simulated comparison of mix designs. *Journal of Building Engineering*, 34, 101859. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101859>
- Sun Y., Wilson R. & Wu Y. (2018). A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort. *Applied Energy*, 226, 713-729. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.094>
- Swenson A. H. & Stadie N. P. (2019). Langmuir's Theory of Adsorption: A Centennial Review. *ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 35(16), 5409-5426. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00154>
- Taallah B. & Guettala A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058>
- Taleb H. M. (2014). Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in U.A.E. buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 3(2), 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.01.002>
- Tarantini M., Pernigotto G. & Gasparella A. (2017). A Co-Citation Analysis on Thermal Comfort and Office Buildings. *Buildings*, 7(36), 17. <https://doi.org/10.3390/buildings7020036>
- Tian Z., Shi X. & Hong S. (2021). Exploring data-driven building energy-efficient design of envelopes based on their quantified impacts. *Journal of Building Engineering*, 42, 103018. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103018>
- Timmermann E. O. (2003). Multilayer sorption parameters: BET or GAB values? *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 220(1-3), 235-260. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(03\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(03)00059-1)
- Toe D. H. C. & Kubota T. (2013). Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database. *Frontiers of Architectural Research*, 2(3), 278-291. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.06.003>
- Toukourou C. A., Semassou G. C., Ahouannou C., Avamasse S. & Vianou A. (2016). Thermomechanical Characterisation of Compressed Earth Blocks Added with Sawdust. *Physical Science International Journal*, 12(4), 1-9. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2016/29393>
- Touré P. M., Sambou V., Faye M., Thiam A., Adj M. & Azilidon D. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). *Journal of Building Engineering*, 13, 266-271. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.012>
- Trabelsi A. (2010). Etudes numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. *Thèse de Doctorat*, 180p. Université de La Rochelle.
- Transsolar | KlimaEngineering*. (s. d.). Consulté 11 décembre 2022, à l'adresse <https://transsolar.com/fr>
- Turco C., Junior A. C. P., Teixeira E. R. & Mateus R. (2021). Optimisation of Compressed Earth Blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 309, 125140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125140>

- Turco C., Junior A. D. P., Teixeira E. & Mateus R. (2022). Authors closure to the Discussion of the Review article “ Optimisation of Compressed earth blocks ( CEBs ) using natural origin materials : A systematic literature review ”. *Construction and Building Materials*, 325, 126888. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126888>
- UNEP. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction. *Global Status Report*, 20p.
- Velasco-Aquino A. A., Espuna-Mujica J. A., Perez-Sanchez J. F., Zuñiga-Leal C., Palacio-Perez A. & Suarez-Dominguez E. J. (2021). Compressed earth block reinforced with coconut fibers and stabilized with aloe vera and lime. *J. Eng. Des. Technol.*, 19(3), 795–807.
- Verne P. J. & Innovantes T. (2009). Eco-matériaux : les enjeux et les problématiques pour la mécanique. *19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*. Marseille, 24-28 août 2009.
- Vimalanathan K. & Babu T. R. (2014). The effect of indoor office environment on the work performance , health and well-being of office workers. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12(113), 1-8.
- Vyncke J., Kupers L. & Denies N. (2018). Earth as Building Material – an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics. *MATEC Web of Conferences*, 149, 02001, 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902001>
- Walker P. J. (1995). Strength , Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. *Cement and Concrete Composites*, 17(4), 301-310. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00019-9](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00019-9)
- Walker P. J. & Standards Australia. (2001). The Australian earth building handbook. *Handbook (Standards Association of Australia)*, 195, 152.
- Wang D., Hu L., Du H., Liu Y., Huang J., Xu Y. & Liu J. (2020). Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109772. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109772>
- Wang H., Chiang P., Cai Y., Li C., Wang X., Chen T., Wei S. & Huang Q. (2018). Application of Wall and Insulation Materials on Green Building : A Review. *Sustainability*, 10, 3331. <https://doi.org/10.3390/su10093331>
- Wang S., Yan C. & Xiao F. (2012). Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy and Buildings*, 55, 873-888. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.037>
- What is WUFI®? | WUFI (en). (s. d.). Consulté 10 novembre 2022, à l’adresse <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>
- Woloszyn M., Kalamees T., Abadie M. O., Steeman M. & Sasic Kalagasidis A. (2009). The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. *Building and Environment*, 44(3), 515-524. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.017>
- Wu M., Johannesson B. & Geiker M. (2014). A study of the water vapor sorption isotherms of hardened cement pastes: Possible pore structure changes at low relative humidity and the impact of temperature on isotherms. *Cement and Concrete Research*, 56, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.008>
- Wu Z., Li N., Cui H., Peng J., Chen H. & Liu P. (2017). Using upper extremity skin temperatures to assess thermal comfort in office buildings in Changsha, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph14101092>
- Wu Z., Li N., Wargocki P., Peng J. & Li J. (2019). Field study on thermal comfort and energy

