Optimisation des propriétés thermiques des parois dans les habitations en briques de terre comprimée au Burkina Faso

Makiètyn Césaire Hema

Thèse déposée en vue de l'obtention du titre de
docteur en art de bâtir et urbanisme
&
docteur en science et technologie de l'eau, de l'énergie et de l'environnement,
spécialité : matériaux

Novembre 2020

Architecture et Climat
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI)
Université catholique de Louvain
Louvain-la-Neuve
Belgique

Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD)
Institut 2iE
Ouagadougou
Burkina Faso

Jury de thèse :

prof. Denis Zastavni (Président)	LOCI/UCL, Belgique
prof. Luc Courard	UEE-GeMME/ULiège, Belgique
prof. Quentin Wilbaux	LOCI/UCL, Belgique
dr. Arnaud Evrard	Lehm Ton Erde GmbH, Autriche
prof. Abdou Lawane	LEMHaD/2iE, Burkina Faso
prof. Adamah Messan (Promoteur)	LEMHaD/2iE, Burkina Faso
prof. Geoffrey van Moeseke (Promoteur)	LOCI/UCL, Belgique

Optimisation des propriétés thermiques des parois dans les habitations en briques de terre comprimée au Burkina Faso

par Makiètyn Césaire Hema

© Makiètyn Césaire Hema, 2020

Architecture et Climat
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI)
Université catholique de Louvain
Place du Levant, 1
1348 Louvain-la-Neuve
Belgium

Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD)
Institut 2iE
Rue de la science 01 BP 594
Ouagadougou
Burkina Faso

Résumé

L'architecture en Afrique subsaharienne, et particulièrement au Burkina Faso, est à la croisée des chemins entre pratiques traditionnelles et contemporaines. Les choix architecturaux relèvent davantage de considérations sociales et culturelles que d'une nécessité environnementale et thermique. La terre crue, longtemps délaissée au profit de matériaux plus récents, offre l'opportunité aujourd'hui d'asseoir un modèle de construction des habitats résolument humain, économique, durable et environnemental.

Malgré les progrès réalisés dans les techniques de mise en œuvre de la terre crue, les failles qui subsistent, notamment celles relatives à l'optimisation des propriétés de la brique de terre comprimée en vue du confort thermique, doivent être étudiées. La démarche bioclimatique de construction dans les climats chauds présente la conception de la paroi extérieure comme un moyen d'améliorer les conditions climatiques intérieures. Cependant, les résultats d'amélioration du confort thermique dont fait état la littérature scientifique révèlent une variabilité des propriétés du matériau. Pourtant, un ajustement approprié de la conductivité thermique, de la densité apparente, de la chaleur spécifique et de l'épaisseur des parois permet de tirer le meilleur parti de ce matériau. Cette thèse y est consacrée.

Dans une première approche, une étude par simulation thermique dynamique est menée. Un logement typique des zones urbaines est modélisé. L'étude paramétrique menée sur les propriétés thermiques de la paroi extérieure permet d'évaluer leur impact sur le confort thermique. Les potentiels de la terre crue, à savoir l'hygroscopie et la masse thermique, sont explorés en lien avec l'interaction entre les occupants et le bâtiment. Des outils graphiques de conception de la paroi extérieure des habitats en terre crue en vue du confort thermique sont réalisés. Dans une seconde approche, une étude expérimentale mettant en œuvre les systèmes de parois les plus intéressants est réalisée. L'objectif est de consolider les résultats issus des simulations thermiques dynamiques. Le monitoring d'un bâtiment pilote en terre crue est réalisé afin d'étudier les performances thermiques des parois. Finalement, ce travail donne les indications pour la conception et l'optimisation thermique des parois en terre crue en lien avec les habitations au Burkina Faso.

Mots clés : brique de terre comprimée, conception de paroi, confort thermique, épaisseur cyclique, simulation thermique, terre crue.

Abstract

Architecture in Africa, and particularly in Burkina Faso, is at the crossroads between the traditional and contemporary practices. The architectural choices are more regarding social and cultural considerations than environmental and thermal necessity. Earth-based building material, long neglected in favour of modern materials, offers today the opportunity to construct economic, sustainable and environmental buildings.

Despite the advances in the techniques of earth-based construction, flaws related to the optimization of the properties of compressed earth blocks for thermal comfort still exist, and should be addressed. The bioclimatic approach to building in hot climates presents the exterior wall as a means of improving indoor climatic conditions. However, the results of improvement in thermal comfort reported in the scientific literature reveal variability in the properties of the material. An appropriate adjustment of the thermal conductivity, apparent density, specific heat and thickness of the walls allows the best use of this material. Therefore, it was the subject of this thesis.

