



**EXPLORATION DU POTENTIEL HYGROSCOPIQUE DES BRIQUES DE TERRE
COMPRIMEE (BTC) POUR L'AMELIORATION DU CONFORT THERMIQUE
DE L'HABITAT EN CLIMAT CHAUD**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

SPECIALITE : ROUTES ET OUVRAGES D'ART

Présenté et soutenu publiquement le 02 Juillet 2019 par

Franck Aimé YAO (20150099)

Directeur de mémoire : Dr. Adamah MESSAN, Maitre de conférences CAMES

Encadrant 2iE : M. Césaire HEMA, Assistant d'enseignement et de recherche
et doctorant 2iE/UCLouvain

Structure d'accueil du stage : **Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD)**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Adamah MESSAN

Membres et correcteurs : M. Arnaud OUEDRAOGO
M. Philbert NSHIMIYIMANA
M. Césaire HEMA

Promotion [2017/2018]

CITATION

«L'innovation, c'est une situation qu'on choisit parce qu'on a une passion brûlante pour quelque chose.»

Steve Jobs, 1955-2011

REMERCIEMENTS

Il est incontestable que ce manuscrit n'aurait pu voir le jour sans le soutien et l'accompagnement de nombreuses personnes à qui j'exprime mes vifs remerciements.

Ces remerciements s'adressent particulièrement à :

- Mon directeur de mémoire, le responsable du LEMHaD, le Professeur Adamah MESSAN. Je souhaite lui exprimer ma profonde gratitude. Merci de m'avoir accueilli au sein de votre équipe de travail et de m'avoir encadré tout le long de ce stage. Merci pour tout ce que vous m'avez appris durant ces mois tant professionnellement qu'humainement ;
- Mon encadreur M. Césaire HEMA pour la confiance portée à ma personne. Merci pour les nombreux conseils, l'accueil chaleureux la disponibilité malgré les plannings chargés.
- tout le personnel du LEMHaD qui a participé au bon déroulement de ce stage pour la rédaction de mon mémoire de fin d'études. Un grand merci à M. Salifou KABORE ;
- mes camarades de promotion, plus particulièrement mes compagnons de labo, AZIABLE Andy, Eric AZOUMAH et SEINI Hassane ;
- ma Mère YAO Amenan Odile, je ne saurai trouver les mots justes pour te remercier d'avoir toujours prier pour moi, de m'avoir toujours soutenu, d'avoir toujours cru en moi.

RÉSUMÉ

Les matériaux de construction usuellement utilisés en Afrique que sont le béton et le mortier de ciment présentent un certain nombre de désavantages tels que leurs impacts dommageables sur l'environnement et leurs mauvaises propriétés thermiques. Bien moins utilisée, la terre semble apporter des réponses adéquates aux problèmes posés au vu de l'habitat traditionnel. En effet, les matériaux de construction à base de latérite dont fait partie la brique de terre comprimée (BTC) présentent des avantages à travers leur grande accessibilité et leurs propriétés hygrothermiques intéressantes pour le confort thermique de l'habitat. Dans une optique d'améliorer le confort thermique de l'habitat en climat chaud, plusieurs études ont été menées. C'est dans cette lancée que le Laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable de 2iE mène des études dans le but d'avoir des habitats bioclimatiques répondants aux normes de hautes qualité environnementales (HQE). Ce mémoire traite ainsi de l'impact de la chaleur latente d'évapo-condensation sur l'amélioration du confort thermique de l'habitat en climat chaud construit avec les BTC plus précisément à travers leurs propriétés hygrométriques.

Pour ce faire, des essais de caractérisation physiques et hygrothermiques ont été réalisées sur 4 formulations de BTC différentes. Les BTC testées ont été stabilisées à 0% de ciment, 4% de ciment, 6% de ciment et 8% de ciment. Les essais sur les briques ont données les valeurs des propriétés physiques, thermiques et hygrométriques. Concernant l'absorption capillaire, nous avons obtenus des valeurs minimales et maximales de $0,104 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0.5}$ et $0,117 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0.5}$ respectivement pour les BTC stabilisées à 4% de ciment et 0% de ciment. Les essais d'absorption totale ont révélés des teneurs en eau allant de $244,025 \text{ kg/m}^3$ à $274,86 \text{ kg/m}^3$ respectivement pour les formulations de 8% de ciment et 0% de ciment. Les essais de caractérisation thermiques ont montrés une conductivité thermique minimale de $0,658 \text{ W/m.K}$ et maximale de $1,016 \text{ W/m.K}$ respectivement pour les formulations de 0% et 8% de ciment. La résistance à la diffusion de la vapeur d'eau quand à elle donne des valeurs de 5,45 et 6,6 respectivement pour les formulations de 6% et 4% de ciment.

Les différents résultats obtenus nous ont permis de simuler deux parois de BTC différentes. La première paroi sans enduit a montré des températures de surface intérieure plus fortes allant de 36°C à $37,5^\circ\text{C}$ respectivement pour les formulations de 4% de ciment et 8% de ciment. La seconde paroi avec enduit sur ses deux faces a donné des températures surface intérieure plus faibles allant de $34,5^\circ\text{C}$ à 35°C respectivement pour les formulation de 4 et 8% de ciment.

Mots clés : BTC, chaleur latente, évapo-condensation, hygrométrie, simulation thermique.

ABSTRACT

The building materials commonly used in Africa which are concrete and cement mortar have several disadvantages on environment impact and poor thermal properties. However, traditional building materials based on laterite seem to provide adequate answers to the problems posed. Indeed, these laterite-based building materials including the compressed earth brick (CEB) have some advantages like their accessibility and their interesting hygrothermal properties. In order to improve the thermal comfort of habitat in hot climate, several researches have been conducted. It is this momentum that the 2iE Eco-materials and Sustainable Habitat Laboratory conducts studies with the aim of having bioclimatic habitats that meet HEQ standards. This thesis deals with the impact of latent heat of evapo-condensation on the improvement of thermal comfort habitat in hot climate built with CEBs more precisely through their hygrometric properties.

To do this, physical and hygrothermal characterization tests were carried out on 4 different CEBs formulations. The CEBs tested were stabilized at 0% cement, 4% cement, 6% cement and 8% cement. The tests on the bricks gave the values of the physical, thermal and hygrometric properties. Regarding capillary absorption, we obtain minimum and maximum values of 0.104 and 0.117 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0.5}$ respectively for CEBs stabilized at 4% of cement and 0% of cement. Total absorption tests revealed grades ranging from 244.025 kg/m^3 to 274.86 kg/m^3 respectively for 8% of cement and 0% of cement. Thermal characterization tests have shown minimal and thermal conductivity 0.658 W/m.K and maximum of 1.016 W/m.K respectively for formulations of 0% of cement and 8% of cement. Resistance to diffusion of water vapor test gives values of 5.45 and 6.6 respectively for 6% cement and 4% cement formulations.

The different results obtained allowed us to simulate two different CEBs walls. The first uncoated wall showed higher temperatures ranging from 36°C to 37.5°C respectively for 4% of cement and 8% cement formulations. The second wall with coating on both sides gave lower temperatures ranging from 34.5°C to 35°C respectively for the formulation of 4% and 8% cement.

Keywords : CEB, evapo-condensation, hygrometric, latent heat, thermal simulation.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

<i>Notation</i>	<i>Signification</i>
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers
BLT	Bloc Latéritique Taillé
BTC	Brique de Terre Comprimée
CAMES	Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement supérieur
CVRMSE	Coefficient of Variation of Root Mean Squared Error
HQE	Haute Qualité Environnementale
HR	Humidité Relative
LEMHaD	Laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable
NMBE	Normal Mean Bias Error
TMY	Typical Meteorological Year
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär

SOMMAIRE

Citation	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des abréviations	v
Sommaire	2
Liste des tableaux	3
liste des figures	5
Introduction générale	6
1 Synthèse bibliographique	8
1.1 Introduction	8
1.2 La briques de terre comprimée dans la construction	8
1.2.1 Définition	8
1.2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des BTC	9
1.2.3 Cycle de production des BTC	11
1.2.4 Avantages des BTC	11
1.3 Le confort thermique	12
1.3.1 Définition de la notion de confort thermique	12
1.3.2 Notion de confort hygrothermique	13
1.3.3 Critères fondamentaux de confort thermique	14
1.3.4 Méthodes d'évaluation du confort thermique	14
1.3.5 Transfert de masse dans un matériaux poreux	16
1.4 Modélisation et simulation hygrothermique des bâtiments	18
1.4.1 Différents modèles de simulation thermique dynamique	18
1.5 Conclusion	20
2 Matériels et méthodes expérimentales	21
2.1 Introduction	21
2.2 Matériaux d'expérimentation	21
2.3 Détermination des propriétés des BTC	21
2.3.1 Détermination des propriétés physiques des BTC	22
2.3.2 Détermination des propriétés thermiques des BTC	24

2.3.3	Détermination des propriétés hygrométriques des BTC	26
2.4	Hypothèses et modèle de simulation hygro-thermique du bâtiment	27
2.4.1	Le bâtiment expérimental	27
2.4.2	Modèle de simulation	28
2.4.3	Hypothèses de simulation	29
2.5	Les critères de validation du modèle	32
2.6	Conclusion	33
3	Résultats et discussions	35
3.1	Introduction	35
3.2	Propriétés physiques	35
3.2.1	Densité apparente	35
3.2.2	Porosité	36
3.2.3	Absorption capillaire	37
3.2.4	Teneur en eau à la saturation libre	37
3.3	Propriétés thermiques	38
3.3.1	Résultats	38
3.3.2	Analyses et interprétations	38
3.4	Propriétés hygrométriques	40
3.4.1	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	40
3.4.2	Isothermes de sorption	41
3.5	Résultats de la calibration du modèle	41
3.6	Résultats des simulations	42
3.7	Conclusions	48
	Conclusion générale	49
	Bibliographie	50
	Annexes	52

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Critères de validation du modèle selon ASHRAE (2002)	33
3.1	Tableau des résultats de calibration pour la température	42
3.2	Tableau des résultats de calibration pour l'humidité relative	42
3.3	Tableau récapitulatif des propriétés physiques des BTC	42
3.4	Tableau récapitulatif des propriétés thermiques des BTC	42
3.5	Tableau récapitulatif des propriétés hygrométriques des BTC	43

LISTE DES FIGURES

1.1	Exemple de construction en BTC	9
1.2	Diagramme de texture	9
1.3	Diagramme de plasticité	10
1.4	Cycle de production des BTC	12
1.5	PPD en fonction de PMV	15
1.6	Spectre du soleil [1]	17
1.7	Forme générale de la courbe de sorption d'un matériaux hygroscopique [2]	18
2.1	Principe de fonctionnement du pycnomètre	23
2.2	Dispositif expérimental de l'absorption capillaire	24
2.3	Principe de fonctionnement du DEsProTherm	25
2.4	Dispositif expérimental pour la perméabilité à la vapeur	26
2.5	Plan du bâtiment	28
2.6	Interface de WUFI [®] Plus	29
2.7	Modèle de simulation WUFI [®] Plus [3]	30
2.8	Représentation des températures et humidité relative moyennes mensuelles de l'air extérieur	31
2.9	Température et humidité relative de l'air extérieur, température et humidité relative du sol	31
2.10	Rendu géométrique du modèle sur WUFI [®] Plus	32
2.11	Plan de simulation	34
3.1	Densités apparentes des différentes formulations	35
3.2	Résultats des porosités des différentes formulations	36
3.3	Résultats de l'absorption capillaire	37
3.4	Résultats de teneurs en eau à la saturation libre	38
3.5	Résultats des conductivités thermiques	39
3.6	Résultats des chaleurs massiques	39
3.7	Résultats des coefficients de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	40
3.8	Isothermes de sorption des différentes formulations	41
3.9	Représentation graphique des différences de température de surface intérieur pour chaque formulation	43
3.10	Température et humidité relative de l'air extérieur le 12/05	44
3.11	Différence de température de l'air intérieur entre le scénario 1 et 2 des BTC stabilisés à 8% de ciment le 12/05	44
3.12	Température dans la paroi du scénario 1 à 06h	45
3.13	Température dans la paroi du scénario 2 à 06h	45
3.14	Teneur en eau dans la paroi du scénario 1 à 06h	46
3.15	Teneur en eau dans la paroi du scénario 2 à 06h	46

3.16	Température dans la paroi du scénario 1 à 15h	47
3.17	Température dans la paroi du scénario 2 à 15h	47
3.18	Teneur en eau dans la paroi du scénario 1 à 15h	48
3.19	Teneur en eau dans la paroi du scénario 2 à 15h	48

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans les pays d'Afrique ayant un climat soudano-sahélien, les températures sont caractérisées par des amplitudes thermiques élevées. Ces températures élevées, entraînent une forte consommation d'énergie électrique pour les besoins de refroidissement. L'atteinte du confort thermique à l'intérieur des habitats représente une réelle difficulté au vu des matériaux de construction utilisés couramment qui ne sont pas toujours adaptés. Aussi, ces matériaux classiques, que sont par exemples les parpaings de ciment pour la construction des murs, ne sont pas les plus accessibles à la population.

En effet, dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne, la majorité des bâtiments modernes sont des répliques des conceptions architecturales des bâtiments des pays occidentaux. Ces bâtiments consomment en moyenne 56% de la production totale d'énergie électrique produite en Afrique [4]. En plus de cette forte consommation énergétique, l'industrie du bâtiment participe aussi à 40% des émissions de CO₂ au monde [5]. Aussi, le continent africain est confrontée à plusieurs défis majeurs liés à la croissance de sa population et à son urbanisation rapide. En effet, la population africaine devrait atteindre 2,4 milliards d'habitants d'ici 2050, dont 1,34 milliards d'urbains (55%) contre 455 millions en 2009 [6]. Cette forte croissance démographique entrainera ainsi une importante demande en logements de qualité et accessibles à toutes les couches sociales.

Ainsi, pour faire face à ces défis énergétiques et environnementaux, la valorisation des éco-matériaux de construction à portée de toutes les bourses semble être une alternative au problème. En effet, la terre crue est utilisée pour la construction d'habitation depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points sur notre planète. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le ciment et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en voie de développement comme dans les pays industrialisés.

Depuis les années 90, la technologie de fabrication des éco-matériaux suscite l'intérêt des acteurs du secteur de l'immobilier à travers les briques de terre comprimée (BTC). En effet, les BTC en plus d'être accessibles à un grand nombre des populations, présentent de nombreux avantages tant sur leur résistance mécanique que sur leur capacité à améliorer le confort thermique de l'habitat en climat chaud à travers une forte inertie thermique et des propriétés hygrométriques avantageuses.

C'est dans ce contexte que nos recherches menées au Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD), consistaient en la valorisation et le développements des BTC pour une utilisation dans la construction d'habitats en climat chaud. Dans le cadre de ce projet de recherche, l'accent a été

porté sur le potentiel hygroscopique des BTC commercialisées dans la ville de Ouagadougou, plus précisément celles produites par l'entreprise Zi-matériaux.

L'objectif général de notre projet de recherche est donc de déterminer l'impact de la chaleur latente d'évapo-condensation des BTC utilisées comme parois dans l'habitat en climat chaud. Il en découle notamment comme objectifs spécifiques de déterminer les propriétés physiques, thermiques, hygrométriques des BTC, de mettre en œuvre un plan de simulation représentatif du contexte et d'établir l'impact de la chaleur latente d'évapo-condensation sur le confort thermique.

Le présent mémoire, qui restitue notre travail de fin d'étude au Laboratoire éco-matériaux et habitat durable (LEMHaD) est subdivisé en 3 chapitres :

- Le premier chapitre «revue bibliographique» présentera l'état de l'art du matériau BTC et de ses nombreux avantages sur le confort thermique ;
- Le second chapitre «matériels et méthodes d'expérimentation» exposera le protocole expérimental et la méthodologie de l'étude ;
- Le troisième chapitre «résultats et discussion» présentera les résultats et discutera de l'impact de la chaleur latente d'évapo-condensation sur le confort thermique de l'habitat en climat chaud.

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous présenterons l'état de l'art sur les trois principaux thèmes abordés dans ce mémoire, à savoir la brique de terre comprimée (BTC), la simulation dynamique du comportement hygrothermique des bâtiments et les enjeux du confort thermique dans la construction des habitats en climat chaud. L'objectif de ce chapitre est de comprendre, dans un premier temps les matériaux entrant en compte dans le processus de fabrication des BTC. Il est aussi, dans un second temps de faire l'état de l'art sur comportement thermique des bâtiments en général et plus particulièrement ceux construits à base du matériaux terre. Enfin, ce chapitre nous permettra de mieux comprendre les méthodes d'estimation du confort thermique.

Pour mener à bien notre étude, nous avons consulté un grand nombre d'articles scientifiques, de manuscrits de thèse et de documents de références sur les briques de terre comprimée (BTC), le confort thermique et la simulation thermique dynamique des bâtiments. Ces recherches nous ont permis de faire un recueil de données et d'informations importantes sur les travaux menés par d'autres équipes de chercheurs et scientifiques à travers le monde.

1.2 La briques de terre comprimée dans la construction

Depuis des temps reculés et dans toutes les régions du monde, les matériaux de construction directement disponibles ont été utilisés pour construire des maisons. Dans les climats chauds-arides et tempérés, le matériau de construction le plus répandu a été la terre. De nos jours, près d'un tiers de la population mondiale vit dans des maisons en terre et ce nombre atteint même plus de la moitié dans les pays en voie de développement [7].

1.2.1 Définition

La BTC est une évolution de la production de l'adobe utilisée traditionnellement comme matériau de construction en Afrique. Cette évolution s'inscrit dans le but d'industrialiser les techniques de production des briques, de normaliser les différentes méthodes de fabrication et d'améliorer les propriétés physiques et thermiques des briques.

La matière première rentrant dans la fabrication des BTC est la latérite additionnée au ciment ou à la chaux. L'addition de liants à la latérite permet d'améliorer les caractéristiques physiques et thermiques des briques. Les BTC ont des dimensions qui varient en fonction des moules utilisés et

des caractéristiques architecturales recherchées. Dans notre étude, les dimensions des BTC utilisées sont les suivantes : $29,5 \times 14 \times 9 \text{ cm}^3$. La figure 1.1 présente un mur construit à base de BTC.



FIGURE 1.1 – Exemple de construction en BTC

1.2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des BTC

1.2.2.1 La latérite

Pour la bonne qualité des BTC, il convient de choisir une terre répondant à certaines normes strictes notamment celles définies par le CRATerre. Concernant la granularité des latérites utilisés dans la fabrication des BTC, la norme ARS-680 [8] et celle burkinabè NBF 02-006 : 2009 portant sur le code de bonne pratique pour la préparation des mortiers de terre [9], recommandent des latérites dont la texture s'inscrit dans le fuseau du diagramme des texture présenté dans la figure 1.2.

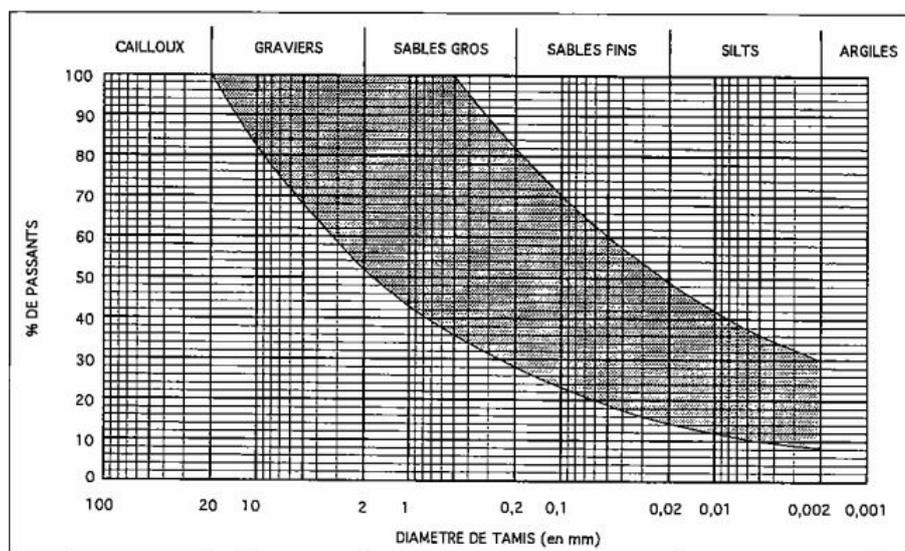


FIGURE 1.2 – Diagramme de texture

Aussi pour la plasticité des terres, elle sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité défini par les normes ARS-680 [8] et NBF 02-006 : 2009 [9], (Voir figure 1.3).