- saving potential in 11 split air-conditioned office buildings in Changsha, China. *Energy*, 182, 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.204>
- Yang L., Yan H. & Lam J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. *Applied Energy*, 115, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>
- Yao R., Li B. & Liu J. (2009). A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44(10), 2089-2096. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>
- Zaki S. A., Damiati S. A., Rijal H. B., Hagishima A. & Abd Razak A. (2017). Adaptive thermal comfort in university classrooms in Malaysia and Japan. *Building and Environment*, 122, 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.016>
- Zardari M. A., Lakho N. A. & Amur M. A. (2018). Structural behaviour of large size compressed earth blocks stabilized with jute fiber. *Journal of Engineering Research*, 60-72.
- Zelinka S. L., Glass S. V. & Thybring E. E. (2018). Myth versus reality: Do parabolic sorption isotherm models reflect actual wood–water thermodynamics? *Wood Science and Technology*, 52(6), 1701-1706. <https://doi.org/10.1007/s00226-018-1035-9>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102070>
- Zhang S., Cheng Y., Fang Z., Huan C. & Lin Z. (2017). Optimization of room air temperature in stratum-ventilated rooms for both thermal comfort and energy saving. *Applied Energy*, 204, 420-431. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.064>
- Zhang H., Yang R., You S., Zheng W., Zheng X. & Ye T. (2018). The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation. *Building and Environment*, 134, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.037>
- Zhao M., Mehra S. R. & Künzeli H. M. (2022). Energy-saving potential of deeply retrofitting building enclosures of traditional courtyard houses – A case study in the Chinese Hot-Summer-Cold-Winter zone. *Building and Environment*, 217, 109106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109106>
- Zhao Z., Houchati M. & Beitelmal A. (2017). An Energy Efficiency Assessment of the Thermal Comfort in an Office building. *Energy Procedia*, 134, 885-893. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.550>
- Zohoun S., Agoua E., Degan G. & Perre P. (2003) An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime. *Heat and Mass Transfer*, 39, 147–155. DOI 10.1007/s00231-002-0324-9
- Zoungrana O., Traoré M. B. & Messan A. (2021). The Paradox around the Social Representations of Compressed Earth Block Building Material in Burkina Faso: The Material for the Poor or the Luxury Material? *Open Journal of Social Sciences*, 9, 50-65. <https://doi.org/10.4236/jss.2021.91004>

## ANNEXES

---

### Annexe 1

#### *Annexe 1.1* : Questionnaire pour enquête de confort thermique

*Veillez lire chaque question attentivement*

#### *Informations personnelles*

Nom : \_\_\_\_\_

Sexe (*cochez la case correspondante*) :      Homme [ ]                      Femme [ ]

Age : \_\_\_\_\_ ans                      Taille : \_\_\_\_\_ m                      Poids : \_\_\_\_\_ kg

#### *Emploi*

Poste : \_\_\_\_\_

Description succincte de votre activité : \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Travaillez-vous à :              Plein temps [ ]                      Temps partiel [ ]

Si vous travaillez à temps partiel, quels sont vos horaires et/ou jours de travail habituels ? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Avez-vous des horaires flexibles ou stricts (préciser) ? \_\_\_\_\_

Habituellement, à quelle heure arrivez-vous le matin ? \_\_\_\_\_  
à quelle heure partez-vous le soir ? \_\_\_\_\_

Quel est votre moyen habituel de transport domicile - travail ?

Transport publics [ ]      Voiture [ ]      Moto [ ]      Vélo [ ]      Marche [ ]

En temps normal,    combien d'heures par jour passez-vous à votre bureau ? \_\_\_\_\_ heures  
                              combien d'heures par jour passez-vous devant un écran ? \_\_\_\_\_ heures

Depuis combien de temps travaillez-vous dans ce bâtiment ?    \_\_\_\_\_ années    \_\_\_\_\_ mois

Depuis combien de temps travaillez-vous dans ce bureau ?    \_\_\_\_\_ années    \_\_\_\_\_ mois



Avez-vous des contraintes d'habillement importantes pour votre travail (exemple : port du costume et de la cravate,...) ? OUI [ ] NON [ ]

Si OUI, préciser : \_\_\_\_\_

Qualifieriez-vous votre travail de :

Très stressant [ ] Stressant [ ] Peu stressant [ ] Pas stressant [ ]

Aimez-vous votre travail ?