In a first approach, a study by dynamic thermal simulation was carried out. A typical housing in urban areas was modelled. The parametric study was carried out on the thermal properties of the external wall and made it possible to assess the impact on thermal comfort. The potential of earth, namely hygroscopy and thermal mass, were explored in relation to the interaction between the occupants and the building. Graphic tools for designing exterior earth-based wall systems for the thermal comfort of habitats were produced. In a second approach, an experimental study was implemented of the most interesting wall systems. It aimed to consolidate the results of dynamic thermal simulations. The monitoring of earth-based pilot building was carried out in order to study the thermal performance of the walls.

This work gives indications for the design and thermal optimization of earth-based walls related to the housing in Burkina Faso.

Keywords : compressed earth blocks, cyclic thickness, earthen material, thermal comfort, thermal simulation, wall design.

Remerciements

Cette thèse, bien que signée de mon seul nom, n'en est pas moins le fruit des interactions professionnelles et sociales que j'ai eu durant ces quatre années. Chacune de ces personnes, à sa manière, a contribué à l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont tout d'abord à mes directeurs de thèse, Messieurs Adamah Messan et Geoffrey van Moeseke. Le premier pour la confiance qu'il m'a accordée dès le début de ce parcours ainsi que pour sa sociabilité. Il a toujours su trouver des solutions pragmatiques et adaptées aux imprévus dont mon parcours fut jonché. Le deuxième pour avoir su m'accorder l'autonomie dont j'avais besoin pour avancer et découvrir le monde de la recherche. L'intérêt qu'il trouvait toujours aux différentes pistes de recherche que j'ai explorées fut d'un grand soutien moral.

Merci à Abdou Lawane pour le temps qu'il a su consacrer à l'encadrement de cette thèse.

Je remercie Luc Courard, membre de mon comité de thèse, pour les conseils et avis qui ont contribué à la qualité de cette recherche. Je retiens particulièrement sa convivialité et sa bienveillance.

J'ai apprécié l'engouement qu'a eu Arnaud Evrard pour ce projet de recherche. Sa passion pour la terre crue ainsi que sa curiosité scientifique lors de son séjour à Ouagadougou ont contribué à conforter l'intérêt que j'ai porté à ce matériau.

J'adresse mes remerciements à Denis Zastavni et Quentin Wilbaux d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Ma profonde et infinie gratitude va à mon épouse Laetitia Hema pour avoir fait siennes mes contraintes lors de ce parcours. Merci pour les sacrifices durant ces quatre années. Le meilleur est à venir.

Un grand merci aux collègues de l'Institut 2iE que sont Ousmane, Arnaud, Roland, Marie-Thérèse, Christian, Salif, Soré, Decroly, pour les interactions que nous avons eues. Je remercie particulièrement Philbert pour son enthousiasme à toutes épreuves et Serge pour les excellents cafés sans lesquels cette thèse n'aurait pas eu la même saveur.

Mes remerciements aux collègues de l'UCLouvain, particulièrement à Martin, Gilles, Denis, Clotilde, Salomée, Gabrielle pour l'accueil et la convivialité. Je remercie spécialement Coralie avec qui j'ai eu des échanges au-delà du politiquement correct.

Merci à mes deux entités de recherche que sont LEMHaD et Architecture et Climat pour l'accueil.

L'engouement et la curiosité scientifique des stagiaires avec qui j'ai travaillé ont contribué à améliorer ma recherche. Je remercie Franck, Stéphane, Doma, Camie pour la collaboration.

Un dernier merci, mais pas de moindre, à ma famille. Votre soutien a été ce ciment qui a scellé mon humanité d'homme et de scientifique. Vous êtes aussi l'architecte de ce que je suis aujourd'hui.

Table des matières

Résumé **i**

Abstract **iii**

Remerciements **v**

Table des matières **vii**

Liste des illustrations **xi**

Liste des tableaux **xv**

Préambule **xvii**

Introduction **1**

1 Les pistes de développement d'une construction soutenable au Burkina Faso **5**

1.1 Enjeux du secteur de la construction 6
1.1.1 Climat et environnement 6
1.1.2 Aspects sociodémographiques 8
1.1.3 Stress thermique 9
1.2 Contexte de la construction et savoir-faire locaux 11
1.2.1 Mutations et aspirations sociales 11
1.2.2 Culture constructive en zone urbaine 15
1.3 Néo-construction soutenable en terre crue 22
1.3.1 Matière à construire 22
1.3.2 Économie et environnement 24
1.3.3 Interprétation contemporaine 25
1.3.4 Initiatives locales de valorisation et de revalorisation . 25
1.4 Principes passifs de conception de l'habitat 30
1.4.1 Stratégies passives de conception 30

1.4.2 Contribution des parois extérieures à l'amélioration du confort thermique 39
1.5 Limites et perspectives de recherche 41
1.6 Conclusion 47