En dépit de la bonne sélection des latérites utilisées dans la fabrication des BTC, il convient de recourir à la stabilisation de la terre en vue de l'amélioration des caractéristiques mécaniques des BTC [10]. Cette stabilisation s'effectue au moyen de liants hydrauliques (chaux éteinte, ciment Portland) à plusieurs pourcentages (5%, 10%, 20%, etc...) en fonction des caractéristiques mécaniques et thermiques recherchées.

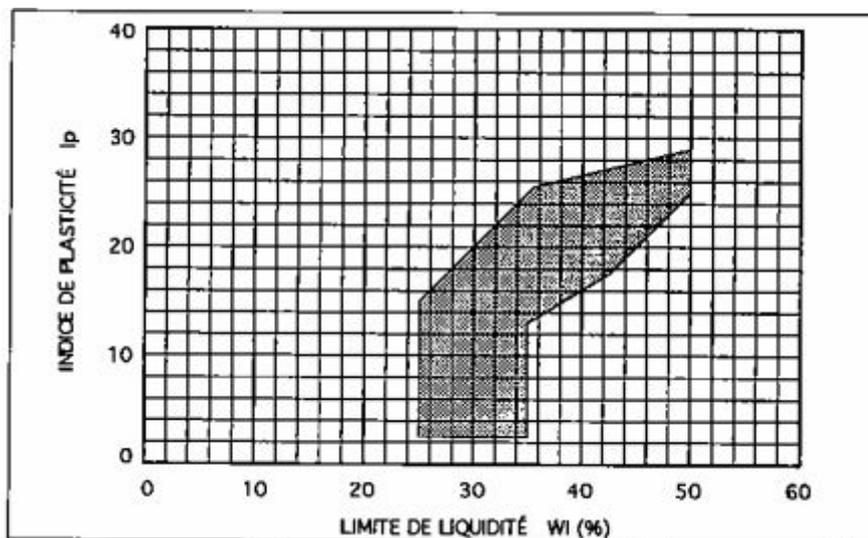


FIGURE 1.3 – Diagramme de plasticité

1.2.2.2 Stabilisation au ciment

La stabilisation au ciment nécessite des dosages qui dépendent de la texture et de la structure de la terre et du mode de mise en œuvre. selon CRATerre, il faut en général 6% de ciment de ciment pour obtenir de bons résultats [8].

Le ciment utilisé dans la fabrication de nos BTC est le ciment Portland (CPJ-CEM II-A 32,5), ce type de ciment convient bien mais toutefois des essais de convenance doivent être réalisés pour justifier leur emploi. Aussi, il n'est pas nécessaire d'utiliser des ciments à haute résistance qui n'apportent pas d'améliorations particulières aux BTC [8].

1.2.2.3 Stabilisation à la chaux

La stabilisation à la chaux peut se faire avec avec les différents types de chaux existantes à savoir : les chaux aériennes (chaux éteinte (CaO), chaux vive (Ca(OH)_2), les chaux hydrauliques, les chaux agricoles et les chaux dolomitiques [8].

En général, pour une stabilisation à la chaux vive, 2 à 3% de chaux vive ajoutée entraîne la diminution de la plasticité de la terre; cette réaction exothermique d'hydratation s'appelle point de fixation de la chaux. Il convient aussi de noter que pour des stabilisations ordinaires à la chaux éteinte, des dosages de 4 à 12% sont suffisants pour une bonne qualité des BTC [8].

1.2.3 Cycle de production des BTC

Les BTC sont produites selon le cycle produit dans la figure 1.4. Cette production commence par l'extraction et le transport de la terre d'une carrière avec des outils (pioches, pelles, brouettes), suivi du stockage et du séchage dans endroit sec. L'étape qui suit les précédentes est celle du tamisage afin d'avoir une texture entrant dans le fuseau du diagramme de texture (Voir figure 1.2), ensuite vient le malaxage des terres afin d'obtenir un matériaux homogène (dans le cas des BTC stabilisés); suite au malaxage, le matériaux est compressé dans une presse afin d'obtenir un matériaux bien calibré; enfin vient la cure des BTC qui consiste au stockage et séchage des BTC pour une période de 45 jours.

1.2.4 Avantages des BTC

La BTC présentent plusieurs avantages. Ces avantages se ressentent entre autre sur le plan économique, écologique et sur le confort thermique dans le bâtiment [8].

Les avantages sur le plan économique sont d'abord, la réduction de la fuite des devises par une réduction des importations des matériaux de construction (ciment, acier, bois, etc...). Aussi, la production manuelle à haute intensité de main d'œuvre des BTC favorisent la création d'emplois et a donc un impact positif sur l'économie locale.

Sur le plan écologique, nous avons comme avantages, la réduction d'émission de CO₂, dont 5% de l'émission mondiale provient de la production de ciment, et la réduction importante de l'énergie consommée pour le transport des matériaux de construction.

Concernant la disponibilité des matériaux de construction, la BTC présente plusieurs avantages. Dans un premier temps, la disponibilité de la terre en quantité quasiment illimitée dans toutes les régions avantage la production des briques. Deuxièmement, la production des BTC est possible à la fois à l'échelle artisanale et à l'échelle industrielle. Enfin, la production des BTC peut se faire directement sur le chantier réduisant ainsi les couts de transports supplémentaires souvent onéreux.

En plus de ces avantages, la BTC présente plusieurs autres avantages importants dans l'atteinte du confort thermique des bâtiments construites en zones chaudes. En effet ces avantages se traduisent par une grande inertie thermique et une bonne capacité d'autorégulation du taux d'humidité relative des bâtiments.

De nos jours, la stabilisation des briques de terre comprimée par addition de liants chimiques est une approche couramment utilisée. Cet ajout de liants a pour objectif principal de maintenir et d'améliorer l'utilisation des BTC dans la construction des bâtiments. Bien que l'ajout de ciment améliore les propriétés techniques du sol, il n'en va pas de même pour ses propriétés hygrothermiques. En effet, selon Saidi et al., la conductivité thermique des BTC augmente en fonction du contenu des stabilisants. Aussi, la stabilisation induit une réduction de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau en diminuant sa porosité [11].

Aussi, Les BTC présentes des conductivité thermique relativement élevée d'environ 1,1 W/m.K en moyenne. C'est en ce sens que Mansour et al. ont menées des recherches dans le but d'améliorer les propriétés thermiques des BTC. Ils ont prouvées dans leurs études qu'en faisant varier la densité des briques dans l'optique de modifier leurs porosités, les conductivités thermiques de celles-ci aussi variaient. En effet lorsqu'on diminue la densité des BTC, la porosité augmente. Ce qui a comme conséquence la diminution de la conductivité thermique [10].

En plus de l'amélioration de la conductivité thermique des BTC, des études ont aussi menées par Bastien, Winther-Gaasing et Karagiosis et al. Ces études avaient pour but de comprendre le comportement des matériaux de construction avec des propriétés hygroscopiques élevées. Elles ont montré que les matériaux avec des propriétés hygroscopiques élevées peuvent entraîner une diminution de l'ordre de 2 à 9% la chaleur à l'intérieur des bâtiments. Cette diminution est due en partie aux effets de la chaleur latente. Cela a donc pour conséquence de favoriser l'amélioration du confort thermique dans l'habitat [12],[13]. Aussi, Hema et al. ont montré que les murs construits à base de BTC sont beaucoup plus perméables aux transferts de masse (transfert d'humidité) que ceux construits avec des parpaings de ciment. Ce constat est dû à leurs résistances à la vapeur d'eau respectives (plus faible pour la BTC) et aussi à leurs isothermes de sorption [14]. Allinson et Hall ont aussi montrés que les bâtiments construits à base de latérite réduisent significativement les amplitudes des fluctuations de l'humidité relative [15]. Cette réduction de l'humidité relative entraine une diminution de la température à l'intérieur des bâtiments.

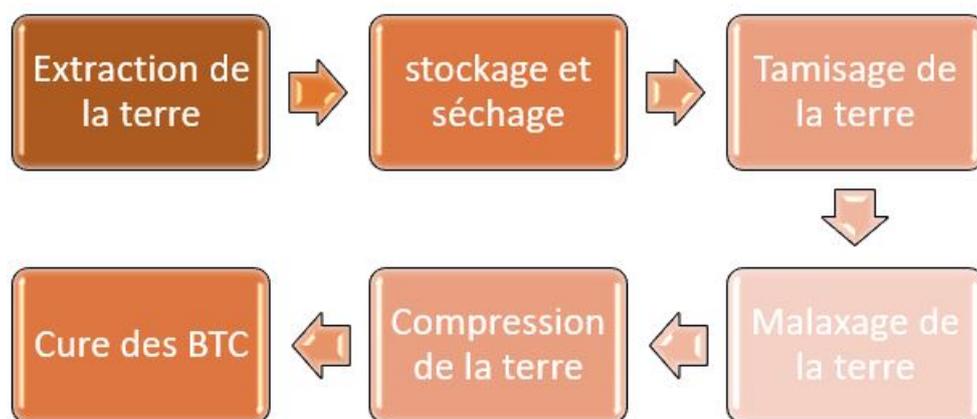


FIGURE 1.4 – Cycle de production des BTC

1.3 Le confort thermique

1.3.1 Définition de la notion de confort thermique

La notion de confort thermique trouve tout son sens dans l'activité humaine. En effet, l'activité métabolique assurant les fonctions vitales de l'organisme n'est possible que dans une certaine plage de température. Il existe cependant des conditions d'ambiance optimales qui seront ressenties par l'individu comme celle d'un état de confort thermique.

Sur un plan physique, le confort thermique représente l'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance (température et humidité relative). Il dépend de la sensibilité, de l'habillement, du métabolisme et de l'activité physique de chaque individu d'une part, mais aussi de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air, et de l'humidité d'autre part. Au-delà d'un certain niveau de déséquilibre, l'individu va ressentir de l'inconfort, notamment parce qu'il va devoir réagir pour réduire ce déséquilibre.

Tout être vivant dégage de la chaleur, cependant certains sont capables de réguler leur température corporelle par des moyens physiologiques, les homéothermes (cas de l'être humain) et d'autres non (les hétérothermes ou poïkilothermes) [16]. L'être humain dispose donc d'une meilleure capacité d'adaptation.

Le corps d'un individu va chercher à rétablir l'équilibre par différentes réactions demandant un certain effort : des réactions comportementales et des réactions physiologiques. Ces réactions se traduisent par la thermorégulation comportementale et la thermorégulation physiologique.

- La thermorégulation comportementale comprend le changement de posture, d'activité, de vêtement, etc...
- La thermorégulation physiologique, accessible uniquement aux êtres homéothermes (êtres humains), comprend notamment les frissons, la transpiration, vasodilatation, vasoconstriction, etc...

L'adaptation du comportement de chaque individus aux conditions d'ambiance tend donc à réduire l'inconfort, ce qui est aujourd'hui décrit par l'approche du « confort adaptatif ». Le confort thermique est souvent associé au confort hydrique (équilibre hydrique) sous le terme de confort hygrothermique ¹.

1.3.2 Notion de confort hygrothermique

L'hygrothermie se définit par la mesure de la température et du taux d'humidité de l'air ambiant d'un local. C'est une mesure fréquente dans le domaine du bâtiment où l'on recherche un confort hygrothermique idéal pour la santé des habitants et des infrastructures [12].

Le confort hygrothermique correspond à « un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique ». Selon la démarche HQE, il représente la notion de « ni chaud, ni froid, ni humide, ni sec » [17]. Ceci doit permettre d'éviter le dessèchement des muqueuses ou la sensation d'étouffement par excès d'humidité, la condensation sur les murs et donc les effets de moisissure, la dégradation de certains types d'enveloppe des bâtiments.

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/Confort_thermique

1.3.3 Critères fondamentaux de confort thermique

1.3.3.1 différentes Sources d'inconfort dans le bâtiment et gains thermiques du bâtiment

Dans un environnement intérieur (intérieur d'une maison par exemple), on peut identifier plusieurs sources d'inconfort thermique : la température des parois, la température de l'air ambiant, le courant d'air et l'humidité relative de l'air ambiant. À cela doit s'ajouter la prise en compte de paramètres personnels liés à l'occupant (activité métabolique, tenue et habits, culture, etc...).

D'un point de vue physique le bâtiment est une masse et un volume. La masse (parois opaques et transparentes²) se définit par l'interaction entre les conditions d'ambiance intérieure (humidité relative et température) et les variations des sollicitations climatiques. La forme, l'orientation, l'aménagement intérieur du bâtiment caractérisent les échanges et transferts d'énergie entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Les transferts d'énergie sont essentiellement des transferts de masse et de chaleur. Les principaux modes de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement. Les transferts de masse concernent la chaleur latente mettant en jeu le changement de phase [1].

Dans un bâtiment, Les échanges thermiques par conduction interviennent au niveau des parois opaques et transparentes. Les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, densité apparente et capacité calorifique) interviennent dans ce mode d'échange thermique.

Les échanges par rayonnement proviennent du flux solaire incident sur les parois du bâtiment qui, à son tour, réfléchit, absorbe et transmet, suivant les caractéristiques de surface des parois (réflectivité, absorptivité, transmittivité) (figure 1.6). Le flux solaire réfléchi dépend du facteur de réflexion solaire de la surface ou du matériau de la paroi, son albédo (ou réflectivité). Il est essentiellement lié à la couleur ; le noir ne réfléchit rien, le blanc réfléchit tout [1]. À cela s'ajoute les échanges dus à la convection. Dans le cas d'un matériau poreux (c'est le cas de la plupart des matériaux de construction comme les BTC, le bois, les isolants minéraux, le plâtre ou le béton), la convection au sein des pores, ainsi que le rayonnement entraînent le phénomène de chaleur latente d'évapo-condensation [2].

1.3.4 Méthodes d'évaluation du confort thermique

1.3.4.1 L'approche analytique

L'approche analytique traite le confort thermique à travers le calcul du bilan thermique du corps humain. Les travaux de recherche menés par Stolwijk, Hardy [16] et Gagge [18] aux États unis et de Fanger et al. [19] au Danemark permettent de déterminer les principaux paramètres à prendre en compte dans l'analyse du confort thermique. Les paramètres qui influencent le confort sont essentiellement la vitesse et l'hygrométrie de l'air, la température sèche et la température moyenne radiante [1].

La méthode de Fanger consiste en l'analyse des échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement. Puis en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée (bilan thermique) par le corps humain vêtu, supposé être aux valeurs de confort du débit sudoral et de température cuta-

2. Murs et fenêtres

née. L'indice "PMV" ³ établi, prédit la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique à 7 points de l'ASHRAE suivante :

- +3 très chaud ;
- +2 chaud ;
- +1 légèrement chaud ;
- 0 ni chaud, ni froid ;
- -1 légèrement froid ;
- -1 froid ;
- -3 très froid.

Pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique, il a lié le PMV à un autre indice, le " PPD" ⁴, qui prévoit quantitativement le pourcentage de personnes insatisfaites, car trouvant l'ambiance thermique trop chaude ou trop froide. La relation prévoit un minimum de pourcentage des insatisfaits de 5% pour un vote égal à zéro (sensation neutre), puis ce pourcentage augmente de façon symétrique de part et d'autre du vote zéro vers les sensations chaude et froide.

$$PMV = [0,303 \cdot e^{(-0,036 \cdot M)} + 0,028] \times L \quad (1.1)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)]} \quad (1.2)$$

Avec :

- L = l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue ;
- PMV = vote moyen prévisible sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE ;
- PPD = pourcentage prévu des insatisfaits.

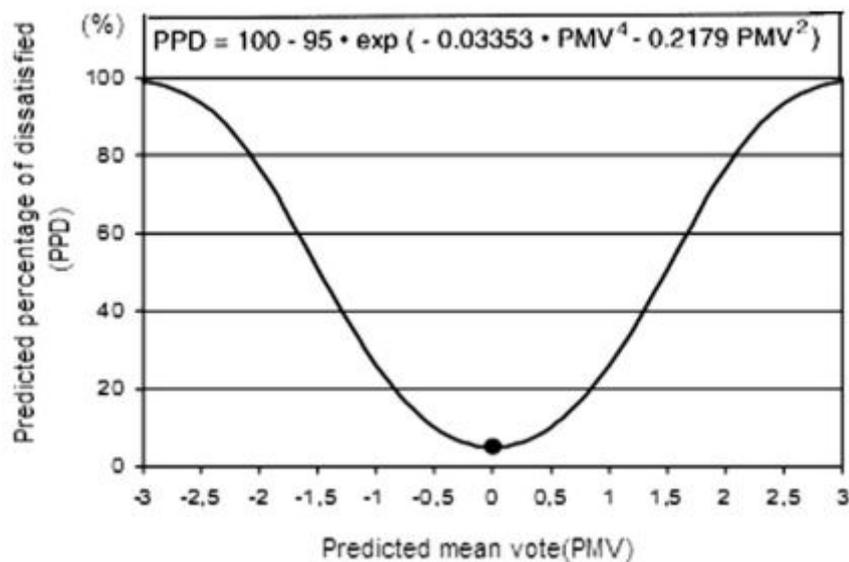


FIGURE 1.5 – PPD en fonction de PMV

3. Predicted Mean Vote

4. Predicted Percentage of Dissatisfied

1.3.4.2 L'approche adaptative

L'approche adaptative du confort thermique a été développée dans le but de guider les bâtiments sans ventilation centralisé c'est à dire à évolution libre. Cette approche s'appuie sur l'approche analytique mais se caractérise par un ensemble d'études (sondage) de terrain, et utilise les données récoltées pour définir les conditions de confort en fonction des données météorologiques.

Ce modèle est basé sur un ensemble d'études qui montre que l'être humain peut s'adapter à l'environnement grâce à ses actions. Ces études ont révélés que les occupants des bâtiments sans climatisation centralisée sont plus tolérants aux variations de températures, voire préfèrent des gammes de températures plus larges que les occupants des bâtiments avec climatisation centralisée. Ces gammes de températures sont corrélées positivement à la température extérieure : lorsque la température extérieure augmente, la température intérieure augmente également et inversement en cas de baisse. Ces variations mettent à profit des ajustements comportementaux et physiologiques, typiques des processus adaptatifs humains⁵.

La méthode de calcul de la température de confort T_c dans les bâtiments soumis à une ventilation naturelle en fonction de la moyenne mensuelle de la température extérieure T_0 a été développée dans le standard l'ASHRAE55 [1].

$$T_c = 0,31 \cdot T_0 + 17,8 \quad (1.3)$$

Avec :

- T_c : la température de confort ;
- T_0 : la moyenne de la température extérieure.

Cette température de confort est la température opérative dans le bâtiment qui prend en compte le rayonnement des parois ainsi que la vitesse de l'air. Le standard ASHRAE55 définit une bande de $\pm 2,5^\circ\text{C}$ de largeur autour la température de confort pour 90% d'acceptabilité, et de $\pm 3,5^\circ\text{C}$ de largeur pour 80% d'acceptabilité.

1.3.5 Transfert de masse dans un matériaux poreux

La plupart des matériaux de construction sont hygroscopiques, ce qui signifie qu'ils absorbent la vapeur d'eau de l'environnement jusqu'à ce que les conditions d'équilibre soient atteintes. Le transfert d'humidité dans les matériaux poreux est en grande partie dû à la diffusion de vapeur, à la surface et à l'absorption capillaire. Pour un mur en maçonnerie donné, lorsque la pression de vapeur à l'intérieur est supérieure à celle à l'extérieur et vice versa, la vapeur est entraînée du côté de la pression élevée vers celui de la pression faible. Cela se traduit par le gradient de pression de vapeur d'eau.