Pas du tout [ ] Un peu [ ] Normalement [ ] Enormément [ ]

Appréciez-vous l'atmosphère relationnelle dans laquelle vous exercez votre travail ?

Pas du tout [ ] Un peu [ ] Normalement [ ] Enormément [ ]

Commentaires supplémentaires concernant votre emploi : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### *Qualité de l'ambiance climatique*

Comment trouvez-vous de façon générale la température de votre bureau en saison chaude ?

Très chaud   Chaud   Légèrement chaud   Normale   Légèrement froid   Froid   Très froid  
                 

Comment trouvez-vous la qualité de l'air de votre bureau en saison chaude ? (*cocher la bonne réponse dans chacune des cases du tableau*)

Sec [ ] Humide [ ] Malodorant [ ] Inodore [ ]

Les appareils de conditionnement d'air de votre bureau (climatiseur ou ventilateur) restent-ils toujours allumés en saison chaude ? OUI [ ] NON [ ]

Comment trouvez-vous, de façon générale, la température de votre bureau en période fraîche ?

Très chaud   Chaud   Légèrement chaud   Normale   Légèrement froid   Froid   Très froid

Comment trouvez-vous la qualité de l'air de votre bureau en période de fraîcheur ? (*cocher la bonne réponse dans chacune des cases du tableau*)

Sec [ ] Humide [ ] Malodorant [ ] Inodore [ ]

Les appareils de conditionnement d'air de votre bureau (climatiseur ou ventilateur) restent-ils toujours allumés en période de fraîcheur ? OUI [ ] NON [ ]

Le mouvement d'air dans votre bureau vous paraît-il gênant ? OUI [ ] NON [ ]

Comment trouvez-vous l'environnement lumineux de votre bureau ?

Trop lumineux [ ] Lumineux [ ] Normal [ ] Sombre [ ] Trop sombre [ ]

Comment percevez-vous le bruit ambiant dans votre bureau ?

Dérangeant [ ] Peu perceptible [ ] Perceptible [ ]

Commentaires supplémentaires concernant la qualité de l'ambiance climatique : \_\_\_\_\_

-----  
-----  
-----

### *Santé*

*Nous vous serions reconnaissants de bien vouloir remplir cette partie. Ces informations nous permettront d'effectuer une estimation plus précise de vos exigences en terme de confort d'ambiance et resteront strictement confidentielles et anonymes lors de leur analyse. Nous comprendrions toutefois que vous ne souhaitiez pas y répondre.*

Souffrez-vous d'un des maux suivants ?

	Toujours	Souvent	Parfois	Rarement	Jamais
Mal de tête	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lourdeur dans la tête	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fatigue	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Enrouement, gorge sèche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Irritation, encombrement du nez	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Irritation, brûlure des yeux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Difficulté à se concentrer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sécheresse, démangeaison de la peau	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Etes-vous fumeur ? OUI [ ] NON [ ]

Si NON, est-ce que des personnes fument dans votre bureau ? OUI [ ] NON [ ]

Etes-vous sous traitement médical ? OUI [ ] NON [ ]

Si OUI, merci de bien vouloir préciser : \_\_\_\_\_

-----

Indiquez sur l'échelle suivante à quel point vous vous sentez sensible aux conditions d'ambiance (*encerclez le numéro correspondant à votre réponse*).

Très sensible    1    2    3    4    5    6    7    Pas du tout sensible

D'autres aspects de votre santé sont-ils susceptibles d'affecter votre sensibilité aux conditions d'ambiance ?                    OUI [ ]                    NON [ ]

Si OUI, veuillez le préciser : \_\_\_\_\_

Commentaires supplémentaires concernant votre santé : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

*\*\*Merci pour votre coopération et le temps que vous avez consacré à ce questionnaire\*\**

**Annexe 1.2 :** Caractéristiques des instruments de mesure pour l'évaluation du confort thermique (extrait de la norme ISO 7726\_2001)