2 Retour sur la question de recherche 49
2.1 Question de recherche 50
2.2 Objectifs et méthodologie 51
2.3 Structure méthodologique 54

3 Modélisation thermique d'un bâtiment type, de la paroi et du confort 55
3.1 Conception d'un modèle thermique pour l'habitat 56
3.1.1 Habitat type et campagne de mesures expérimentales . 56
3.1.2 Méthodes et critères de calibration 58
3.1.3 Outil de modélisation et réglages du modèle thermique 60
3.1.4 Résultats de calibration du modèle 61
3.2 Modélisation du comportement thermique de la paroi 64
3.2.1 Modélisation du matériau terre 64
3.2.2 Transfert de chaleur : conduction 65
3.2.3 Transfert de chaleur : chaleur latente 67
3.2.4 Essai de caractérisation thermique 72
3.3 Modèles et indicateurs de sensation thermique 77
3.3.1 Notion de confort thermique 77
3.3.2 Limites et by-pass entre approches de confort 82
3.3.3 Indices à long terme d'évaluation du confort 84
3.3.4 Évaluation du confort thermique : cas de Ouagadougou 85
3.4 Conclusion 88

4 Conception et optimisation des parois en BTC pour le confort thermique 89
4.1 Méthodologie et plan de simulation 90
4.1.1 Conception thermique des parois 90
4.1.2 Indice de l'ambiance thermique 93
4.1.3 Interaction entre occupants et bâtiment 93
4.2 Résultats 95
4.2.1 Réponse thermique globale de l'habitat 95
4.2.2 Influence de l'occupation 99
4.2.3 Conception thermique de la paroi 105
4.3 Discussion et Conclusion 107

5 Étude expérimentale de la performance thermique des parois en BTC 111
5.1 Méthodologie expérimentale 112
5.1.1 Description du bâtiment expérimental 112
5.1.2 Systèmes de parois étudiées 113
5.1.3 Scénarios de ventilation 115
5.1.4 Paramètres d'évaluation de la performance thermique des parois 116
5.2 Résultats 118
5.2.1 Déphasage thermique 118
5.2.2 Amortissement thermique 118
5.2.3 Surchauffe 120
5.3 Discussion et conclusion 126

Conclusion 129

Annexe A : État de l'art des propriétés thermiques du matériau terre crue 135

Annexe B : Évaluation du confort thermique suivant l'approche adaptative et PMV 139

Annexe C : Réduction du risque de surchauffe dans les maisons à ventilation naturelle grâce à la conception de murs en BTC en climat chaud et sec 143

Annexe D : Étude expérimentale sur l'amélioration du confort thermique en région chaude grâce à la conception de murs en BTC 171

Bibliographie 201

Liste des illustrations

1 Positionnement de la recherche 3

1.1 Contribution des matériaux (a) à la demande d'énergie primaire et (b) aux émissions de CO_2 pour la construction de 1 m^2 de surface au sol, (Zabalza Bribián *et al.*, 2011) 7

1.2 Extension géographique de la ville de Ouagadougou de 1983 à 2018, (recoupement INSD [1]et Fournet et Aude 2013) 9

1.3 Technique de mise en œuvre traditionnelle de la terre crue au Burkina : (a) bauge et (b) adobe, (Kéré, 1995; Deramaux, 2017) 12

1.4 Photographie aérienne de la ville de Ouagadougou en (a) 1931 (Folkers et van Buiten, 2019) et (b) en 2007 [2] 13

1.5 Stratification de la ville de Ouagadougou en 2006, (source Vallée *et al.* 2006) 15

1.6 Mise en œuvre de l'adobe pour la construction d'un habitat . . 16

1.7 Pourcentage des constructions en adobes au Burkina Faso et dans la sous région, (ANSD-Sénégal, 2014; Vinima et Tiéblé, 2012; INS-Niger, 2012; INSD-Bukina, 2019). 17

1.8 Maison moderne en parpaings de ciment 18

1.9 Mise en œuvre de la BLT pour la construction d'un bâtiment . 19

1.10 Mise en œuvre de la BTC pour la construction d'un bâtiment . 20

1.11 Pourcentage des potentielles constructions en BTC au Burkina Faso et dans la sous-région, (ANSD-Sénégal, 2014; Vinima et Tiéblé, 2012; INS-Niger, 2012; INSD-Bukina, 2019) 21

1.12 Intervalles recommandés de (a) granulométrie et (b) d'indice de plasticité des techniques de construction en terre crue. [1] : AFNOR XP P13-901 ; [2] : MOPT,1992 ; [3] : Houben H, Guillaud H, 1994 cités par Delgado et Guerrero 2007 23