Cette capacité de stockage est décrite par la courbe de sorption du matériau (taux massique d'humidité w en fonction de l'humidité relative ϕ). Pour un matériau hygroscopique, sa forme gé-

5. https://fr.wikipedia.org/wiki/Confort_thermique_adaptatif

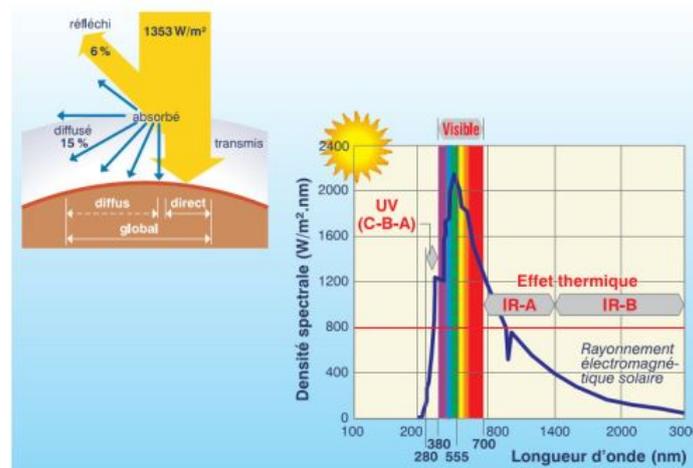


FIGURE 1.6 – Spectre du soleil [1]

nérale est donnée par la figure 1.7. La courbe ou isotherme de sorption décrit les états d'équilibre successifs du matériau avec le milieu ambiant, dans des conditions de température uniformes.

Trois domaines peuvent être distingués. Ils traduisent le comportement du matériau à l'échelle microscopique :

- **Région hygroscopique** : lorsque le matériau est exposé à de faibles humidités relatives (jusqu'à environ 40%), l'eau est adsorbée sur les parois des pores, en couches mono puis multimoléculaires. La condensation capillaire apparaît lorsque tout l'espace d'un pore est rempli par de l'eau. Elle apparaît donc dans les plus petits pores en premier. Dans cette région (jusqu'à 95-98% HR), l'eau est transportée essentiellement sous forme de vapeur ;
- **Région super-hygroscopique** : au-delà, c'est l'eau liquide qui occupe la majorité de l'espace, laissant des poches dans lesquelles la vapeur circule. Le matériau peut alors absorber de l'eau jusqu'à atteindre la saturation capillaire ;
- **Région saturée ou super-saturée** : si le matériau reste en contact longtemps avec de l'eau liquide, ou bien si la pression sur ses faces est artificiellement augmentée, les petites poches d'air résiduelles sont dissoutes, jusqu'à atteindre la saturation maximale. Le transfert d'air n'est plus possible au travers de ce matériau.

Le comportement diffère entre les processus de sorption et de désorption ; l'hystérésis⁶ du matériau a donc un effet sur le taux réel d'humidité du matériau, celui-ci se trouvant toujours entre les deux courbes. L'hystérésis est toutefois fréquemment négligée, et c'est l'isotherme de sorption qui est utilisée. La forme de la courbe, et donc la capacité à emmagasiner de l'humidité, dépend fortement de la dimension moyenne des pores, ainsi que de la répartition de leur diamètre (porosimétrie).

6. différence entre la courbe de sorption et de désorption

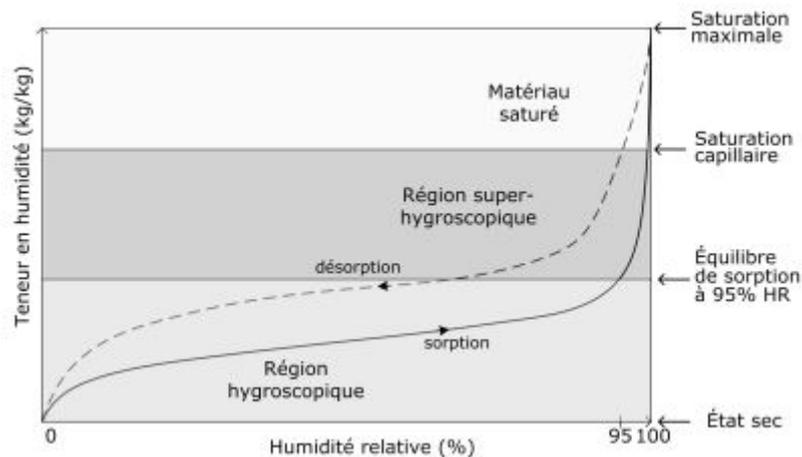


FIGURE 1.7 – Forme générale de la courbe de sorption d'un matériaux hygroscopique [2]

1.4 Modélisation et simulation hygrothermique des bâtiments

La volonté de construire des bâtiments répondant aux normes de confort thermique et énergétiquement performants est de nos jours courante. Afin de satisfaire cette volonté, les outils de simulation du comportement hygrothermique des bâtiments sont nécessaires dans la conception et le choix des matériaux de construction. En effet, la simulation imite des conditions physiques réelles à travers la modélisation mathématiques des phénomènes naturels. cette modélisation se base sur des équations mathématiques, des principes physiques naturels et des hypothèses de simulation. La simulation hygrothermique dynamique des bâtiments se base sur les équilibres de transferts de chaleur et de masse couplés dans les parois. Cependant, il n'y a pas encore de consensus clair concernant l'impact de ces phénomènes sur la performance énergétique globale des bâtiments [20]. C'est dans ce sens que Soudani et al. ont menés des études sur l'évaluation de la validité de certaines hypothèses communes dans la modélisation hygrothermique de matériaux à base de terre. Il en résulte qu'en raison des particularités du matériau (très faible teneur en eau, forte porosité, variation importante de la teneur en eau pendant sa durée de vie, etc...), il est nécessaire de prendre en compte l'impact du gradient thermique sur la variation de la masse d'eau dans les pores en raison de la condensation et de l'évaporation.

1.4.1 Différents modèles de simulation thermique dynamique

La complexité des problèmes rencontrés en physique du bâtiment (géométrie, exposition climatique, inconnues multiples, etc) rend généralement impossible la résolution analytique des équations, de surcroît non linéaires. Aussi, des modèles ont été développés, se fondant sur des hypothèses permettant de réduire la complexité des systèmes. Des méthodes numériques, basées sur une discrétisation spatiale et temporelle, sont utilisées pour résoudre ces équations [2].

Des modèles de comportement hygrothermique ont été développés à différentes échelles : transferts au sein d'un matériau (à 1, 2 ou 3 dimensions) ou à l'échelle du bâtiment entier. Parmi les modèles existants, citons entre autre WUFI® Plus [3], Trnsys, EnergyPlus et HAM-tools.

1.4.1.1 WUFI® Plus (Wärme Und Feuchte Instationär)

WUFI® Plus est un logiciel de simulation hygrothermique qui permet de calculer de manière réaliste le transport transitoire unidimensionnel de chaleur et d'humidité dans les murs et autres composants de bâtiment multi-couches exposés aux conditions météorologiques. WUFI® est l'acronyme de Wärme Und Feuchte Instationär, ce qui signifie Chaleur et Humidité Transitoires. Le logiciel WUFI® utilise les dernières découvertes concernant la diffusion de vapeur et le transport d'humidité dans les matériaux de construction.⁷

1.4.1.2 EnergyPlus

EnergyPlus est un programme de simulation énergétique des bâtiments permettant de modéliser les flux de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de ventilation et autres. Il inclut de nombreuses fonctionnalités de simulation innovantes telles que des pas de temps inférieurs à une heure, des systèmes et installations modulaires intégrés à une simulation de zone basée sur le bilan thermique, un flux d'air multizone.

Le programme de simulation permet aux concepteurs de calculer les impacts de différents systèmes de chauffage, de climatisation et de ventilation, ainsi que ceux de divers types de systèmes d'éclairage et de fenêtres. EnergyPlus est le fruit d'une collaboration entre le groupe de recherche sur la simulation de Berkeley Lab, dirigé par Fred Winkelmann de la division Environmental Energy Technologies, l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign et le laboratoire de recherche en génie de la construction de l'armée américaine, avec l'aide d'autres organisations de recherche⁸.

1.4.1.3 Trnsys (Transient System Simulation Tool)

Trnsys est un modèle de simulation thermique dynamique proposé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Il permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment et de son équipement (systèmes de chauffage, climatisation) pour mener une étude mono ou multi-zone détaillée de son comportement thermique. Trnsys intègre les variables d'emplacement, de matériaux de construction, d'architecture globale, de concept énergétique choisi, y compris les plus complexes tels que les systèmes solaires innovants. Modulaire et évolutif, la base de données des composants de Trnsys peut être enrichie de nouveaux composants, systèmes et concepts énergétiques par son utilisateur⁹.

1.4.1.4 HAM-tools (Heat, Air and Moisture Toolbox)

HAM-tools (Heat, Air and Moisture Toolbox) consiste en une bibliothèque de composants développés dans l'environnement de simulation Matlab-Simulink. Le bâtiment est décrit comme un assemblage de différents composants (parois, zones, systèmes, etc), chacun étant composé de modules plus élémentaires : une paroi se décompose en plusieurs couches d'un matériau unique ; chaque couche comporte plusieurs nœuds. La bibliothèque de HAM-tools permet d'utiliser aussi bien ces

7. <https://wufi.de/en/>

8. <https://energyplus.net/>

9. <https://www.actu-environnement.com/materiels-services/produit/>

modules élémentaires que les composants plus complexes. Plusieurs zones peuvent être définies. Les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité (vapeur et liquide) sont déterminés, en conditions dynamiques, et en prenant en compte des propriétés de matériaux dépendant des conditions de température et/ou d'humidité [2].

1.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif, à partir de la littérature disponible, de passer en revue les connaissances actuelles dans l'amélioration du confort thermique avec la BTC. L'aspect clé de notre étude étant de montrer l'influence du comportement hygroscopique des BTC dans l'amélioration du confort thermique, nous avons fait une revue de la littérature sur la fabrication de celles-ci dans un premier temps. Dans un second temps, nous avons fait l'état de l'art sur le confort thermique et les différentes sources d'inconfort thermique. Enfin, nous avons montré l'intérêt de la simulation hygrothermique dynamique dans la conception des bâtiments et certains outils couramment utilisés. Dans notre étude, nous avons utilisé l'outil de simulation WUFI[®] Plus en raison de sa forte renommée dans diverses publications scientifiques. Ces publications traitant en majorité de la simulation du comportement hygrothermique des bâtiments construits à base du matériau terre. Aussi, le choix de l'outil WUFI[®] Plus s'est fait parce qu'il dispose des dernières avancées dans la modélisation et la simulation des transferts couplés de masse et de chaleur.

Dans la suite de ce mémoire, nous nous efforcerons à confirmer ou à infirmer les différents résultats obtenus dans la littérature à travers la simulation hygrothermique d'un bâtiment existant. Pour ce faire, il conviendra d'établir des hypothèses de simulation à travers différents essais sur les BTC. Les résultats issus de ces essais nous permettront de simuler correctement le comportement hygrothermique d'un bâtiment construit à base de BTC dans un climat chaud et aride.

MATÉRIELS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents dispositifs expérimentaux et les différentes méthodes utilisées pour atteindre notre objectif principal. Notre objectif étant de montrer l'impact de la chaleur latente d'évapo-condensation des BTC sur le confort thermique, nous simulerons le comportement hygrothermique d'un bâtiment de type F2 avec le modèle WUFI[®] Plus [3]. Afin de simuler le comportement hygrothermique des parois BTC, il convient de déterminer les hypothèses d'entrées nécessaires au modèle WUFI[®] Plus [3]. Dans un premier temps, nous déterminerons les caractéristiques (physiques, thermiques et hygrométriques) des BTC utilisées comme parois du bâtiment. Ensuite, nous passerons à la calibration du modèle du bâtiment avec des données d'expérimentation obtenues sur le bâtiment construit. Enfin, nous simulerons le comportement hygrothermique du bâtiment avec des données météo de la ville de Ouagadougou.

2.2 Matériaux d'expérimentation

Les BTC utilisées proviennent du plus grand producteur au Burkina Faso à savoir l'entreprise ZI-Matériaux. Pour ce faire, nous avons utilisé des BTC stabilisées au ciment. 4 différents pourcentages ont fait l'objet de notre analyse, à savoir : 0% de ciment et 100% de latérite, 4% de ciment et 96% de latérite, 6% de ciment et 94% de latérite et enfin 8% de ciment et 92% de latérite. Pour la fabrication de ces briques, deux carrières différentes ont été utilisées. La première carrière est celle de Loumbila (Ouagadougou) avec pour coordonnées géographiques : 12°30'59.97" Nord ; 1°23'00.00" Ouest, et la deuxième étant celle de Bobo-dioulasso avec pour coordonnées 11°09'53.73" Nord ; 4°18'18.45" Ouest. La carrière de Loumbila a servi dans la fabrication des BTC stabilisés à 0% de ciment et 8% de ciment. Tandis que celle de Bobo-dioulasso a servi dans la fabrication des BTC stabilisées à 4% de ciment et 6% de ciment. Les mesures des différentes propriétés de nos briques ont été effectuées au LEMHaD.

2.3 Détermination des propriétés des BTC

Les différentes propriétés mesurées lors des différents essais concernent les propriétés physiques, thermiques et hygrométriques. Les propriétés physiques nécessaires pour la simulation sont : la densité apparente notée ρ , la porosité totale notée n , le coefficients d'absorption capillaire noté A

et la teneur en eau à la saturation libre notée W_f . Quant aux propriétés thermiques elles sont caractérisées par la conductivité thermique notée λ et la capacité calorifique massique des échantillons notée C_p . Les propriétés hygrométriques mesurées sont : la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau notée μ et la courbe de sorption.

2.3.1 Détermination des propriétés physiques des BTC

2.3.1.1 Détermination des densités apparentes des BTC (ρ)

La masse volumique d'un corps est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume, ce paramètre physique des échantillons a été déterminé selon la norme française NF P18-459 [21]. La détermination de la densité apparente (ρ) des différents échantillons a été effectuée par pesée hydrostatique sur la base du principe de la poussée d'Archimède. Le principe de la méthode consiste à saturer le réseau poreux du matériau avec un liquide ayant une densité connue (l'eau a été utilisée dans notre cas). En effet, par plusieurs pesées hydrostatiques, on peut déterminer le volume (V) de chaque échantillon. La masse sèche (m) de l'échantillon étant connue, on peut aisément déterminer la masse volumique (ρ) (voir équation 2.1).

$$\rho = \frac{M_{sec} \cdot \rho_{eau}}{M_{sat(air)} - M_{sat(eau)}} \quad (2.1)$$

Avec :

- ρ = densité apparente de l'échantillon (kg/m^3);
- ρ_{eau} = densité de l'eau ($1000 kg/m^3$)
- M_{sec} = masse sèche de l'échantillon (kg);
- $M_{sat(eau)}$ = masse de l'échantillon saturé dans l'eau (kg);
- $M_{sat(air)}$ = masse de l'échantillon saturé dans l'air (kg);

2.3.1.2 Détermination des porosités des BTC (n)

La porosité est une grandeur physique qui caractérise l'ensemble des interstices (connectés ou non) d'un corps. Il s'agit donc du rapport du volume des vides du matériau divisé par le volume total. La mesure de la porosité (n) des BTC s'est faite grâce au pycnomètre à air. La détermination de la porosité réside dans la mesure du volume de l'échantillon. Le pycnomètre à air est muni de deux chambres de volumes connus. Pour déterminer la masse volumique réelle d'un échantillon, il suffit d'injecter de l'air à une pression donnée (2,3 bar) dans l'enceinte de mesure contenant une quantité suffisante et connue d'échantillon broyé. Il faut ensuite détendre ce gaz dans une enceinte de référence et mesurer la nouvelle pression du gaz [22]. Connaissant ces deux pressions et les volumes des enceintes, il est possible de trouver le volume de l'échantillon par la loi de Boyle-Mariotte (voir équation 2.2).

$$V_s = \frac{P' - P}{P' - P_a} \times V \quad (2.2)$$

$$n = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_s}\right) \times 100 \quad (2.3)$$

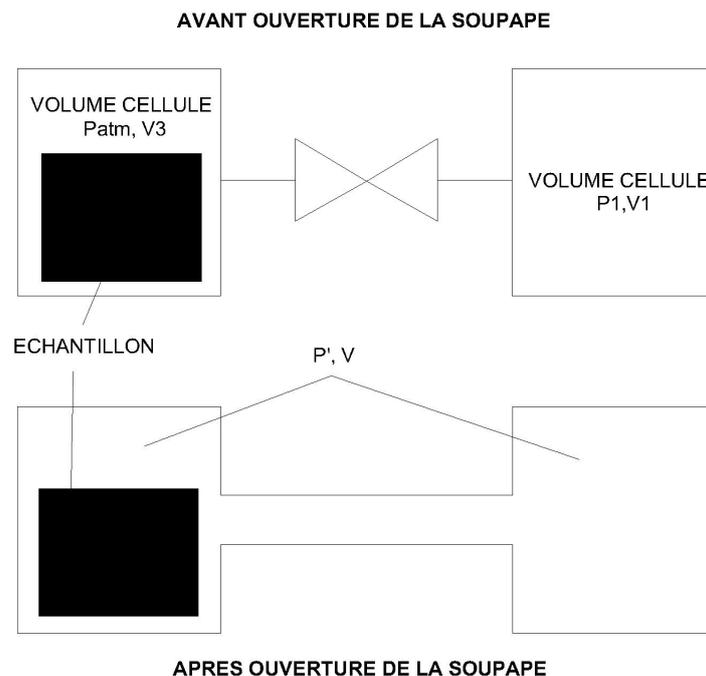


FIGURE 2.1 – Principe de fonctionnement du pycnomètre

Avec :

- n = porosité de l'échantillon (%)
- V_s = volume de l'échantillon (m^3);
- V = volume totale de la cuve (m^3);
- P' = pression lue sur le manomètre (Pa);
- P = pression de l'air injecté (Pa);
- P_a = pression atmosphérique ($101325 Pa$);
- γ = poids volumique apparent de l'échantillon (kg/m^3)
- γ_s = poids volumique des grains solides (kg/m^3)

2.3.1.3 Détermination des coefficients d'absorption capillaire des BTC (A)

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux à cause des tensions superficielles et interraciales. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau (celle de l'eau qui est absorbée). L'absorption capillaire des échantillons est déterminée par mesure de l'augmentation de masse de celui-ci plongé dans l'eau. Les échantillons préalablement séchés jusqu'à masse constante à $40^\circ C$ sont plongés dans un récipient contenant de l'eau à une hauteur constante de 5mm. On effectue des pesées successives sur une balance à plusieurs intervalles de temps (30s, 1min, 2min, 4min, 6min, 8min, 10min, 15min, 20min, 30min, 1h et 2h). Cette variation de la masse de l'échantillon en fonction du temps nous permet de modéliser le phénomène d'absorption capillaire à travers la relation linéaire (2.4).

$$m(t) = A\sqrt{t} \quad (2.4)$$

Avec :

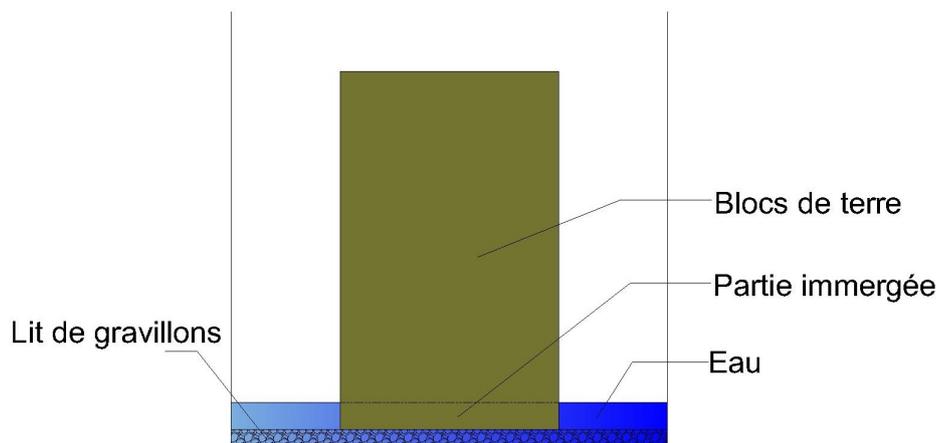


FIGURE 2.2 – Dispositif expérimental de l'absorption capillaire

- m = masse de l'échantillon (kg);
- A = coefficient d'absorption capillaire ($kg/m^2.s^{-0,5}$);
- t = temps (s).