**Table 2 — Characteristics of measuring instruments**

Quantity	Symbol	Class C (comfort)			Class S (thermal stress)			Comments
		Measuring range	Accuracy	Response time (90%)	Measuring range	Accuracy	Response time (90%)	
Air temperature	$t_a$	10 °C to 40 °C	Required: $\pm 0,5$ °C Desirable: $\pm 0,2$ °C These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_r - t_a $ equal to 10 °C.	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument.	- 40 °C to + 120 °C	Required: - 40 °C to 0 °C: $\pm (0,5 + 0,01  t_a )$ °C > 0 °C to 50 °C: $\pm 0,5$ °C > 50 °C to 120 °C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_a - 50)]$ °C Desirable: $\frac{\text{required accuracy}}{2}$ These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_r - t_a $ equal to 20 °C.	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument.	The air temperature sensor shall be effectively protected from any effects of the thermal radiation coming from hot or cold walls. An indication of the mean value over a period of 1 min is also desirable.
Mean radiant temperature	$\bar{t}_r$	10 °C to 40 °C	Required: $\pm 2$ °C Desirable: $\pm 0,2$ °C These levels are difficult or even impossible to achieve in certain cases with the equipment normally available. When they cannot be achieved, indicate the actual measuring precision.	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument.	- 40 °C to + 150 °C	Required: - 40 °C to 0 °C: $\pm (5 + 0,02  t_a )$ °C > 0 °C to 50 °C: $\pm 5$ °C > 50 °C to 150 °C: $\pm [5 + 0,08 (t_r - 50)]$ °C Desirable: - 40 °C to 0 °C: $\pm (0,5 + 0,01  t_r )$ °C > 0 °C to 50 °C: $\pm 5$ °C > 50 °C to 150 °C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_r - 50)]$ °C	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument.	When the measurement is carried out with a black sphere, the inaccuracy relating to the mean radiant temperature can be as high as $\pm 5$ °C for class C and $\pm 20$ °C for class S according to the environment and the inaccuracy for $t_a$ , $t_b$ and $t_g$ .

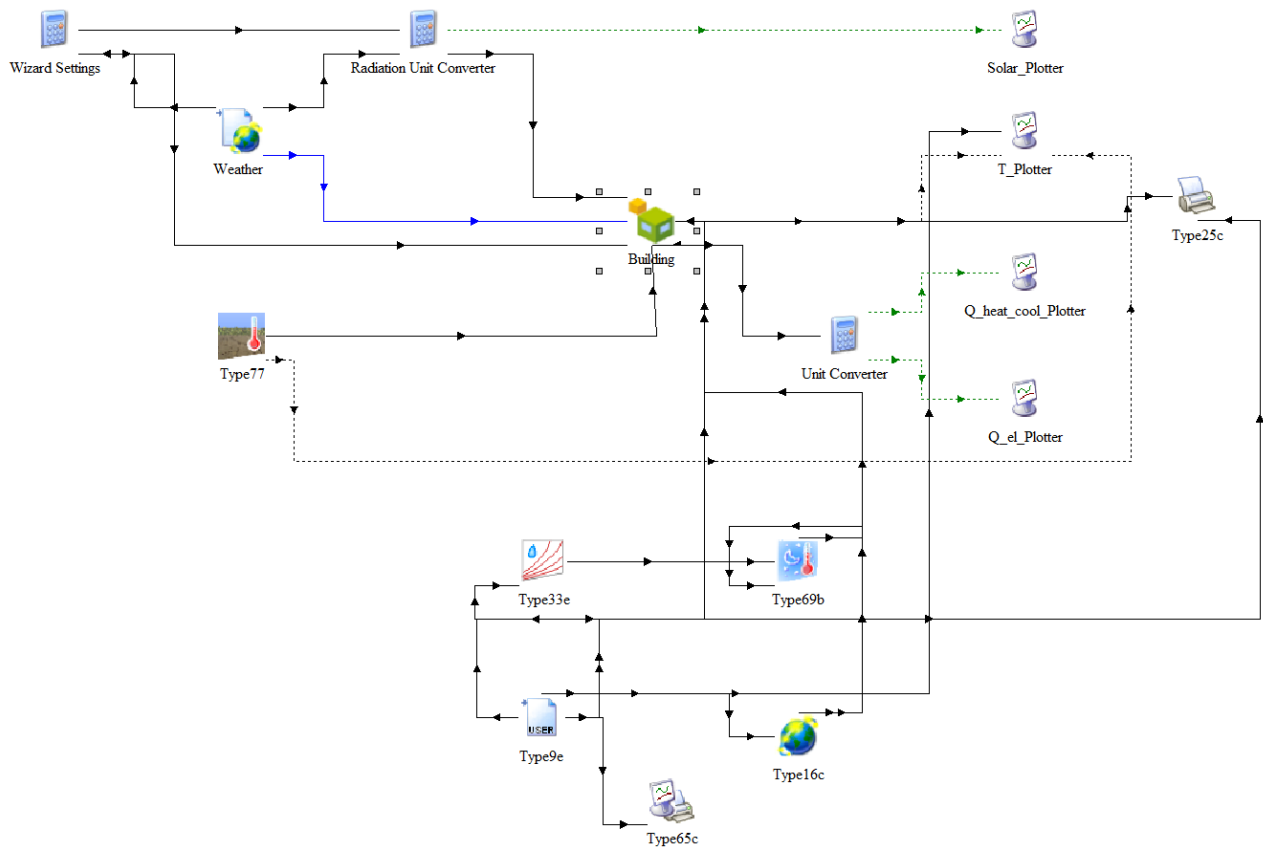
**Table 4 — Criteria for a homogeneous and steady-state environment**