1.13 Comparaison des coûts de construction suivant la nature de l'enveloppe extérieure, (Adegun et Adedeji, 2017) 24

1.14 Chapelle de la réconciliation (Dobson, 2015) 25

1.15 Architecture en brique de terre crue par Francis Kéré (a) clinique chirurgicale, Léo-Burkina Faso, (b) Centre de l'architecture en terre, Mopti-Mali [3] 26
1.16 Construction ADAUA : institut panafricain de développement, (Deramaux, 2017) 27
1.17 Construction AVN : (a) réalisation d'un bâtiment et (b) coût de construction du gros œuvre d'un bâtiment de 25 m^2 en milieu rural, (AVN, 2015) 27
1.18 Pathologies sur une façade d'un habitat AVN 28
1.19 Diagramme psychométrique de Givoni, (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015) 31
1.20 Techniques de protection solaire des fenêtres grâce (a) à la végétation et (b) à un écran de protection (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015) 33
1.21 Protection solaire locale des façades d'un bâtiment 35
1.22 Distribution des températures à l'intérieur du comble d'un habitat en climat chaud et humide. Modèle (a) sans ventilation et (b) avec ventilation (Latif *et al.*, 2019) 36
1.24 Climat type (TMY2) de la ville de Ouagadougou : (a) évolution de la moyenne mensuelle de température sèche et de l'amplitude thermique, (b) radiation solaire incidente Nord et Sud et (c) radiation solaire incidente Est et Ouest 43
1.25 Évolution de la conductivité thermique de la brique de terre crue en fonction de la densité apparente, (Mansour *et al.*, 2016) 44
1.26 Influence du ratio de saturation sur le la conductivité thermique de la terre crue : (a) illustration, (b) relation linéaire, (Hall et Allinson, 2009b) 44
1.27 Effet de l'épaisseur de la paroi en terre sur le confort thermique, (données Dong *et al.* 2014a) 46
1.28 Variation de la capacité thermique en fonction de l'épaisseur, (Sambou, 2008) 46

2.1 Cadre logique de la recherche 53

3.1 Bâtiment expérimental : (a) façade principale, (b) coupe en élévation partielle et (c) vue en plan 57
3.2 Régression entre valeurs mesurées et valeurs prédites (a) température de l'air du séjour, (b) température de surface de la paroi sud, (d) température de l'air de la chambre et (d) humidité relative du séjour 63
3.3 Représentation des mécanismes de transfert de masse et de chaleur à travers les matériaux poreux(Hall et Allinson, 2009a) 64

3.4 Schéma d'une paroi mono couche : (a) contraintes extérieures, (b) bilan de chaleur dans une tranche intérieure 66
3.5 Représentation schématique du phénomène d'adsorption, (Chamoin, 2013) 68
3.6 Chaleur latente d'évapo-condensation de l'eau en fonction de la température (a) et de l'humidité relative (b), (Soudani *et al.*, 2016) 69
3.7 Impact de la perméabilité à la vapeur d'eau sur le climat intérieur : (a) humidité relative, (b) température de l'air, (Allinson et Hall, 2010) 69
3.8 Impact des modèles de simulation sur l'évolution de l'humidité relative, (Janssens et De Paepe, 2005) 70
3.9 Température et de l'humidité relative adoptées pour l'évaluation de l'impact de la chaleur latente de la BTC (a) climat extérieur, (b) climat intérieur 71
3.10 Évolution des flux de chaleur et des températures de la surface intérieure d'une paroi BTC en fonction du modèle de simulation 71
3.11 Évolution des écarts-types des moyennes, premiers et troisièmes quartiles de températures opératives du séjour en fonction de ξ 75
3.12 Neutralité thermique en fonction du mode de conditionnement du bâtiment, (Nicol et Humphreys, 2002) 78
3.13 Seuil d'inconfort à la chaleur et au froid en fonction du temps, (Mayer, 1993) 78
3.14 Évolution de l'indice PMV en fonction de l'indice PPD 80
3.15 Limites d'acceptabilité des températures opératives du modèle adaptatif selon la norme ASHRAE 82
3.16 Évaluation de l'ambiance thermique de l'habitat type suivant l'approche (a) PMV et (b) adaptative 86

4.1 Évolution de *WEH* de l'habitat mono couche en fonction de (a) l'indice de masse, (b) l'indice de conductivité thermique et (c) l'épaisseur 96
4.2 Évolution de *WEH* de l'habitat double couche en fonction de (a) l'indice de masse, (b) l'indice de conductivité thermique et (c) l'épaisseur 98
4.3 Évolution de *WEH* de l'habitat mono couche, profil d'occupation de jour en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi . . . 100
4.4 Évolution de *WEH* de l'habitat mono couche, profil d'occupation de nuit en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi . . . 101