2.3.1.4 Détermination des teneurs en eau à la saturation libre des BTC (W_f)

L'absorption capillaire permet de mettre en évidence le coefficient d'absorption mais n'indique pas la quantité d'eau que le matériau peut stocker. Pour la connaître, il faut déterminer la teneur en eau à la saturation libre notée W_f qui est le résultat des mouvements capillaires dans les pores qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion totale d'un échantillon dans de l'eau jusqu'à masse constante. L'absorption totale peut être exprimée en pourcentage de la masse initiale de l'éprouvette ou exprimée en masse d'eau contenue dans $1 m^3$ d'échantillon. La valeur est utilisée pour estimer la teneur en eau du matériau à 100% d'humidité relative. La déduction de l'absorption se traduit par l'équation (2.5).

$$W_f = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (2.5)$$

Avec :

- W_f = teneur en eau (%);
- M_1 = masse sèche de l'échantillon (kg);
- M_2 = masse de l'échantillon saturé (kg);

2.3.2 Détermination des propriétés thermiques des BTC

La Conductivité thermique et la chaleur massique des BTC sont les principales propriétés thermiques nécessaires à notre modèle de simulation. Par définition, la conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur par conduction. La conductivité thermique et la capacité calorifique massique des BTC sont déterminés grâce à la méthode du plan chaud déployée dans le dispositif d'estimation des propriétés thermiques (DEsProTherm).

Le principe utilisé pour la mesure des propriétés thermiques est la méthode du plan chaud. Cette

méthode consiste à imposer un flux thermique (grâce à une résistance électrique par effet joule) sur une face d'un échantillon parallélépipédique isolé ($6 \times 4 \text{ cm}^2$), de relever les températures en face arrière (face opposée à la résistance chauffante) et en face avant (côté de la résistance chauffante) et ensuite de traiter les thermogrammes pour déterminer la propriété thermique souhaitée.

Afin de déterminer la conductivité thermique des BTC, il convient de déterminer l'effusivité thermique dans un premier temps sur un échantillon de dimensions régulières ($6 \times 4 \times 3 \text{ cm}^3$). Cette épaisseur de 3 cm est requise afin de recouvrir complètement la cellule de mesure et d'éviter que le flux de chaleur ne traverse pas l'échantillon soumis à l'essai, condition nécessaire à la réalisation de l'essai [21].

Suite à cela, on détermine aussi la valeur de la capacité calorifique volumique de l'échantillon sur une matrice de dimensions ($6 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$). En effet, la capacité calorifique volumique d'un matériau correspond à la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une unité de volume de celui-ci pour élever sa température de 1°C . La méthode du plan chaud asymétrique utilisée dans le dispositif DEs-ProTherm permet l'estimation de cette capacité thermique sur un échantillon d'épaisseur 1 cm afin que le flux de chaleur traverse l'épaisseur du matériau.

LOCAL DE MESURE

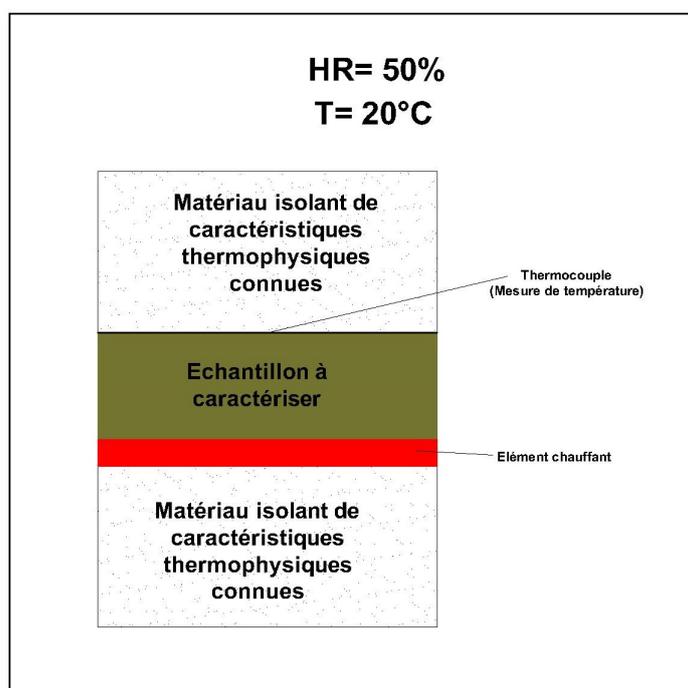


FIGURE 2.3 – Principe de fonctionnement du DEsProTherm

Ainsi, la conductivité thermique est calculée grâce à l'équation (2.6).

$$\lambda = \frac{E^2}{\rho \times C_p} \quad (2.6)$$

Avec :

— λ = conductivité thermique de l'échantillon (W/m/K);

- C_p = Chaleur spécifique de l'échantillon (J/kg.K)
- E = éffusivité thermique de l'échantillon ($J/K.m^{-2}.s^{-0,5}$);
- ρ = masse volumique de l'échantillon (kg/m^3).

2.3.3 Détermination des propriétés hygrométriques des BTC

2.3.3.1 Détermination des coefficients de résistance à la diffusion de vapeur d'eau des BTC (μ)

L'essai de perméabilité à la vapeur a pour objectif principal de déterminer la quantité de vapeur d'eau traversant par unité de surface une épaisseur donnée d'un échantillon en un intervalle de temps déterminé dans des conditions opératoires précises.

Cette propriété est caractérisée par le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ) qui indique dans quelle mesure la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau que l'air.

La résistance à la vapeur d'eau a été déterminée par la méthode des solutions salines. Afin d'avoir une humidité relative constante de l'air au dessus des solutions salines, nous avons saturé en sel de cuisine trois bocaux remplis d'eau. L'humidité relative des solutions salines saturées en sel a été mesurée avec des capteurs hygrothermiques, nous donnant ainsi comme valeur d'humidité relative 73,5%.

L'essai a été réalisé sur trois échantillons de BTC (de dimensions $8 \times 8 \times 3cm^3$) scellés sur les bocaux de solutions salines. Afin de maîtriser les conditions de l'essai, nous l'avons réalisé dans un dessiccateur (bac à silice¹) avec des conditions d'ambiances constantes ($20^\circ C$ et 20% d'humidité relative). La variation de masse des trois échantillons a ensuite été relevée chaque jour jusqu'à ce qu'elle soit linéaire.

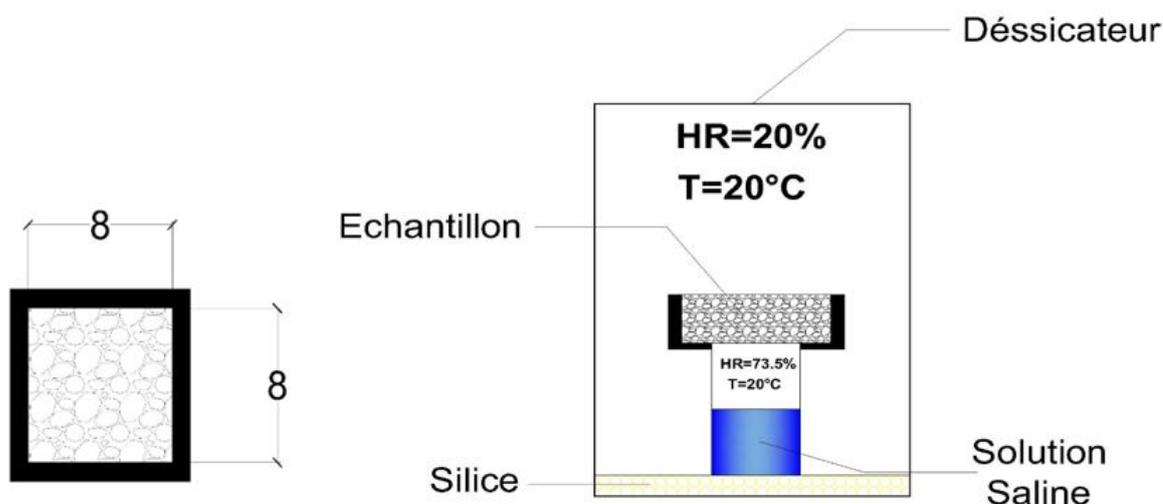


FIGURE 2.4 – Dispositif expérimental pour la perméabilité à la vapeur

Ainsi, La perméabilité à la vapeur d'eau est déterminée grâce à l'équation (2.7) [23].

1. le silicium maintient à 20% l'humidité relative dans le dessiccateur

$$\delta_p = \frac{b \times e}{S \times \Delta P_v} \quad (2.7)$$

Avec :

- δ_p = perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$);
- b = pente de l'évolution de la masse en fonction du temps (kg/s);
- e = épaisseur de l'échantillon m ;
- S = surface de l'échantillon m^2 ;
- ΔP_v = différence de pression de vapeur d'eau dans l'échantillon.

$$\Delta P_v = (HR_1 - HR_2) \times 610,5 \times e^{\frac{17,269.\theta}{237,3 + \theta}} \quad (2.8)$$

Avec :

- θ = température du bac à silice ($^{\circ}C$);
- $HR_1 = 73,5\%$, humidité relative de l'air au dessus de la solution saline;
- $HR_2 = 20\%$, humidité relative du bac à silice.

Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau est ensuite déterminé en faisant le rapport entre la perméabilité à l'air et la perméabilité à la vapeur d'eau (voir équation 2.9) [22].

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta_p} \quad (2.9)$$

Avec :

- $\delta_{air} = 1,96.10^{-10}kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$, perméabilité à l'air pour une température de $20^{\circ}C$ [24].

2.3.3.2 Détermination des courbes de sorption des BTC

La courbe de sorption est une courbe représentant, pour une température donnée, la variation de la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau du matériau ou de l'humidité relative du milieu à l'équilibre. Pour réaliser cette étude, une enceinte climatique dans laquelle l'humidité relative a été programmée avec une température maintenue constante à $20^{\circ}C$. afin de déterminer les courbes de sorption des différentes formulations, 3 échantillons de chaque formulation ont préalablement été séchés à $75^{\circ}C$ jusqu'à masse constante. Ensuite la teneur en eau des échantillons a été déterminée pour 6 points d'humidité relative, à savoir : 0%, 20%, 40%, 60% et 80% [22],[24],[7].

2.4 Hypothèses et modèle de simulation hygro-thermique du bâtiment

2.4.1 Le bâtiment expérimental

Les études ont été menées sur un bâtiment existant en évolution libre sans apport énergétique interne (sans occupants et sans équipements) construit à base de parpaing de ciment. Le bâtiment a une surface habitable de $60 m^2$. Il s'agit d'un logement qu'utilise généralement la classe moyenne au

Burkina Faso avec : un séjour, une chambre, une salle de bains et une cuisine comme présenté dans la figure 2.5. L'entrée principale du bâtiment expérimental est orientée 328° Nord, et la paroi composant le mur est construite avec des agglomérés de ciment alvéolés de 15 cm recouverts à l'extérieur d'un enduit de ciment d'une épaisseur estimée à 2 cm et d'une couche minérale de couleur rouge orangé. La face interne des parois est recouverte d'un revêtement en enduit de ciment de 2 cm et d'une couche de peinture blanche à base de chaux. Le bâtiment expérimental a été instrumenté avec des thermo-puces de type waranet et des hygro-puces aussi de type waranet. Le niveau de sensibilité des thermo-puces est de 0,06°C à 0,5°C, tandis que celui des hygro-puces est de $\pm 0,2\%$ d'humidité relative.

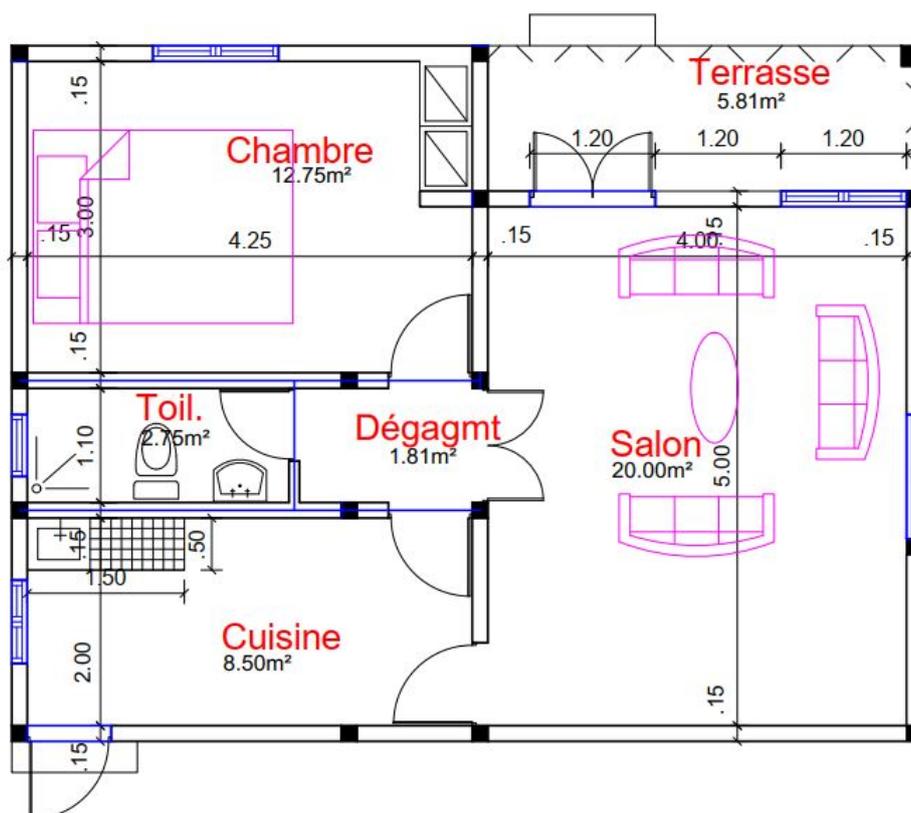


FIGURE 2.5 – Plan du bâtiment

Le toit en double pente voutée est en tôle d'acier galvanisé avec comble. Les fenêtres sont de dimensions 1,2m x 1,2m sans vitrage pour les zones de vie, 0,60 m x 0,60m pour la salle de bain et de 1m x 0,60m pour la cuisine [1].

2.4.2 Modèle de simulation

La simulation hygrothermique du bâtiment s'est faite grâce au modèle de simulation hygrothermique WUFI[®] Plus (figure 2.6) [25]. Ce Logiciel fait partie de la famille de logiciels de simulation hygrothermique WUFI[®].

WUFI[®] Plus est régit par les équations 2.10 et 2.11.

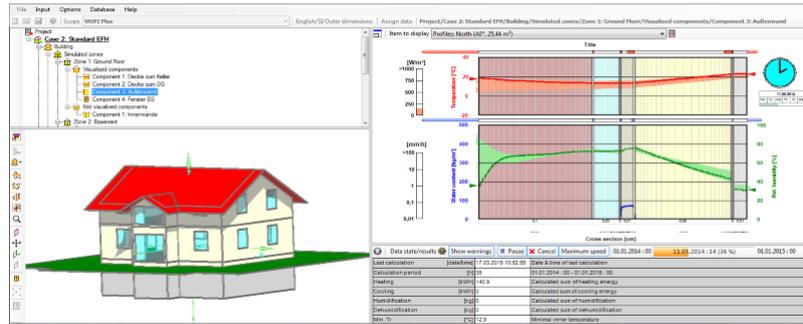


FIGURE 2.6 – Interface de WUFI[®] Plus

Conservation d'énergie :

$$\left(\rho c + \frac{\partial H}{\partial T}\right) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + h_v \cdot \nabla(\delta_p \cdot \nabla(\phi p_{sat})) \quad (2.10)$$

Conservation de masse :

$$\frac{dw}{d\phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D_w \cdot \frac{dw}{d\phi} \cdot \nabla \phi + \delta_p \cdot \nabla(\phi p_{sat})) \quad (2.11)$$

Avec :

- w : Teneur en eau (kg/m^3);
- ϕ : Humidité relative ;
- t : temps (s);
- T : Température (K);
- c : Chaleur spécifique ($J/kg.K^{-1}$);
- ρ : Densité apparente (kg/m^3);
- H : Enthalpie totale (J/m^3);
- λ : Conductivité thermique ($W/m.K^{-1}$);
- h_v : Chaleur latente de changement de phase (J/kg);
- δ_p : Perméabilité à la vapeur ($kg/m.s^{-1}.Pa^{-1}$);
- p_{sat} : Pression de vapeur saturée (Pa);
- D_w : Diffusivité du liquide (m^2/s).

2.4.3 Hypothèses de simulation

Afin de mettre en œuvre le modèle, il a fallu définir un certain nombre d'hypothèses. C'est la raison pour laquelle, nous avons défini le mode de fonctionnement du bâtiment expérimental et procéder à un découpage en zones thermiques les différentes pièces du bâtiment de façon cohérente avec notre contexte d'étude. Ces hypothèses sont : le bâtiment pilote est en évolution libre c'est-à-dire sans systèmes de ventilation mécanique, il n'y a pas d'apports énergétiques internes dans les différentes zones thermiques, les portes et les fenêtres du bâtiment sont toujours fermées.

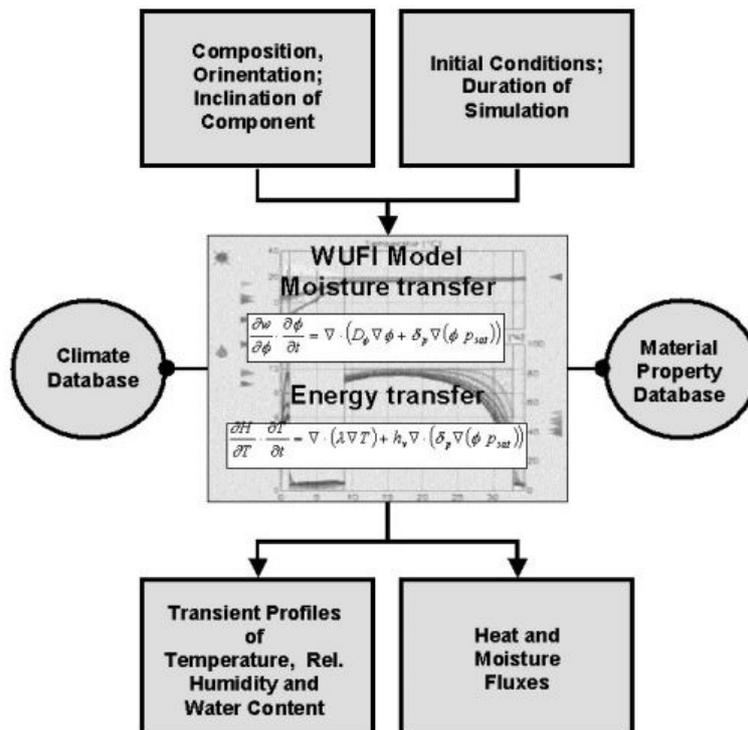


FIGURE 2.7 – Modèle de simulation WUFI[®] Plus [3]

2.4.3.1 Les sollicitations climatiques

Les données climatiques extérieures utilisées dans le cadre de la présente étude ont été obtenues grâce à des mesures expérimentales et aussi grâce au fichier météo type TMY de la ville de Ouagadougou. Les mesures expérimentales, menées durant une année complète (01/01/2014 à 31/12/2014) ont concerné la température et l'humidité relative de l'air extérieur. Les données complémentaires que sont la température du point de rosée, la vitesse du vent, la direction du vent, la pression atmosphérique, le rayonnement global horizontal, le rayonnement direct normal et le rayonnement diffus horizontal sont issues quant à elles du fichier météo type TMY [1]. Les figures 2.8 et 2.9 présentent les moyennes mensuelles des températures et des humidités relatives de l'air extérieur et du sol.