Quantity	Class C (comfort) Factor $X$	Class S (thermal stress) Factor $X$
Air temperature	3	4
Mean radiant temperature	2	2
Radiant temperature asymmetry	2	3
Mean air velocity	2	3
Vapour pressure	2	3

NOTE — Deviation between each individual quantity and their mean value shall be less than that obtained by multiplying the required measuring accuracy (table 2) by the appropriate factor  $X$  from this table.

## Annexe 2

### Annexe 2.1



**Figure A5.1 :** Scénario de simulation TRNSYS prenant en compte les données météoriques mesurées sur le terrain.

Annexe 2.2

Tableau A5-1 : Indice d'évaluation des résultats de simulation TRNSYS

Simulation	Infiltration	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$C_p$ (kJ/m.K)	$U_{vitrage}$ (W/m <sup>2</sup> .K)	NMBE	CV(RMSE)	R2	fit
1	0.3	1950	1.55	5.58	5.45	0.21	2.71	0.6	25.51
2	0.3	1950	1.32	4.752	5.45	0.17	2.71	0.6	25.62
3	0.3	1950	1.08	3.888	5.45	0.1	0.69	0.6	25.75
4	0.3	1950	1.78	6.408	5.45	0.27	2.73	0.61	25.38
5	0.3	1950	2.02	7.272	5.45	0.29	2.74	0.61	25.32
6	0.3	1950	1.08	3.888	5.75	0.64	2.83	0.6	24.72
7	0.3	1950	1.32	4.752	5.75	0.7	2.86	0.607	24.46
8	0.3	1950	1.55	5.58	5.75	0.75	2.89	0.609	24.26
9	0.3	1950	1.78	6.408	5.75	0.79	2.9	0.61	24.1
10	0.3	1950	2.02	7.272	5.75	0.82	2.91	0.612	23.96
11	0.3	1658	1.08	3.888	5.45	0.64	2.86	0.604	24.6
12	0.3	1658	1.32	4.752	5.45	0.7	2.88	0.607	24.35
13	0.3	1658	1.55	5.58	5.45	0.75	2.9	0.61	24.16
14	0.3	1658	1.78	6.408	5.45	0.78	2.92	0.611	24
15	0.3	1658	2.02	7.272	5.45	0.81	2.93	0.61	23.87
16	0.3	1658	1.08	3.888	5.75	0.65	2.86	0.607	24.58
17	0.3	1658	1.32	4.752	5.75	0.71	2.88	0.609	24.32
18	0.3	1658	1.55	5.58	5.75	0.75	2.9	0.611	24.13
19	0.3	1658	1.78	6.408	5.75	0.79	2.92	0.613	23.97
20	0.3	1658	2.02	7.272	5.75	0.82	2.94	0.614	23.83
21	0.3	2243	1.08	3.888	5.45	0.62	2.82	0.6	24.85
22	0.3	2243	1.32	4.752	5.45	0.69	2.85	0.602	24.61
23	0.3	2243	1.55	5.58	5.45	0.74	2.87	0.604	24.42
24	0.3	2243	1.78	6.408	5.45	0.78	2.89	0.606	24.27
25	0.3	2243	2.02	7.272	5.45	0.81	2.9	0.607	24.12
26	0.3	2243	1.08	3.888	5.75	0.64	2.82	0.601	24.84
27	0.3	2243	1.32	4.752	5.75	0.7	2.85	0.604	24.59
28	0.3	2243	1.55	5.58	5.75	0.75	2.87	0.606	24.39
29	0.3	2243	1.78	6.408	5.75	0.79	2.89	0.608	24.23
30	0.3	2243	2.02	7.272	5.75	0.81	2.9	0.609	24.09
31	0.5	1950	1.55	5.58	5.45	0.37	2.72	0.61	25.73
32	0.5	1950	1.32	4.752	5.45	0.32	2.7	0.614	2.9
33	0.5	1950	1.08	3.888	5.45	0.26	2.68	0.611	26.1
34	0.5	1950	1.78	6.408	5.45	0.41	2.73	0.617	25.6
35	0.5	1950	2.02	7.272	5.45	0.43	2.75	0.618	25.48
36	0.5	1950	1.08	3.888	5.75	0.78	2.85	0.617	24.72
37	0.5	1950	1.32	4.752	5.75	0.83	2.88	0.619	24.43
38	0.5	1950	1.55	5.58	5.75	0.87	2.91	0.621	24.21
39	0.5	1950	1.78	6.408	5.75	0.91	2.93	0.622	24.04
40	0.5	1950	2.02	7.272	5.75	0.94	2.94	0.623	23.89