4.5 Évolution de *WEH* de l'habitat double couche, profil d'occupation de jour en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi 102
4.6 Évolution de *WEH* de l'habitat double couche, profil d'occupation de nuit en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi 103
4.7 Impact de la stratégie de ventilation sur ξ_{opt} : (a) profil d'occupation de jour de l'habitat mono-couche, (b) profil d'occupation de nuit de l'habitat mono-couche, (c) profil d'occupation de jour de l'habitat double-couche et (d) profil d'occupation de nuit de l'habitat double-couche 104
4.8 Propriétés thermiques appropriées de la BTC en vue d'améliorer le confort thermique pour les profils d'occupation (a) de jour et (b) de nuit 106
4.9 Conception thermique de la paroi, $\lambda(\rho)$ Mansour *et al.* 2016, pour l'habitat (a) simple couche et profil d'occupation de jour, (b) simple couche et profil d'occupation de nuit, (c) double couche avec profil d'occupation de jour et (d) double couche avec profil d'occupation de nuit 108
4.10 Conception thermique de la paroi, $\lambda(\rho)$ Nshimiyimana 2020, pour l'habitat (a) simple couche et profil d'occupation de jour, (b) simple couche et profil d'occupation de nuit, (c) double couche avec profil d'occupation de jour et (d) double couche avec profil d'occupation de nuit 109

5.1 Plans du bâtiment expérimental et positions des capteurs de températures (a) vue en plan, (b) vue en élévation 113
5.2 Illustration des systèmes de parois étudiés et du bâtiment pilote 114
5.3 Évolution des températures de surface de la paroi Sud (a) BTC_{in}, (b) BTC_{ext} et (c) BTC 119
5.4 Amortissement thermique d_f des différents systèmes de parois 120
5.5 Amortissement thermique $d_{f,env}$ pour les scénarios de ventilation (a) SAC0 (b) SAC1 et (c) SAC2 121
5.6 Surchauffe thermique du bâtiment BTC_{in} en fonction des scénarios de ventilation : (a) SAC0, (b) SAC1 et (c) SAC2 122
5.7 Surchauffe thermique du bâtiment en fonction des systèmes de parois : (a) BTC_{in}, (b) BTC_{ext} et (c) BTC 124
5.8 Distribution de la surchauffe en fonction des scénarios de ventilation (a) SAC0, (b) SAC1 et (c) SAC2 125

Liste des tableaux

3.1 Propriétés thermiques optimisées pour la modélisation de l'enveloppe de l'habitat 61
3.2 Évaluation des critères de calibration du modèle thermique . . 62
3.3 Températures intérieures en fonction du modèle thermique de simulation, (Janssens et De Paepe, 2005) 70
3.4 Propriétés thermiques des échantillons ξ du test-t de Welch . . 74
3.5 Résultats du test-t de Welch : *WEH* 76
3.6 Résultats du test-t de Welch : *WEH* (suite) 76
3.7 État de l'art des régressions du modèle adaptatif 81

4.1 État de l'art des valeurs de ξ de la BTC 92
4.2 Modélisation thermique des parois étudiées 92
4.3 Profil d'occupation des espaces 94
4.4 Scénarios de renouvellement de l'air 95
4.5 Récapitulatif des valeurs optimales de ξ 105

5.1 Propriétés thermiques des matériaux composant la paroi du bâtiment expérimental, (Sore *et al.*, 2018; Moussa *et al.*, 2019; Denouwe *et al.*, 2015) 115
5.2 Périodes d'application des scénarios de ventilation 115
5.3 Propriétés thermiques 136

Préambule

Cette thèse de doctorat s'intègre dans le cadre d'un projet de recherche et de développement intitulé *Amélioration de la qualité de l'habitat en briques de terre crue au Burkina Faso*. Trois thèses de doctorat sont menées afin d'étudier les aspects constructifs, socio-économiques et matériaux/produits des habitats en terre crue. Les recherches ont été réalisées au sein de l'institut 2iE, de l'Université catholique de Louvain (UCLouvain) et de l'Université de Liège (ULiège). Ce projet a été financé par l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) de la Fédération Wallonie-Bruxelles - Commission de la Coopération au Développement.

Ce travail de recherche, qui porte sur l'aspect constructif, a été réalisé au sein du Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) de l'Institut 2iE au Burkina Faso et de la Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale et d'urbanisme (LOCI) - Architecture et climat de l'UCLouvain en Belgique.

Les résultats issus de la présente thèse de doctorat ont été valorisés par quatre articles scientifiques dont deux sont déjà publiés à ce jour (Hema *et al.*, 2020, 2017).

Introduction

Les enjeux environnementaux et économiques actuels imposent de redéfinir notre rapport à la consommation d'énergie et de repenser nos sociétés. À cet effet, en ce qui concerne spécifiquement le secteur de la construction, nombreux sont ceux qui plaident pour une architecture plus responsable. La construction doit être pensée pour éviter la déplétion des ressources, l'inadéquation économique, la pollution environnementale, mais aussi pour limiter la consommation d'énergie (José Vinagre Díaz *et al.*, 2013; Coch, 1998; Zabalza Bribián *et al.*, 2011).