2.4.3.2 Modélisation de l'enveloppe du bâtiment

Les dimensions du bâtiment ainsi que les formes géométriques ont été modélisées en 3D directement sur le logiciel WUFI[®] Plus. Les différentes parois, à savoir les murs, le plancher, la toiture les portes et les fenêtres ont été modélisées en tenant compte de leur caractéristiques géométriques et des propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux utilisés. La modélisation s'est faite en divisant en zones thermiques spécifiques chaque pièces du bâtiment (Salon, chambre, toilettes, cuisine, dégagement) et le comble. L'infiltration au sein du modèle a été prise égale à 0,8 ACH². Cette valeur est issue de plusieurs simulations lors de la calibration afin d'avoir un modèle correct. La figure 2.10 nous montre le résultat de la modélisation faite sur WUFI[®] Plus

2. Air Change per Hour

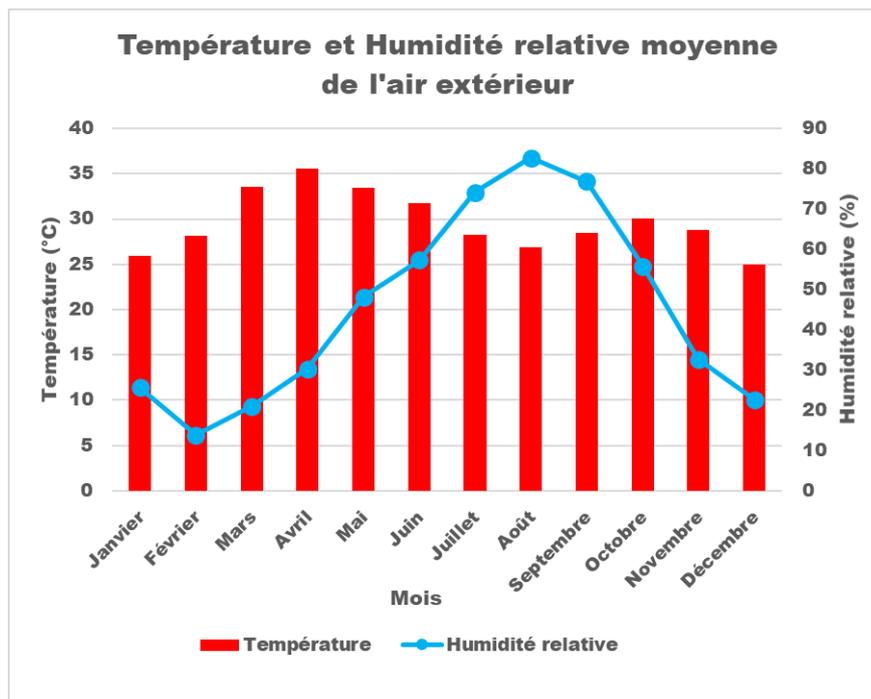


FIGURE 2.8 – Représentation des températures et humidité relative moyennes mensuelles de l'air extérieur

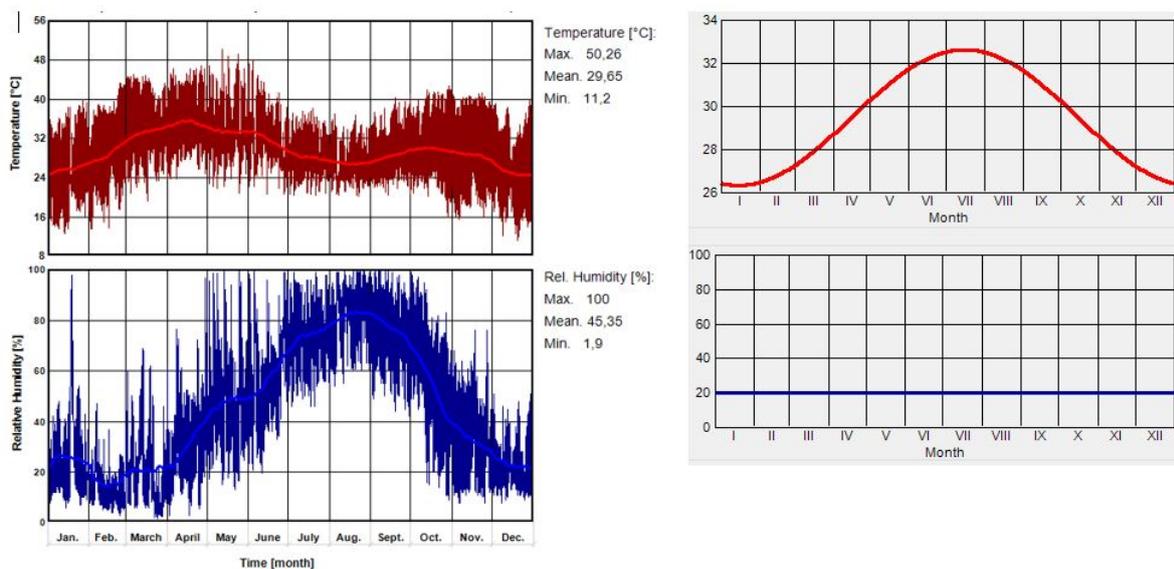


FIGURE 2.9 – Température et humidité relative de l'air extérieur, température et humidité relative du sol

2.4.3.3 Plan de simulation

Dans le but de mettre en évidence l'impact de la chaleur latente d'évapo-condensation des BTC dans l'amélioration du confort thermique de l'habitat en climat chaud, nous avons défini deux différents scénarios de simulation.

Le premier scénario consiste en la simulation du bâtiment expérimental calibré avec une paroi en BTC. L'objectif est de permettre l'évaporation ainsi que les échanges de masse entre l'humidité de

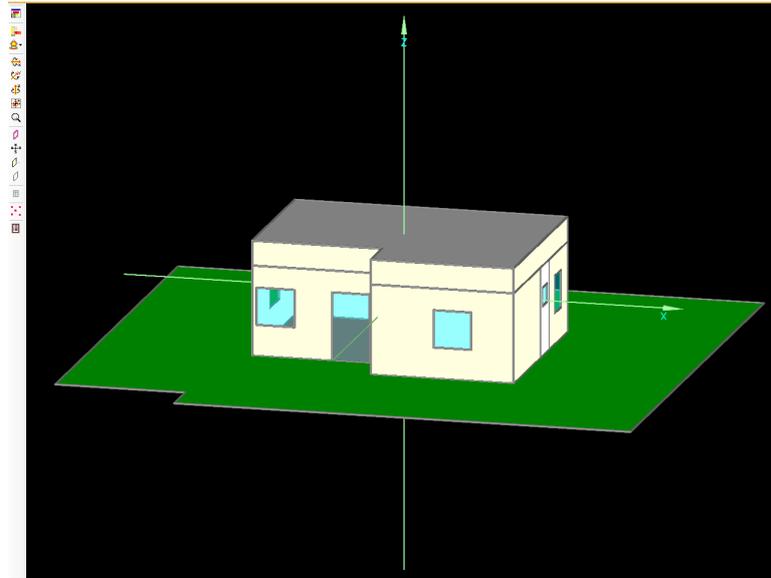


FIGURE 2.10 – Rendu géométrique du modèle sur WUFI[®] Plus

l'air ambiant avec le réseau poral des BTC.

Le deuxième scénario consiste à simuler le bâtiment expérimental cette fois-ci avec une paroi en BTC recouverte des deux côtés de ses faces avec un enduit totalement étanche d'une épaisseur de 2cm. Ce deuxième scénario nous permettra d'empêcher les échanges de masse entre l'humidité relative de l'air ambiant et le réseau poral des BTC. Le matériau choisi pour l'étanchéité est l'asphaltemastix issu de la base de données de WUFI[®] Plus. Ce matériau a été choisi en raison de sa non porosité et parce qu'il n'a aucun impact sur les propriétés thermiques de la paroi. La figure 2.11 présente schématiquement le plan de simulation.

2.5 Les critères de validation du modèle

Afin de mener des calculs hygrothermiques corrects, nous avons validé le modèle grâce aux données issus de l'instrumentation du bâtiment existant et avec deux critères de validité recommandés par l'ASHRAE 2002 [26]. Le premier critère de validité est l'erreur de biais moyenne normale (NMBE) qui permet d'évaluer la différence moyenne entre prédictions et mesures. Le second critère est le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CVRMSE) qui quant à lui illustre la capacité du modèle à représenter la réalité. A ces deux critères de validité s'ajoute un coefficient de corrélation R^2 supérieur à 0,9 recommandé par l'ASHRAE 2009 qui évalue la qualité de l'environnement intérieur du bâtiment [17]. Le tableau 2.1 présente les limites à ne pas dépasser [1].

$$NMBE = \frac{\sum_1^n (x_s^i - x_m^i)}{(n - 1) \bar{x}_m} \quad (2.12)$$

$$CVRMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_s^i - x_m^i)^2}{(n - 1)} \frac{1}{\bar{x}_m}} \quad (2.13)$$

$$R^2 = \frac{\sum_1^n x_m^i x_s^i - n \bar{x}_m \bar{x}_s}{\sqrt{(\sum_1^n (x_m^i)^2 - n \bar{x}_m)(\sum_1^n (x_s^i)^2 - n \bar{x}_s)}} \quad (2.14)$$

Avec :

- x_m = les valeurs mesurées ;
- x_s = les valeurs simulées ;
- \bar{x}_s = moyenne des valeurs simulées ;
- \bar{x}_m = moyenne des valeurs mesurées.

TABLE 2.1 – Critères de validation du modèle selon ASHRAE (2002)

Critères de validation (ASHRAE 2002 [26])	Critères horaires	Critères mensuelles
NMBE	10	30
CVRMSE	5	15

2.6 Conclusion

Le but de ce présent chapitre était dans un premier temps de déterminer les différentes caractéristiques (physiques, thermiques et hygrométriques) des BTC qui entreront dans la modélisation du bâtiment expérimental. Dans un second temps, il était aussi d'établir un plan de simulation afin de faire ressortir au mieux l'impact de l'hygroscopicité des BTC dans l'amélioration du confort thermique. Pour ce faire, nous avons utilisé différents protocoles expérimentaux qui nous ont permis de mettre en exergue les caractéristiques de nos matériaux. Nous avons aussi, défini les différentes hypothèses de simulation nécessaires dans l'atteinte notre objectif général.

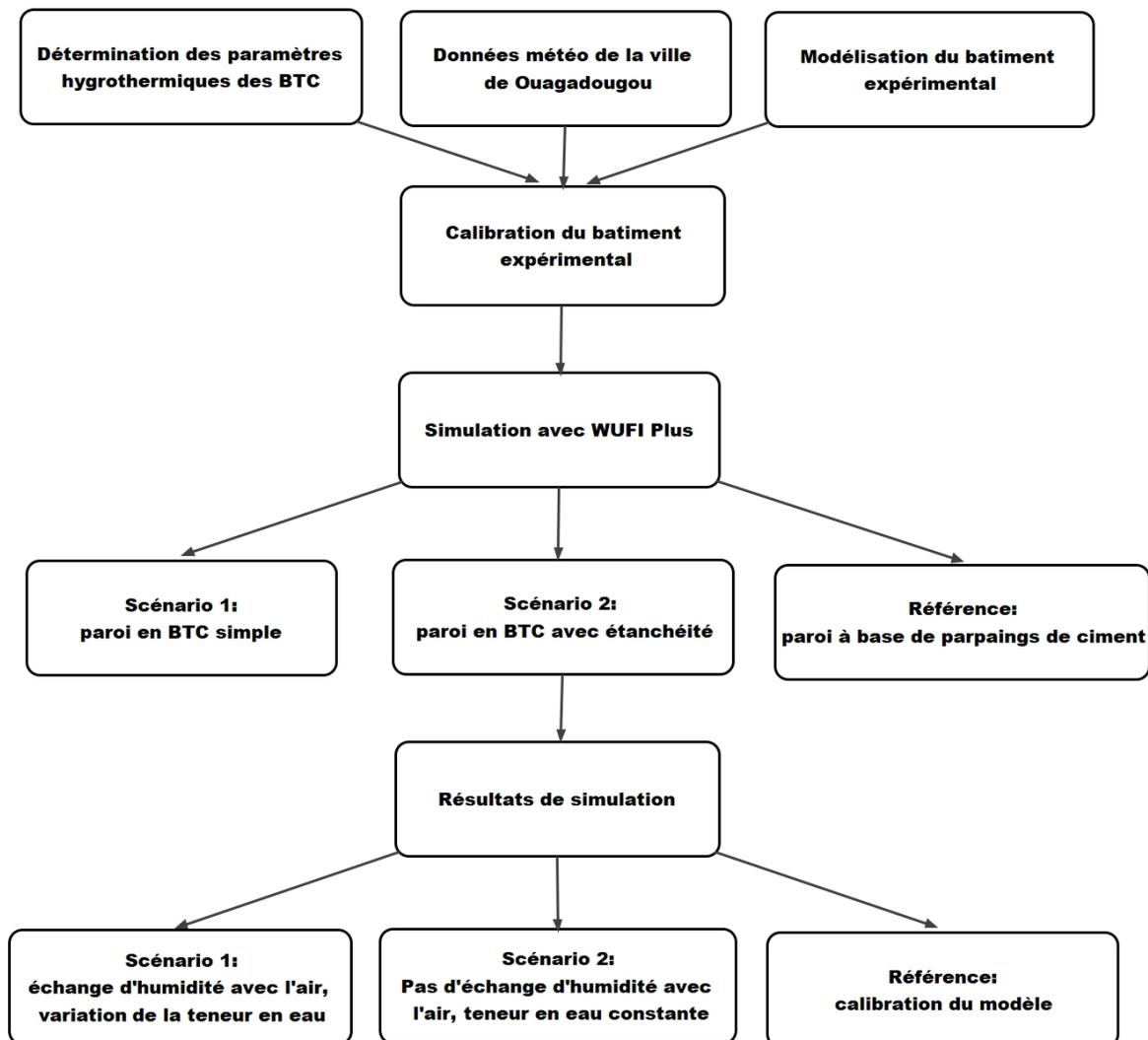


FIGURE 2.11 – Plan de simulation

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous présenterons les résultats des différentes propriétés (physiques, thermiques et hygrométriques) des BTC. Ces différentes propriétés obtenues nous ont permis de simuler le bâtiment expérimental suivant plusieurs scénarios. Nous présenterons donc les résultats des simulations des différents scénarios et nous interpréterons les différents résultats obtenus.

3.2 Propriétés physiques

Cette partie présente les résultats des propriétés physiques des BTC testées. Les résultats concernent les résultats de la densité apparente, de la porosité, de l'absorption capillaire et de la teneur en eau à la saturation libre.

3.2.1 Densité apparente

3.2.1.1 Résultats

Les résultats des densités apparentes des différentes formulations (0%, 4%, 6% et 8% de ciment) sont résumées dans la figure 3.1 :

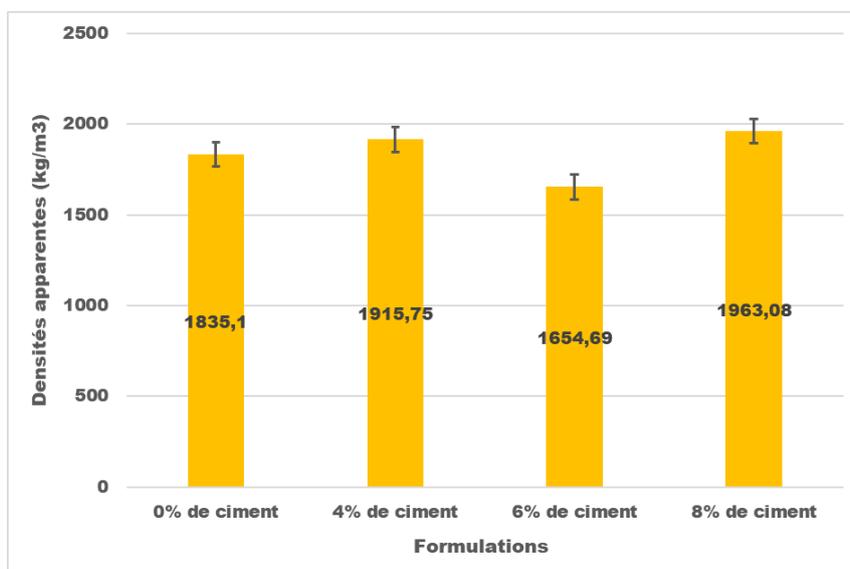


FIGURE 3.1 – Densités apparentes des différentes formulations

3.2.1.2 Analyses et interprétations

Ces résultats montrent que toutes les formulations aboutissent à des matériaux plus ou moins denses. Les différences observées entre les différentes densités sont très légères. Néanmoins, une diminution de la densité est observée lorsque le pourcentage de ciment atteint 6%. Cela s'explique par une porosité totale plus grande. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Touré et al. qui varient entre 1871 kg/m^3 à 2000 kg/m^3 [23]. Ils sont aussi conformes aux résultats obtenus par Mansour et al. qui varient entre 1610 kg/m^3 et 2194 kg/m^3 [10].

3.2.2 Porosité

3.2.2.1 Résultats

Il existe un lien important entre la structure porale, l'état hydrique du matériau et les transferts hygrométriques. Il est donc indispensable de caractériser la structure porale des BTC. Les résultats des porosités des BTC sont renseignées dans la figure 3.2.

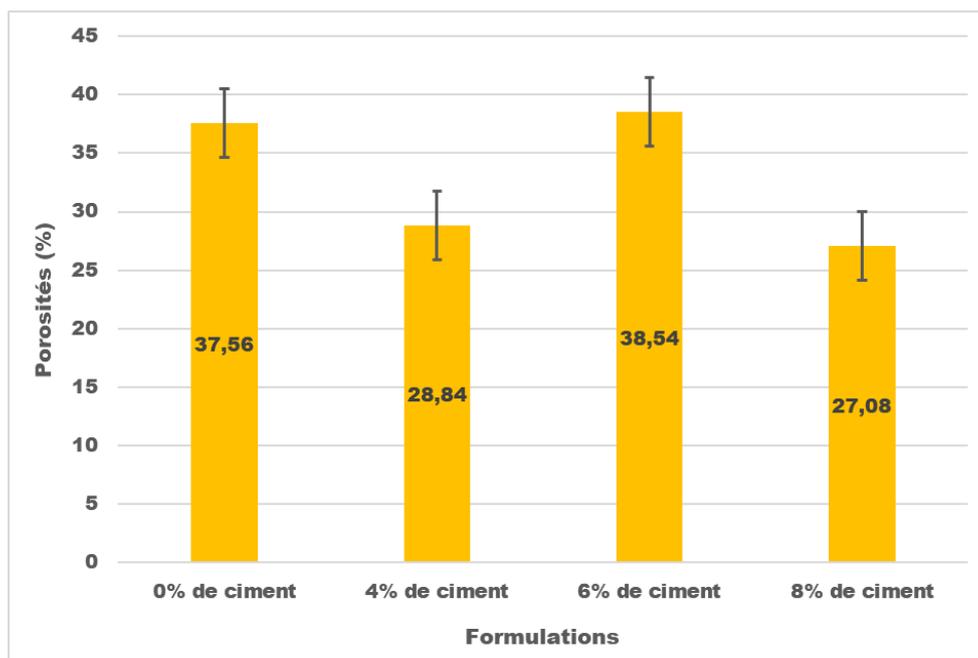


FIGURE 3.2 – Résultats des porosités des différentes formulations

3.2.2.2 Analyses et interprétations

Les résultats des porosités des différentes BTC nous montrent une variation exprimée de la porosité pour une teneur en ciment de 6%. Cette variation de la porosité totale se situe entre 27,08% et 38,54%. La valeur de 38,54% est obtenue pour les BTC stabilisés à 6% de ciment. Cela conforte les résultats obtenus pour la densité apparente qui est la plus faible avec une valeur de $1654,69 \text{ kg/m}^3$. Mansour et al. dans leurs études ont obtenu des valeurs de porosités totales allant de 21,7% à 41,6% [10].