41	0.5	1658	1.08	3.888	5.45	<b>0.26</b>	<b>2.7</b>	<b>0.614</b>	<b>25.96</b>
42	0.5	1658	1.32	4.752	5.45	<b>0.32</b>	<b>2.72</b>	<b>0.616</b>	<b>25.75</b>
43	0.5	1658	1.55	5.58	5.45	<b>0.37</b>	<b>2.74</b>	<b>0.618</b>	<b>25.58</b>
44	0.5	1658	1.78	6.408	5.45	<b>0.41</b>	<b>2.75</b>	<b>0.619</b>	<b>25.45</b>
45	0.5	1658	2.02	7.272	5.45	<b>0.44</b>	<b>2.77</b>	<b>0.62</b>	<b>25.33</b>
46	0.5	1658	1.08	3.888	5.75	<b>0.78</b>	<b>2.87</b>	<b>0.619</b>	<b>25.57</b>
47	0.5	1658	1.32	4.752	5.75	<b>0.84</b>	<b>2.9</b>	<b>0.621</b>	<b>24.28</b>
48	0.5	1658	1.55	5.58	5.75	<b>0.88</b>	<b>2.93</b>	<b>0.623</b>	<b>24.06</b>
49	0.5	1658	1.78	6.408	5.75	<b>0.91</b>	<b>2.95</b>	<b>0.624</b>	<b>23.89</b>
50	0.5	1658	2.02	7.272	5.75	<b>0.94</b>	<b>2.96</b>	<b>0.625</b>	<b>23.74</b>
51	0.5	2243	1.08	3.888	5.45	<b>0.25</b>	<b>2.67</b>	<b>0.609</b>	<b>26.23</b>
52	0.5	2243	1.32	4.752	5.45	<b>0.31</b>	<b>2.68</b>	<b>0.611</b>	<b>26.03</b>
53	0.5	2243	1.55	5.58	5.45	<b>0.36</b>	<b>2.7</b>	<b>0.613</b>	<b>25.87</b>
54	0.5	2243	1.78	6.408	5.45	<b>0.4</b>	<b>2.72</b>	<b>0.615</b>	<b>25.73</b>
55	0.5	2243	2.02	7.272	5.45	<b>0.43</b>	<b>2.73</b>	<b>0.616</b>	<b>25.62</b>
56	0.5	2243	1.08	3.888	5.75	<b>0.77</b>	<b>2.84</b>	<b>0.615</b>	<b>24.86</b>
57	0.5	2243	1.32	4.752	5.75	<b>0.83</b>	<b>2.87</b>	<b>0.617</b>	<b>24.57</b>
58	0.5	2243	1.55	5.58	5.75	<b>0.87</b>	<b>2.89</b>	<b>0.618</b>	<b>24.35</b>
59	0.5	2243	1.78	6.408	5.75	<b>0.9</b>	<b>2.91</b>	<b>0.62</b>	<b>24.17</b>
60	0.5	2243	2.02	7.272	5.75	<b>0.93</b>	<b>2.92</b>	<b>0.621</b>	<b>24.02</b>