C'est ainsi que dans la quête du confort thermique des bâtiments, l'approche bioclimatique favorise les solutions architecturales au détriment de recours à des systèmes de chauffage ou de refroidissement. L'approche bioclimatique s'intègre dans une démarche de maitrise de l'énergie et, *in fine*, de protection de l'environnement. Son application est encore plus pertinente dans les pays en développement où la précarité énergétique ne laisse que peu d'options.

Cependant en Afrique subsaharienne en général, et au Burkina Faso en particulier, le contexte socio-économique et les limites technologiques imposent les priorités en matière de construction. La quête d'un habitat décent, à longue durée de vie, qui ne nécessite que peu d'entretiens et qui se démarque esthétiquement, relègue au second plan les principes de conception concourants à une économie d'énergie et à un confort thermique. C'est ainsi que, malgré leur faible performance thermique, les toitures des bâtiments en zones urbaines sont à 94% composées de tôles métalliques tandis que les murs sont à 65% réalisés en blocs de ciment (INSD-Bukina, 2017). Pourtant, la problématique du confort thermique des habitats est un enjeu sanitaire. En outre, le réchauffement climatique qui touche plus rudement l'Afrique impose, aujourd'hui, d'intégrer à la conception des bâtiments des critères qualitatifs liés à l'ambiance thermique intérieure (Butera, 2010). Les principes passifs de conception, souvent inspirés de pratiques traditionnelles et vernaculaires, remettent au goût du jour des matériaux tels que la terre crue.

Longtemps délaissée au profit de matériaux plus contemporains, la terre crue est de nos jours actualisée pour répondre aux exigences environnementales, économiques et esthétiques. Les progrès réalisés, depuis maintenant plusieurs décennies, dans les processus de production et dans l'amélioration des performances thermiques et mécaniques ont permis de reconsidérer la pertinence de ce matériau. Un des aboutissements technologiques est la brique de terre comprimée (BTC), introduite au Burkina Faso dans les années 80. L'approche bioclimatique de conception des bâtiments dans les climats chauds offre l'aubaine du développement de constructions en BTC. En effet, les propriétés thermiques de la paroi BTC permettent de mitiger la contrainte qu'impose le climat sur l'environnement intérieur.

La conception des parois des habitats dans les climats chauds à forte variation de température (entre le jour et la nuit) doit assurer une fonction de régulation thermique. La densité, la chaleur spécifique ainsi que l'épaisseur des parois sont les propriétés thermiques sur lesquelles agir pour ajuster la capacité de stockage de la chaleur. La conductivité thermique ainsi que l'épaisseur de la paroi définissent l'habilité de la paroi à résister aux transferts de chaleur par conduction. L'hygroscopie de la BTC résulte en des échanges de chaleur latente entre la paroi et les environnements adjacents à celle-ci. En sus, l'interaction entre l'occupant et l'habitat doit être prise en compte. La problématique de la conception thermique de la paroi extérieure en BTC est complexe et nécessite une solution plus approfondie que la simple prescription de la forte inertie thermique.

Le cas spécifique du Burkina Faso est d'un intérêt particulier. Tout d'abord, en raison d'une histoire particulière avec la terre crue (projets ADAUA, LOCOMAT, le sobriquet de "Bancoville" donné à sa capitale, etc. (Wyss, 2005)). Ensuite, en raison d'un mode de construction urbain non adapté au climat chaud rendant, de ce fait, le climat intérieur des habitats inconfortable. La figure 1 résume le processus ayant abouti à la question de recherche qui est donc :

«**Quelles conceptions thermiques des parois en briques de terre comprimée pour l'amélioration du climat intérieur des habitats en climat chaud, spécifiquement à Ouagadougou ?**»

En préambule à la définition des objectifs spécifiques, de la méthodologie et des résultats attendus qui découlent de la question de recherche, il paraissait opportun de détailler davantage le contexte social, culturel, historique, etc. C'est ainsi que le chapitre 1 est consacré à l'état de l'art des modes de construc-