3.2.3 Absorption capillaire

3.2.3.1 Résultats

L'absorption capillaire étant un paramètre important dans le comportement hygrométrique des matériaux, nous avons déterminé celui des BTC. La figure 3.3 nous montre les résultats des coefficients d'absorption capillaire en fonction des différentes formulations des BTC.

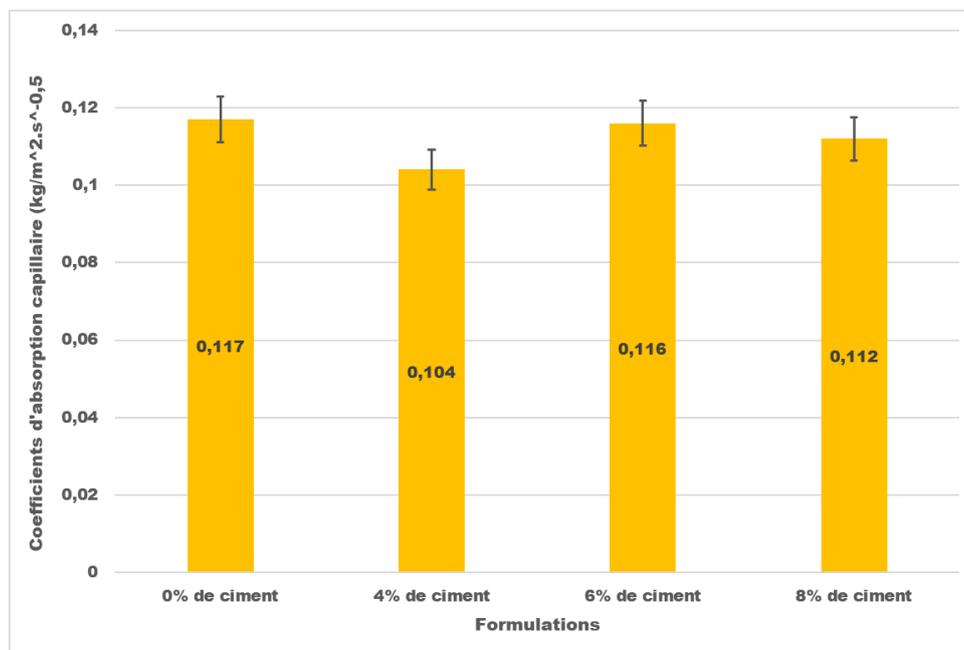


FIGURE 3.3 – Résultats de l'absorption capillaire

3.2.3.2 Analyses et interprétations

Nous remarquons sur la figure 3.3 que les coefficients d'absorption capillaire des formulations de 4% de ciment et de 8% de ciment sont plus faibles comparés à ceux des formulations de 0% de ciment et 6% de ciment. Nous avons des valeurs variant de 0,104 kg/m² · s^{-0,5} à 0,117 kg/m² · s^{-0,5} respectivement pour les formulations de 4% de ciment et de 6% de ciment. Cette variation est liée à la porosité totale qui est beaucoup plus faible pour les formulation de 4% de ciment et élevée pour les formulations de 6% de ciment avec des valeurs respectives de 28,84% et 38,54%.

3.2.4 Teneur en eau à la saturation libre

3.2.4.1 Résultats

L'essai de teneur en eau à la saturation libre a été réalisé sur 3 échantillons des différentes formulations. La figure 3.4 nous montre les différents résultats obtenus après chaque essais.

3.2.4.2 Analyses et interprétations

Les résultats des teneurs en eau à la saturation libre des différentes BTC nous informe sur leur capacité à absorber et stocker l'eau. sur la figure 3.4 nous pouvons observer une teneur en eau plus faible pour les formulations de 4% de ciment et de 8% de ciment avec des valeurs respectives de

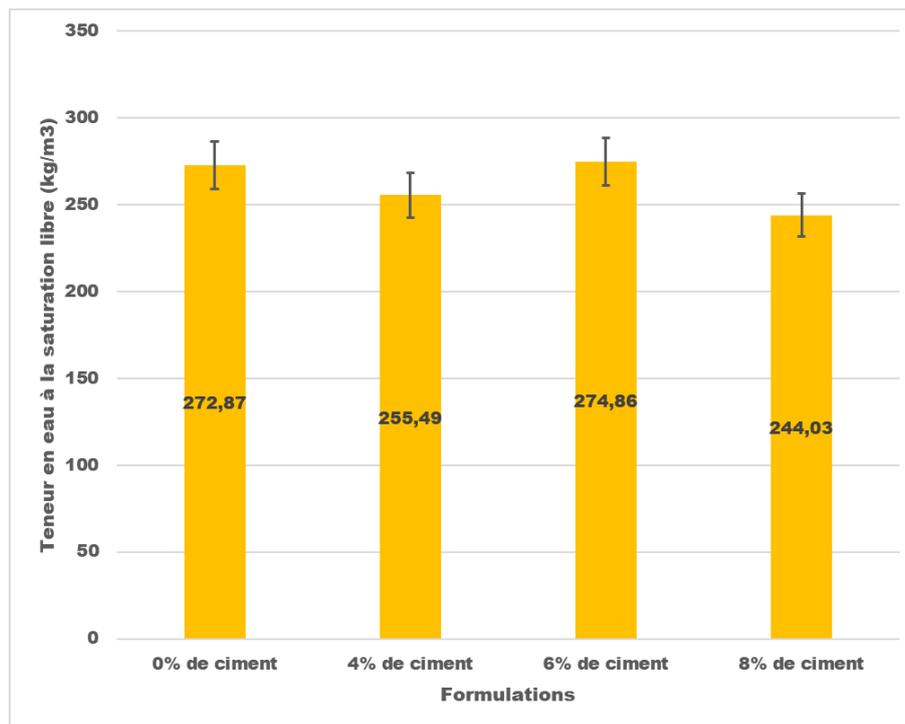


FIGURE 3.4 – Résultats de teneurs en eau à la saturation libre

255,49 kg/m³ et 244,025 kg/m³. Ces valeurs se traduisent par des porosités respectives de 28,84% et 27,08%. Nous observons aussi que les BTC avec des formulations de 0% de ciment et de 6% de ciment présentent des teneurs en eau plus élevées à savoir 272,87 kg/m³ et 274,86 kg/m³ respectivement. Ces dernières valeurs sont donc dues à des porosités plus élevées à savoir 37,56% et 38,54% respectivement.

3.3 Propriétés thermiques

3.3.1 Résultats

La conductivité thermique étant un paramètre déterminant dans la simulation thermique dynamique, la détermination de ce paramètre sur les différentes BTC est une étape importante. Les résultats des conductivités thermiques sont présentées dans la figure 3.5. La figure 3.6 montre les résultats des chaleurs massiques obtenus après expérimentation sur les BTC.

3.3.2 Analyses et interprétations

Sur la figure 3.5, on peut constater une augmentation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en ciment. Cette variation part 0,658 W/m.K à 1,016 W/m.K respectivement pour les BTC de 0% de ciment et de 8% de ciment. En effet, la teneur en ciment influe fortement sur la conductivité thermique des BTC. Mansour et al. ont montré que la conductivité thermique croit en fonction de la teneur en ciment des BTC. Les valeurs obtenues varient notamment de 0,618 W/m.K à 1,483 W/m.K [10].

Concernant la capacité calorifique, la figure 3.6 nous montre que contrairement à la conductivité

thermique, elle ne croit pas linéairement en fonction de la teneur en ciment. Cela se traduit par les résultats des densités apparentes non linéaires. En effet, les résultats des chaleurs massiques les plus faibles à savoir celles des formulations à 4% de ciment et 8% de ciment ont pour valeurs respectives 1092,23 J/kg.K et 985,92 J/kg.K. Les valeurs des densités de ces formulations sont beaucoup plus faibles que celles de 0% de ciment et de 6% de ciment qui ont pour valeurs respectives 1148,77 et 1162,84 J/kg.K. Touré et al. ont obtenus comme valeurs de capacité calorifique massique variant de 997 J/kg.K à 1060 J/kg.K [10]. Aussi, Cagnon et al. ont obtenus des valeurs de capacité calorifique massique variant de 950 J/kg.K à 1020 J/kg.K.

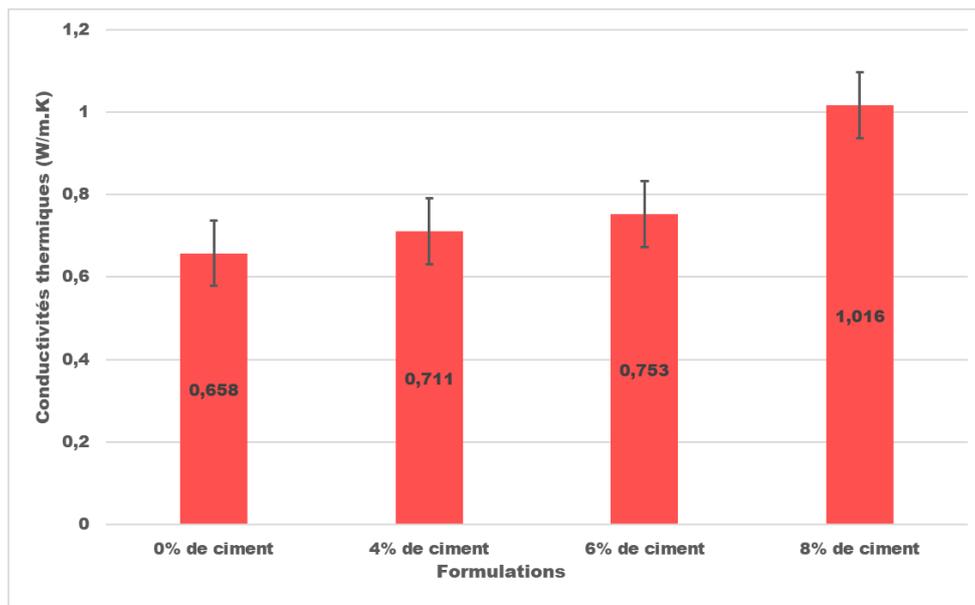


FIGURE 3.5 – Résultats des conductivités thermiques

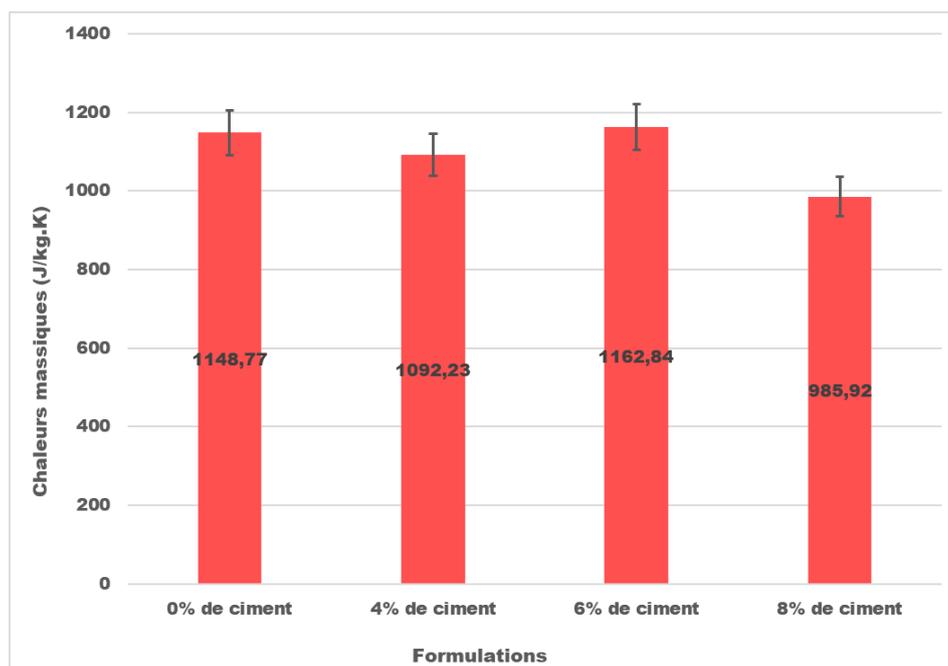


FIGURE 3.6 – Résultats des chaleurs massiques

3.4 Propriétés hygrométriques

Dans cette partie, nous présenterons les résultats des propriétés hygrométriques des BTC. Les résultats concernent les résultats de la résistance à la vapeur d'eau et les courbes de sorption des différentes formulations des BTC.

3.4.1 Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

3.4.1.1 Résultats

la perméabilité à la vapeur fait partie des paramètres hygrométriques les plus importants nécessaires à notre étude. Afin de mener à d'atteindre notre objectifs général, nous avons déterminé les coefficients de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau des différentes formulations des BTC dont Les résultats sont renseignées dans la figure 3.7

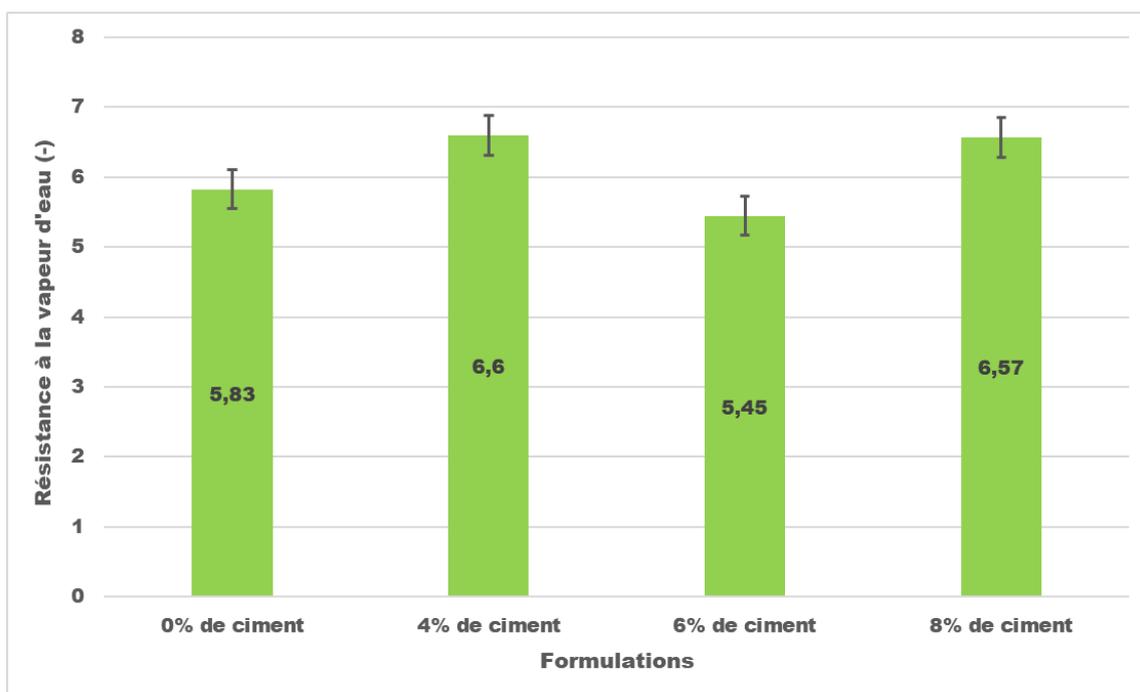


FIGURE 3.7 – Résultats des coefficients de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

3.4.1.2 Analyses et interprétations

La figure 3.7 nous renseigne sur l'évolution de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau en fonction des teneurs en ciment. Sur ce graphique, on peut constater un maximum de 6,6 et un minimum 5,45 respectivement pour les formulations de 4% de ciment et de 6% de ciment. cela se traduit par une porosité élevée pour les BTC de 4% de ciment et une porosité beaucoup plus faible pour les BTC de 6% de ciment. Les valeurs obtenues vont dans le même sens que celles obtenues par Touré et al. qui varient entre 7 et 8 [23]. Aussi, Cagon et al. ont obtenues des valeurs de résistance à la vapeur d'eau allant de 3 à 7 [24].

3.4.2 Isothermes de sorption

3.4.2.1 Résultats

Les isothermes de sorption obtenus en chambre climatique nous ont permis d'avoir en fonction des humidités relatives les teneurs en eau pour chaque formulation. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 3.8.

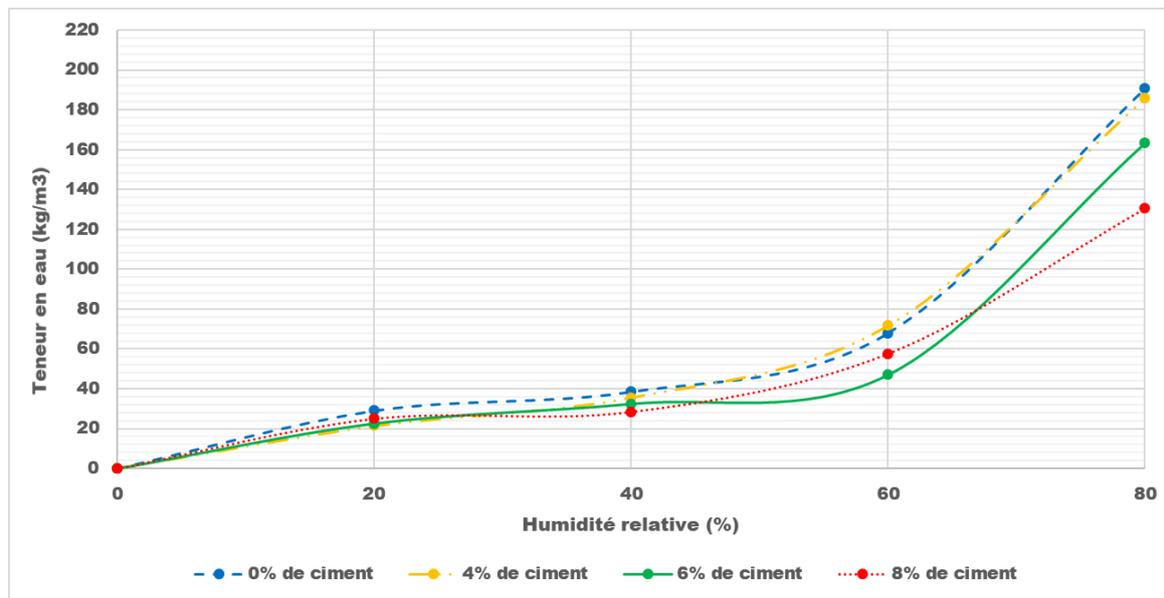


FIGURE 3.8 – Isothermes de sorption des différentes formulations

3.4.2.2 Analyses et interprétations

La figure 3.8 nous renseigne sur les courbes de sorption des différentes formulations. Sur ces différentes courbes, on peut constater qu'elles commencent à se distinguer à partir de 60% d'humidité relative. On remarque que la courbe de sorption de 0% de ciment est celle qui a les plus fortes teneurs en eau tandis que les teneurs en eau les plus basses se présentent sur la courbe de sorption des BTC de 8% de ciment.

3.5 Résultats de la calibration du modèle

Les résultats de calibration du bâtiment expérimental sont consignés dans les tableaux 3.1 et 3.2 respectivement pour la température et l'humidité relative. On peut remarquer dans le tableau 3.1 que les valeurs du NMBE et du CVRMSE sont tout les deux conformes aux critères de la norme ASHRAE 2002 [26] à savoir inférieurs à 10% et 30%. Tandis que la valeur du coefficient de corrélation R^2 est inférieur à 0,9. Ce qui ne répond pas au critère de validité de la norme ASHRAE 2009 [17]. Le tableau 3.2 nous montre que les coefficients NMBE, CVRMSE et R^2 répondent tous aux critères de validité des normes ASHRAE 2002 [26] et ASHRAE 2009 [17]. Ainsi, les différents résultats de calibration du modèle pour la température et l'humidité relative nous montrent que la modélisation de notre bâtiment répond aux différents critères de validité de l'ASHRAE.

TABLE 3.1 – Tableau des résultats de calibration pour la température

<i>Critères de validation</i>	<i>Résultats</i>
NMBE	0,0124
CVRMSE	0,0354
R^2	0,8436

TABLE 3.2 – Tableau des résultats de calibration pour l'humidité relative

<i>Critères de validation</i>	<i>Résultats</i>
NMBE	0,0166
CVRMSE	0,0254
R^2	0,9413

3.6 Résultats des simulations

Avant chaque simulation, nous avons modélisés les parois des bâtiment grâce aux propriétés consignées dans les tableaux 3.3, 3.4 et 3.5.

TABLE 3.3 – Tableau récapitulatif des propriétés physiques des BTC

Formulations	Densité (kg/m ³)	Porosité	Absorption totale (kg/m ³)	Absorption capillaire (kg/m ² · s ^{-0.5})
BTC 0%	1835,10	0,38	272,87	0,117
BTC 4%	1915,75	0,29	255,49	0,104
BTC 6%	1654,69	0,39	274,86	0,116
BTC 8%	1963,08	0,27	244,03	0,112

TABLE 3.4 – Tableau récapitulatif des propriétés thermiques des BTC

Formulations	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
BTC 0%	0,658	1148,77
BTC 6%	0,753	1162,84
BTC 4%	0,711	1092,23
BTC 8%	1,016	985,92

Les différentes simulations effectuées sur chaque formulation nous ont permis de construire le graphique de la figure 3.9. Ce graphe représente les différences mensuelles de température à la surface surfaces intérieures des BTC entre le scénario 1 et le scénario 2 (température mensuelle Scénario 1 – température mensuelle Scénario 2).

TABLE 3.5 – Tableau récapitulatif des propriétés hygrométriques des BTC

Formulations	Teneur en eau de référence à 80% HR (kg/m ³)	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau
BTC 0%	190,69	5,83
BTC 4%	185,75	6,60
BTC 6%	163,02	5,45
BTC 8%	130,56	6,57

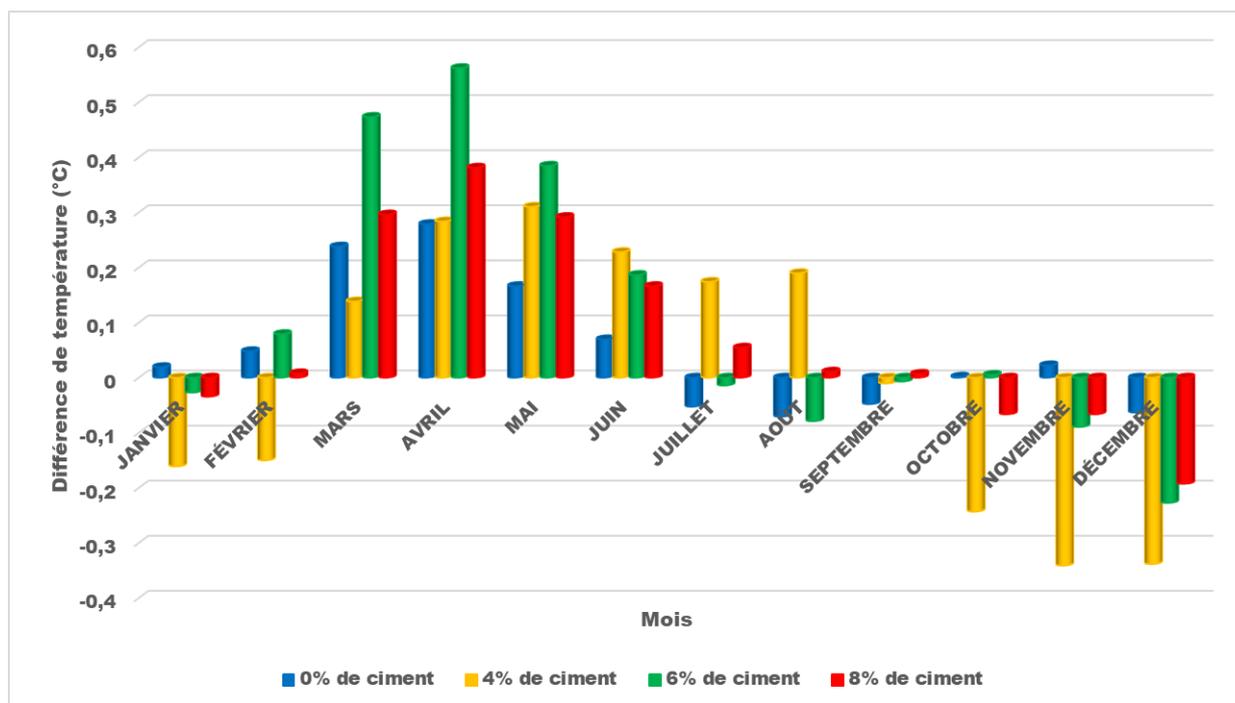


FIGURE 3.9 – Représentation graphique des différences de température de surface intérieure pour chaque formulation

Sur ce graphique, nous observons des températures plus élevées sur les surfaces intérieures des BTC du scénario 1. Cette dominance s'accroît plus pendant les mois de Mars à Juin où les températures sont très élevées et l'humidité relative de l'air extérieur faible (voir figure 2.8). L'on observe aussi durant les mois de Juillet à Septembre des températures plus élevées pour le scénario 1 au niveau des BTC stabilisées à 4% de ciment. Cependant, durant ces mois, les températures de surface des BTC du scénario 1 sont moins élevées que celles du scénario 2. Cela s'explique par des températures de l'air extérieur faibles et l'humidité relative de l'air extérieur est élevée. Aussi, Dans les mois les plus secs et frais à savoir les mois d'octobre à Février, la prédominance s'observe plutôt sur les BTC du scénario 2.

Afin de mieux cerner ce phénomène, nous avons basé notre étude sur le jour le plus chaud de notre fichier météo, à savoir à la date du 12/05. À cette date, nous avons une température maximale de 50°C à 12h et une humidité relative maximale de 61% à 06h. sur la figure 3.10, nous observons la température et l'humidité relative de l'air extérieur pour chaque heure. Sur la figure 3.11, nous avons effectué les différences de température de l'air intérieur entre le scénario 1 et le scénario 2 pour les formulations de 8% de ciment. Sur ce graphique, l'on observe qu'entre 00h et 08h la température de

l'ambiance intérieur du scénario 1 est plus faible que celle du scénario 2. Cela s'explique notamment par une humidité relative de l'ambiance extérieure élevée. La BTC du scénario 1 (sans enduit sur ses faces) effectue donc des échanges de masse avec l'air ambiant, cette diminution de température est donc due au phénomène d'évapo-condensation qui se produit au scénario 1 contrairement au scénario 2 qui comporte des BTC avec enduit sur ses deux faces. Sur la deuxième phase du graphique, à savoir entre 09h et 22h, on observe que les températures du scénario 2 sont plus faibles que celles du scénario 1. Cela s'explique par une humidité relative faible de l'air extérieure entre 09h et 22h et une température maximale de 50°C à 12h. Cette augmentation de température de l'air intérieur au scénario 1 se traduit par une évaporation importante de l'eau présente dans les pores des BTC du scénario 1. Cette teneur en eau devient beaucoup plus faible étant donné que l'humidité relative à cette heure-là chute jusqu'à environ 15%.

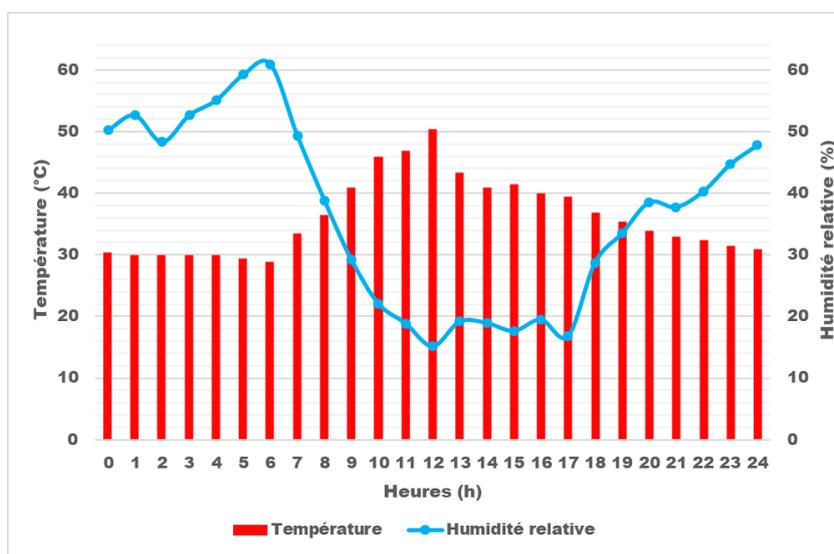


FIGURE 3.10 – Température et humidité relative de l'air extérieur le 12/05

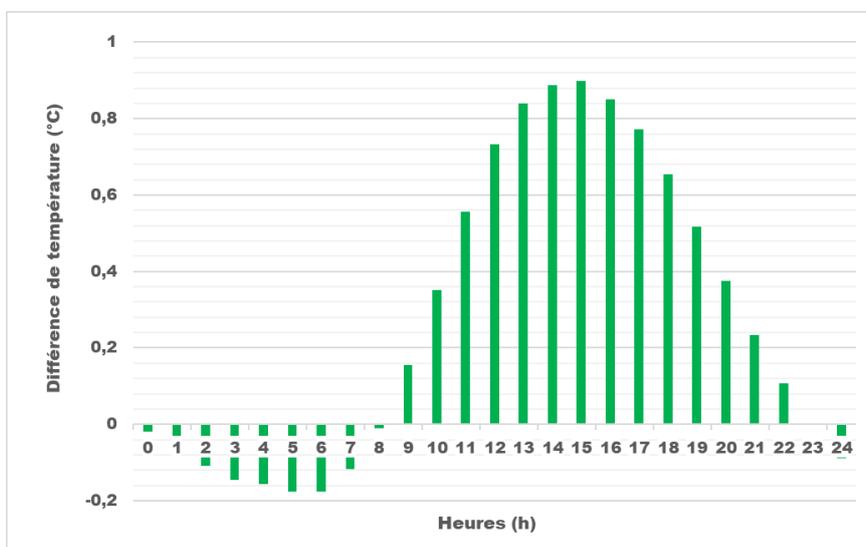


FIGURE 3.11 – Différence de température de l'air intérieur entre le scénario 1 et 2 des BTC stabilisés à 8% de ciment le 12/05

Dans le but d'étayer notre propos, nous avons effectué à la même date du 12/05 des coupes transversales des parois à 06h et à 15h pour les scénarios 1 et 2. Ces différentes coupes représentent les températures intérieures et les teneurs en eau dans les BTC des différents scénarios.

Les figures 3.12 et 3.13 nous présentent les températures dans les parois du scénario 1 et 2 à 06h du matin avec une température extérieure de 29°C et une humidité relative de 61%. Sur la figure 3.12 les températures en surfaces internes sont de l'ordre de 32,3°C à 32,8°C tandis que sur la figure 3.13 nous avons des températures allant de 32,7°C à 33,5°C. les températures des faces internes des BTC au scénario 1 sont donc plus faibles que celles du scénario 2.

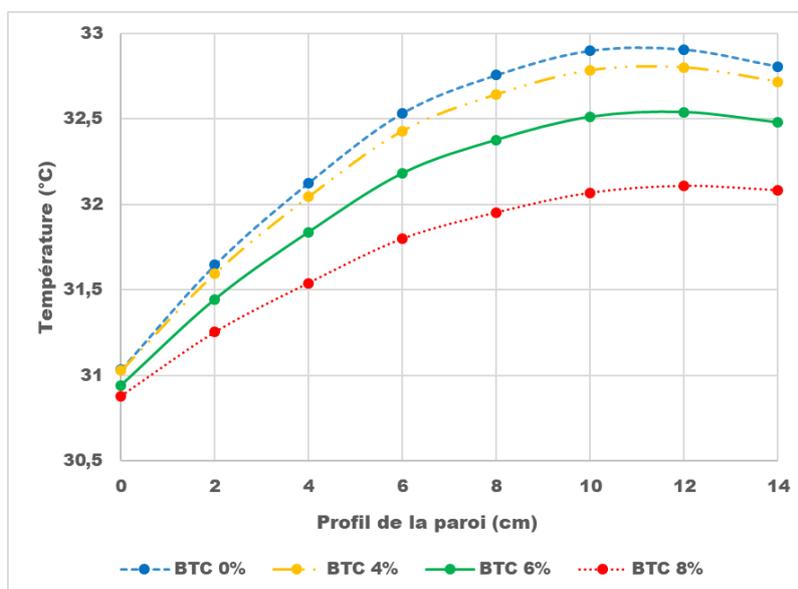


FIGURE 3.12 – Température dans la paroi du scénario 1 à 06h

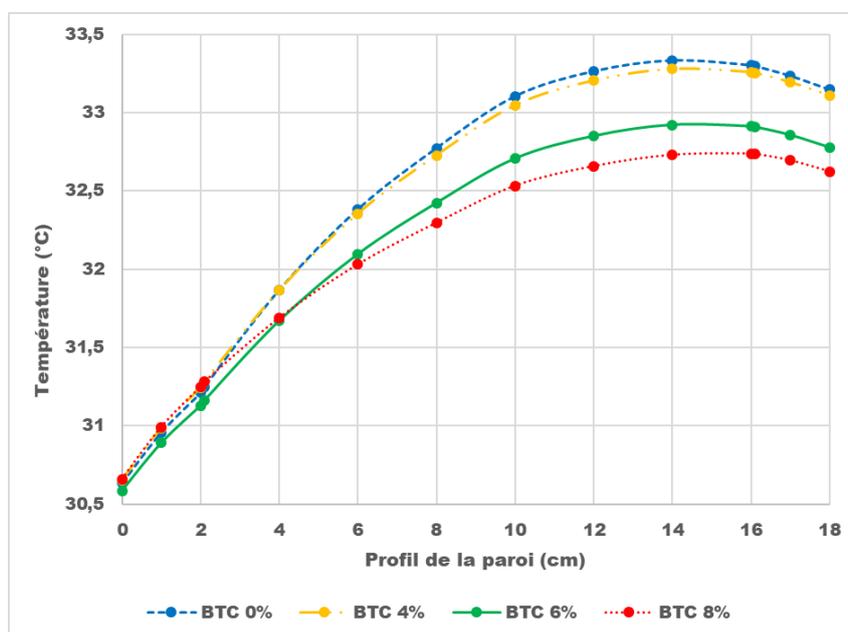


FIGURE 3.13 – Température dans la paroi du scénario 2 à 06h

Les figures 3.14 et 3.15, nous présentent les teneurs en eau dans les BTC pour les scénarios 1 et 2. Sur la figure 3.14, on observe une variation de la teneur en eau au sein des BTC dans le scénario 1 tandis que, tandis que sur la figure 3.15 cette teneur en eau reste quasiment constante à 2,5 kg/m³ qui est la teneur en eau de départ. On peut ainsi dire que la BTC du scénario 2 n'interagit pas avec l'air ambiant. On peut donc conclure pour dire que cette variation de teneur en eau a eu pour impact principal de diminuer les températures des faces internes des BTC sans enduits.

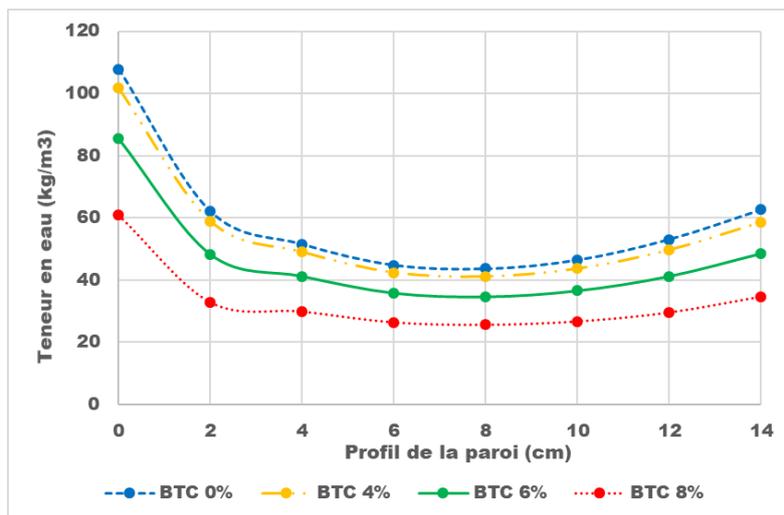


FIGURE 3.14 – Teneur en eau dans la paroi du scénario 1 à 06h

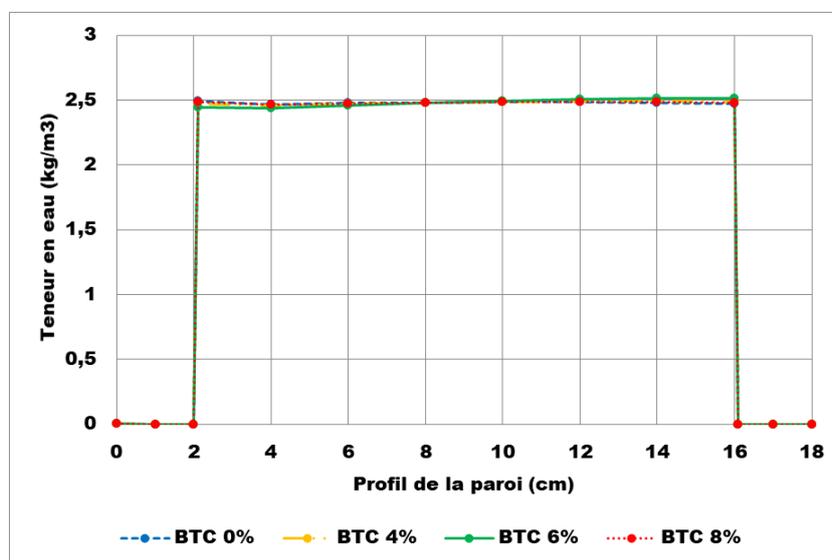


FIGURE 3.15 – Teneur en eau dans la paroi du scénario 2 à 06h

Contrairement aux figures 3.12 et 3.13, les figures 3.16 et 3.17 nous montrent que les températures des surfaces intérieures des BTC du scénario 1 sont plus élevées que celles du scénario 2. Ces températures varient en fonction des formulations de 37°C à 38,5°C pour le scénario 1, tandis qu'au scénario 2, elles varient entre 35,7°C et 36,2°C. Cela est majoritairement dû à une humidité relative extérieure faible (17%) et une température extérieure élevée (50°C). Cela confirme les résultats obtenus sur la figure 3.11. On peut donc dire que lorsque l'humidité relative est très faible, l'on ne perçoit

plus le comportement hygroscopique des BTC entraînant ainsi la faible exploitation de la chaleur latente d'évapo-condensation.