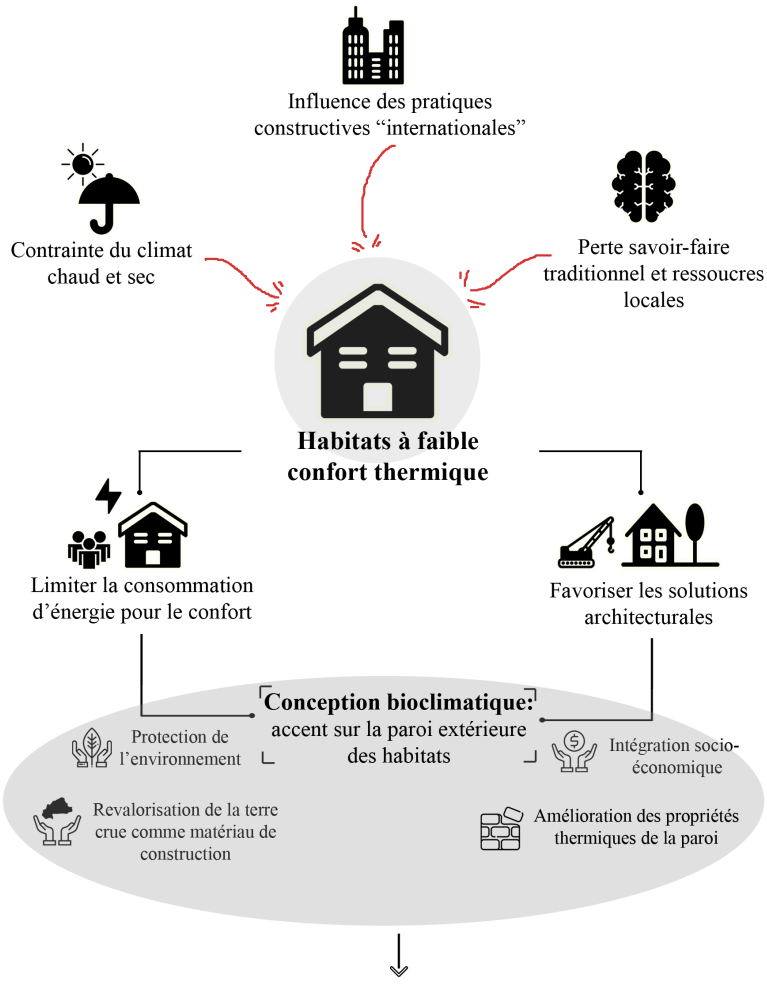


FIGURE 1: Positionnement de la recherche

tions en Afrique de l'Ouest en général et au Burkina Faso en particulier. Ce tour d'horizon permet d'établir le matériau terre crue, spécifiquement la BTC, comme pierre angulaire pour l'édification et l'émergence des villes durables en Afrique.

Le chapitre 2 fait un retour sur la question de recherche. L'état de l'art réalisé précédemment permet de situer avec plus de pertinence le contexte scientifique de la recherche menée. Ainsi, les objectifs spécifiques, la méthodologie et les résultats attendus y sont définis.

Le chapitre 3 porte sur la calibration d'un modèle thermique de simulation et la définition des indicateurs nécessaires à la conception de la paroi. L'état de l'art et les relevés de terrains (cf. chapitre 1) ont permit de déterminer un habitat type des zones urbaines. Ce dernier a fait l'objet de mesures en vue de la calibration d'un modèle de simulation. Un indicateur de la sensation thermique des habitants ainsi qu'un indicateur du comportement thermique de la paroi sont définis.

En lien avec l'amélioration du climat intérieur des habitations, le chapitre 4 présente l'étude par simulations thermiques portant sur la conception des parois. Les réponses thermiques de l'habitat et des parois sont analysées au travers des indicateurs définis au chapitre 3. Les résultats indiquent les propriétés thermiques de la paroi en terre qu'il conviendrait d'obtenir afin d'améliorer l'ambiance thermique des habitats.

Une étude expérimentale est menée à la suite de l'étude par simulation thermique. Le chapitre 5 y est consacré. Il développe le plan expérimental adopté ainsi que les résultats obtenus. Ces résultats viennent en compléments de ceux obtenus par simulation thermique.

Enfin, la conclusion présente les implications des résultats de cette thèse sur le mode de construction au Burkina Faso. Les limites ainsi que les perspectives de la recherche y sont exposées.

Chapitre 1

Les pistes de développement d'une construction soutenable au Burkina Faso

L'importance socio-économique que revêtent les villes en Afrique, dans un contexte mondial de changement climatique, en fait le lieu de tous les espoirs. Longtemps préservées de l'influence du mode de construction occidentale, aujourd'hui les villes présentent un aspect tourné vers la modernité. Pourtant le développement des centres urbains autour de matériaux locaux et appropriés, tels que la terre crue, reste un enjeu économique et environnemental. Ce chapitre donne les pistes du développement d'une construction durable en terre crue. La première partie présente les enjeux du secteur de la construction. La deuxième décrit le contexte architectural et les savoir-faire en matière de construction au Burkina Faso. La troisième fait l'état de l'art de la construction contemporaine en terre crue. La quatrième présente les principes passifs de conception des habitats en lien avec les ressources et possibilités locales. La dernière partie présente les limites et les perspectives de recherche.