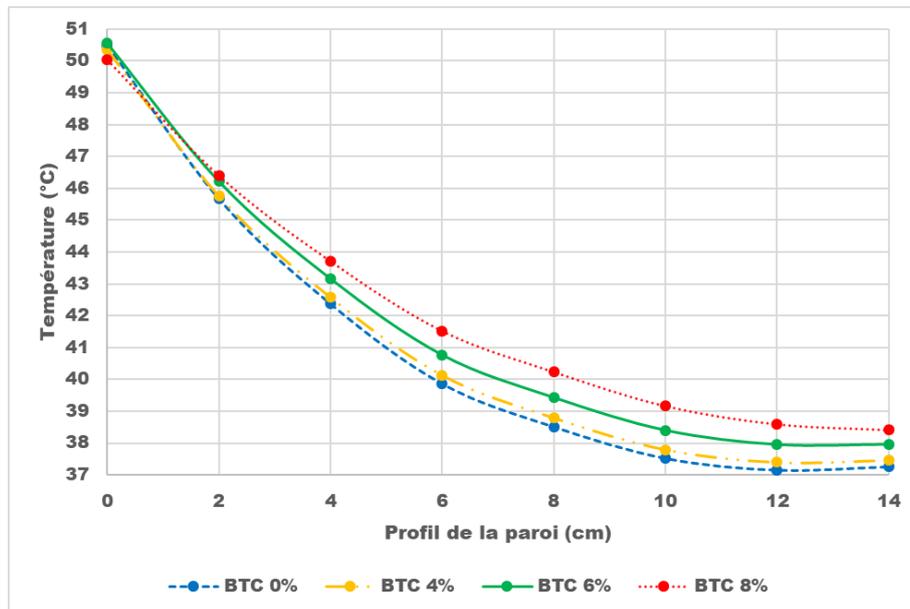


FIGURE 3.16 – Température dans la paroi du scénario 1 à 15h

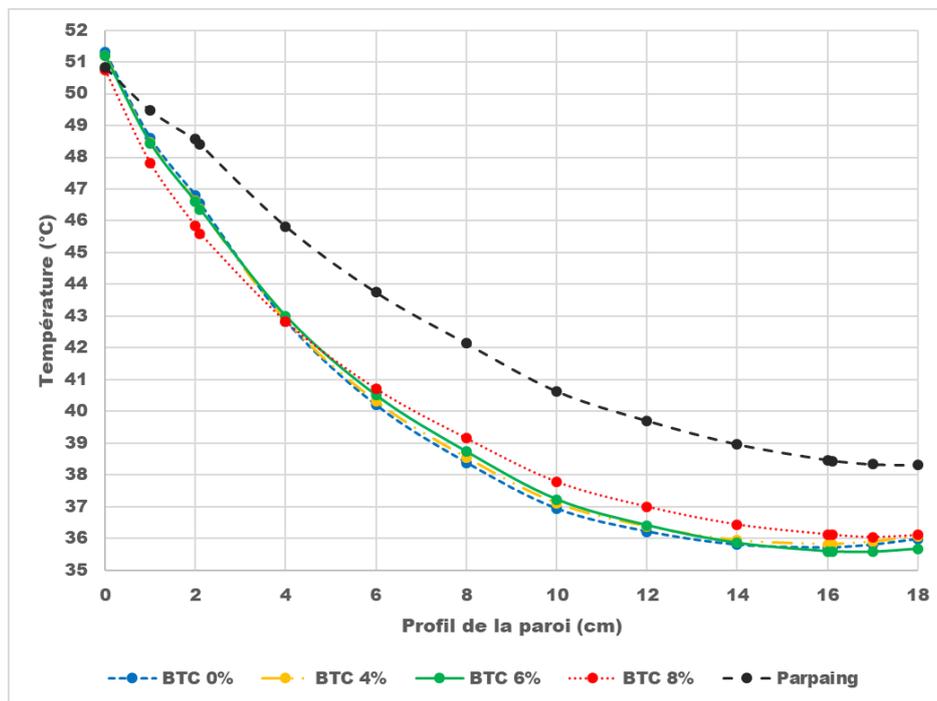


FIGURE 3.17 – Température dans la paroi du scénario 2 à 15h

Les figures 3.18 et 3.19 nous montrent comme les figures 3.14 et 3.15, la teneur en eau dans les BTC lors du scénario 1 et du scénario 2. La différence majeure s'observe sur la figure 3.18, l'humidité relative de l'ambiance extérieure à 15h étant plus faible que celle de 06h, la teneur en eau aussi est plus faible avec maximum de 63 kg/m^3 à 15h tandis qu'à 06h le maximum obtenu était de 110 kg/m^3 . Cette différence est due à une forte évaporation de l'eau contenue dans les pores des BTC du scénario 1.

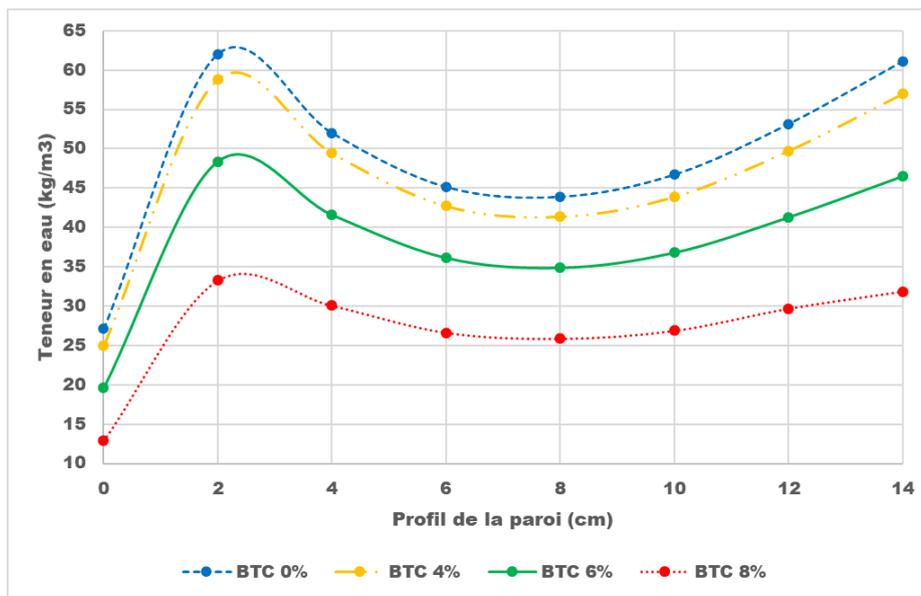


FIGURE 3.18 – Teneur en eau dans la paroi du scénario 1 à 15h

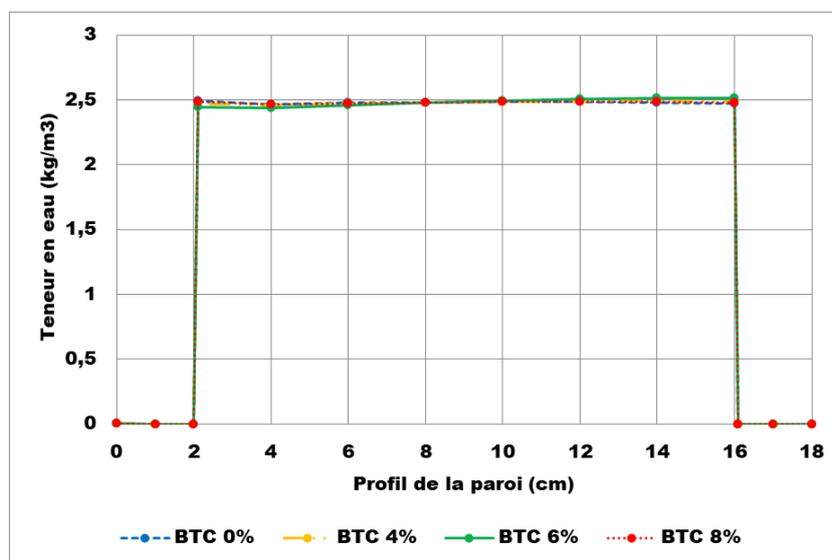


FIGURE 3.19 – Teneur en eau dans la paroi du scénario 2 à 15h

3.7 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenter les résultats obtenus après les différentes expérimentations et après les simulations thermiques dynamiques. L'instrumentation du bâtiment expérimental nous a permis de calibrer notre modèle de simulation et d'effectuer la simulation hygrothermique dynamique grâce au logiciel WUFI® Plus selon deux scénarios. Les résultats de simulation des deux scénarios nous ont montré clairement que la BTC du premier scénario présentait de meilleurs résultats contrairement à celle du scénario 2 lorsque l'humidité relative de l'air extérieur est élevée. Dans le cas où l'humidité relative de l'air extérieur est faible, cette amélioration ne s'observe plus.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans une thématique de développement durable à travers l'éco-construction. L'objectif principal de ce mémoire est de montrer l'impact de la chaleur latente d'évapo-condensation des BTC dans l'amélioration du confort thermique de l'habitat en climat chaud. L'atteinte de cet objectif passe nécessairement par la simulation hygrothermique dynamique d'un bâtiment. Afin de simuler correctement le comportement hygrométrique des parois à base de BTC, nous avons déterminés à travers différents essais, les propriétés physiques, thermiques et hygrométriques des échantillons de briques stabilisés à 0% de ciment, 4% de ciment, 6% de ciment et 8% de ciment. Suit à la détermination des différentes propriétés des BTC, nous avons modélisé le bâtiment expérimental grâce au logiciel WUFI® Plus. À la suite de la modélisation du bâtiment expérimental, nous avons calibré le modèle grâce aux critères de validation de l'ASHRAE 2002 et l'ASHRAE 2009. La calibration nous a donné des résultats répondant aux critères de validation. Ainsi, il s'en est suivi la simulation du bâtiment expérimental selon un plan de simulation défini au préalable. Ce plan a consisté en la simulation de deux parois de BTC différentes. La première simulation a été faite sur une paroi à base de BTC simple. La seconde simulation concerne une paroi en BTC recouverte d'enduit sur ses deux faces. Les résultats des simulations nous ont permis de mettre en lumière l'impact de la chaleur latente sur la réduction de la température de l'ambiance intérieure des bâtiments. Ces résultats montrent des températures généralement plus faibles pour les BTC non recouvertes d'enduits lorsque l'humidité relative de l'air extérieur est élevée. Cependant, lorsque l'humidité relative baisse, les BTC recouvertes d'enduits présentent des températures beaucoup plus faibles.

Afin d'affiner ces résultats, nous recommandons une analyse de sensibilité afin de quantifier les transferts de masse dans les pores des BTC. Cette quantification permettra notamment d'apprécier l'importance dans la chaleur latente d'évapo-condensation dans l'amélioration du confort thermique de l'habitat en climat chaud.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Madi Kaboré. Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne. PhD thesis, 2015. [4](#), [14](#), [16](#), [17](#), [28](#), [30](#), [32](#)
- [2] Amandine Piot. Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. PhD thesis, 2009. [4](#), [14](#), [18](#), [20](#)
- [3] Achilles Karagiozis, Hartwig Künzle, and Andreas Holm. WUFI-ORNL/IBP—A North American Hygrothermal Model. page 10, 2001. [4](#), [18](#), [21](#), [30](#)
- [4] Vincent Kitio. Les leviers d'actions et les initiatives en cours sur le continent africain. 20, 2013. [6](#)
- [5] ONU HABITAT. L'Etat des villes africaines 2014 réinventer la transition urbaine. 278, 2014. [6](#)
- [6] Eric Denis and François Moriconi-Ebrard. La croissance urbaine en Afrique de l'Ouest. 7, 2009. [6](#)
- [7] Florian Champire. Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction. PhD thesis, 2018. [8](#), [27](#)
- [8] H Houben and S Boubekour. Série technologie No. 11, blocs de terre comprimée. 144, 1998. [9](#), [10](#), [11](#)
- [9] Comité de validation des nouvelles technologies ABNORM. BLOCS DE TERRE COMPRIMEE - Code de bonne pratique pour la préparation des mortiers de terre, 2009. [9](#)
- [10] Mohamed Ben Mansour, Ahmed Jelidi, Amel Soukaina Cherif, and Sadok Ben Jabrallah. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). Construction and Building Materials, 104 :44–51, February 2016. [10](#), [12](#), [36](#), [38](#), [39](#)
- [11] Meriem Saidi, Amel Soukaina Cherif, Belkacem Zeghmami, and Ezeddine Sediki. Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. Construction and Building Materials, 167 :566–577, April 2018. [11](#)
- [12] Diane Bastien and Martin Winther-Gaasvig. Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope. Energy, 164 :288–297, 2018. [12](#), [13](#)
- [13] Achilles Karagiozis, Mikael Salonvaara, and Kumar Kumaran. THE EFFECT OF WATERPROOF COATING ON HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF HIGH-RISE WALL STRUCTURE. 8, 1995. [12](#)
- [14] Césaire M. Hema, Geoffrey Van Moeseke, Arnaud Evrad, Luc Courard, and Adamah Messan. Vernacular housing practices in Burkina Faso : representative models of construction in Ouaga-

- dougou and walls hygrothermal efficiency. Energy Procedia, 122 :535–540, September 2017. [12](#)
- [15] David Allinson and Matthew Hall. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. Energy and Buildings, 42(6) :845–852, 2010. [12](#)
- [16] A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, and J.D. Hardy. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. Environmental Research, 1(1) :1–20, June 1967. [13](#), [14](#)
- [17] Refrigerating and Air-Conditioning Engineers American Society of Heating. 2009 Ashrae Handbook : fundamentals. ASHRAE, Atlanta, GA., 2009. OCLC : 406124445. [13](#), [32](#), [41](#)
- [18] A. Pharo Gagge. Chapter 5 Rational Temperature Indices of Thermal Comfort. In Studies in Environmental Science, volume 10, pages 79–98. Elsevier, 1981. [14](#)
- [19] P.O. Fanger, B.M. Ipsen, G. Langkilde, B.W. Olesen, N.K. Christensen, and S. Tanabe. Comfort limits for asymmetric thermal radiation. Energy and Buildings, 8(3) :225–236, August 1985. [14](#)
- [20] Lucile Soudani, Antonin Fabbri, Jean-Claude Morel, Monika Woloszyn, Pierre-Antoine Chabriac, Henry Wong, and Anne-Cécile Grillet. Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials. Energy and Buildings, 116 :498–511, 2016. [18](#)
- [21] Seick Omar Sore. Synthèse et caractérisation des liants géopolymères à base des matériaux locaux du Burkina Faso en vue d'une stabilisation.pdf. PhD thesis, 2017. [22](#), [25](#)
- [22] DE HERDE André, EVRARD Arnaud, ROUCHE Sylvie, BIOT Benjamin, KEUTGEN Gauthier, COURARD Luc, LOUIS Arnaud, and BONNERT Antoine. La paille - parois performantes. 281, 2011. [22](#), [27](#)
- [23] Pape Moussa Touré, Vincent Sambou, Mactar Faye, Ababacar Thiam, Mamadou Adj, and Dorothé Azilinson. Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). Journal of Building Engineering, 13 :266–271, September 2017. [26](#), [36](#), [40](#)
- [24] H. Cagnon, J.E. Aubert, M. Coutand, and C. Magniont. Hygrothermal properties of earth bricks. Energy and Buildings, 80 :208–217, September 2014. [27](#), [40](#)
- [25] H.M. Künzle, A. Holm, D. Zirkelbach, and A.N. Karagiozis. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. Solar Energy, 78(4) :554–561, April 2005. [28](#)
- [26] Nance C Lovvorn, Thomas E Watson, Charles G Arnold, Van D Baxter, Dean S Borges, Paul W Cabot, Waller S Clements, Charles W Coward, Harold L Crowder, Brian P Dougherty, Richard A Evans, Arthur D Hallstrom, Richard D Hermans, John F Hogan, Frederick H Kohloss, William J Landman, Rodney H Lewis, Ross D Montgomery, Davor Novosel, Dennis A Stanke, Michael Tavares, Steven T Taylor, J Richard Wright, Lee W Burgett, Gordon V R Holness, and Claire B Ramspeck. ASHRAE STANDARDS COMMITTEE 2001-2002. page 170. [32](#), [33](#), [41](#)

ANNEXES

Annexe 1 : Densité apparente des BTC

Formulations	M_{sat} (kg)	$M_{sat.air}$ (kg)	$M_{sat.eau}$ (kg)	Densité apparente (kg/m^3)	Écart-type
4% de ciment	1,387	1,572	0,848	1915,75	1,866
	1,586	1,798	0,969	1913,15	
	1,589	1,801	0,972	1916,77	
6% de ciment	0,829	0,967	0,466	1653,70	1,433
	0,957	1,116	0,538	1654,28	
	0,943	1,099	0,529	1656,42	
8% de ciment	7,744	8,707	4,763	1963,49	0,331
	7,396	8,315	4,547	1962,85	
	3,930	4,418	2,416	1963,04	

Annexe 2 : Porosité des BTC

Formulations	Densité sèche (kg/m^3)	Densité apparente (kg/m^3)	Porosité (%)
0% de ciment	2938,98	1835,10	37,56
4% de ciment	2692,17	1915,22	28,86
6% de ciment	2692,30	1654,80	38,54
8% de ciment	2692,10	1963,12,	27,08

Annexe 3 : Absorption capillaire des BTC

Formulations	Surface de contact (m ²)	Masse sèche (kg)	Masse humide (kg)	Absorption capillaire	Écart-type
4% de ciment	0,039	0,305	0,348	0,116	0,006
	0,041	0,368	0,414	0,114	
	0,039	0,282	0,322	0,105	
6% de ciment	0,032	0,240	0,277	0,123	0,01
	0,049	0,406	0,463	0,124	
	0,048	0,471	0,517	0,100	
8% de ciment	0,030	0,232	0,259	0,098	0,01
	0,027	0,268	0,299	0,116	
	0,030	0,233	0,262	0,099	

Annexe 4 : Absorption totale des BTC

Formulations	Masse sèche (kg)	Masse saturée (kg)	Teneur en eau (%)	Écart-type
4% de ciment	1,387	1,572	13,34	0,016
	1,586	1,798	13,37	
	1,589	1,801	0,972	
6% de ciment	0,829	0,967	16,65	0,053
	0,957	1,116	16,61	
	0,943	1,099	16,54	
8% de ciment	7,744	8,707	12,44	0,009
	7,396	8,315	12,43	
	3,93	4,418	12,42	

Annexe 5 : Propriétés thermiques des BTC

Formulations	Capacité calorifique (J/m ³ /K)	Conductivité thermique (W/m/K)	Écart-type
0% de ciment	2147000	0,641	0,045
	2094000	0,675	
	2000000	0,647	
4% de ciment	1979388,50	0,750	0,054
	2159416	0,686	
	2138485,75	0,697	
6% de ciment	1874364,25	0,770	0,051
	2068312,25	0,701	
	1829761,50	0,789	
8% de ciment	1890267,25	1,037	0,052
	1872494,25	1,049	
	2043582,75	0,961	

Annexe 6 : Perméabilité à la vapeur d'eau

Formulations	Masse de départ (kg)	Masse de fin (kg)	penne	perméabilité à la vapeur	Écart-type
0% de ciment	1,02276	1,02345	3,9559.10 ⁻⁹	3,3571.10 ⁻¹¹	
	0,89805	0,89875	3,9607.10 ⁻⁹	3,3612.10 ⁻¹¹	7,76.10 ⁻¹⁴
	0,89477	0,89546	3,9736.10 ⁻⁹	3,3721.10 ⁻¹¹	
4% de ciment	1,02385	1,02446	3,5332.10 ⁻⁹	2,9985.10 ⁻¹¹	
	0,89586	0,89647	3,5669.10 ⁻⁹	3,0271.10 ⁻¹¹	3,9411.10 ⁻¹³
	0,89805	0,89865	3,4751.10 ⁻⁹	2,9492.10 ⁻¹¹	
6% de ciment	1,02385	1,0246	4,2293.10 ⁻⁹	3,5893.10 ⁻¹¹	
	0,89586	0,89656	4,1173.10 ⁻⁹	3,4941.10 ⁻¹¹	4,9720.10 ⁻¹³
	0,89805	0,89878	4,2029.10 ⁻⁹	3,5668.10 ⁻¹¹	
8% de ciment	1,02296	1,02348	2,9833.10 ⁻⁹	2,5318.10 ⁻¹¹	
	0,89654	0,89706	2,9892.10 ⁻⁹	2,5318.10 ⁻¹¹	1,2353.10 ⁻¹³
	0,89704	0,89756	3,0109.10 ⁻⁹	2,5552.10 ⁻¹¹	

Annexe 7 : Courbes de sorption des BTC