Sommaire

1.1 Enjeux du secteur de la construction 6
1.2 Contexte de la construction et savoir-faire locaux 11
1.3 Néo-construction soutenable en terre crue 22
1.4 Principes passifs de conception de l'habitat 30
1.5 Limites et perspectives de recherche 41
1.6 Conclusion 47

1.1 Enjeux du secteur de la construction

Pour de mieux cerner les enjeux liés au secteur de la construction, cette section est subdivisée en trois parties. La première est consacrée aux enjeux climatiques et environnementaux à l'échelle mondiale. La seconde se focalise sur l'aspect sociodémographique propre à l'Afrique de l'Ouest en général et au Burkina Faso en particulier. La troisième aborde la problématique du stress thermique lié aux bâtiments.

1.1.1 Climat et environnement

Il n'est pas concevable aujourd'hui de remettre en cause l'impact négatif de l'Homme sur la santé de la planète. Les niveaux d'émission de CO_2 n'ont jamais été aussi élevés que durant cette dernière décennie. Tous les signaux semblent être au rouge en ce qui concerne les seuils à ne pas atteindre pour éviter le réchauffement climatique. De 30.6 Gt en 2010 à 33 Gt en 2019 [1], la tendance des émissions de CO_2 n'est malheureusement pas à la baisse. Les causes humaines sont certes variées, mais en tête se trouve celle due à la combustion de fossiles pour la production d'énergie qui représente 87 % des émissions de CO_2 (Le Quéré *et al.*, 2012). Le secteur de la construction, quant à lui, contribue à hauteur de 30 % aux émissions de CO_2 à l'échelle mondiale et le poids du résidentiel est loin d'être négligeable (Yang *et al.*, 2014).

La croissance démographique, l'augmentation des exigences de confort ainsi que du temps passé à l'intérieur des bâtiments ont accru le poids du résidentiel dans la dépense énergétique des bâtiments à l'échelle mondiale. Le résidentiel compte pour 55 à 70 % de la consommation d'énergie des bâtiments dans les pays développés. Certes, le mode de consommation énergétique est fonction des conditions météorologiques, de la conception architecturale, des systèmes énergétiques et du niveau socioéconomique des occupants. Cependant, dans les pays du Nord, 56 % de l'énergie consommée dans le résidentiel est imputable au conditionnement de l'ambiance thermique (Pérez-Lombard *et al.*, 2008).

Mais au-delà de la consommation énergétique en phase opérationnelle, l'accent doit également porter sur la qualité environnementale des matériaux de construction. En effet, la fabrication, le transport et la mise en œuvre des matériaux tels que l'acier, le béton et le verre nécessitent la consommation d'une quantité importance d'énergie. Une sélection adaptée de matériaux et des technologies permettent de réduire de 9 à 46 % l'énergie totale utilisée durant la vie d'un bâtiment (Sartori et Hestnes, 2007). À titre indicatif, la figure 1.1 montre la contribution relative des matériaux standards à la consommation d'énergie primaire et d'émission de CO_2 par mètre carré en Espagne (Zabalza Bribián

1. https ://www.iea.org/topics/climate-change

et al., 2011). Cependant, le poids des pays en développement en général et de l'Afrique subsaharienne en particulier sur les émissions de CO_2 est faible.

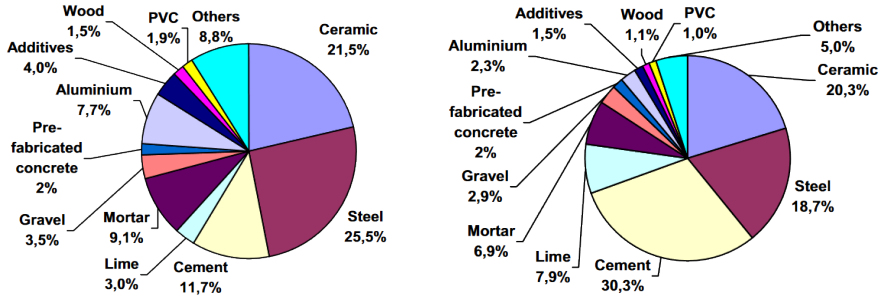


FIGURE 1.1: Contribution des matériaux (a) à la demande d'énergie primaire et (b) aux émissions de CO_2 pour la construction de 1 m^2 de surface au sol, (Zabalza Bribián *et al.*, 2011)

En effet, la consommation énergétique par habitant en Amérique du Nord est 10 fois plus élevée que celle du Nigeria et 18 fois plus élevée que celle de l'Éthiopie (González-Eguino, 2015). Tandis que les émissions de CO_2 sont évaluées à environ sept tonnes par habitant et par an en Union européenne, elles ne représentent que 0.06 t au Mali, 0.2 t au Burkina Faso et 0.6 t au Nigeria et en Côte d'Ivoire (Crippa *et al.*, 2019). Cependant, si les villes des pays en développement suivent le même chemin de développement et reproduisent le même mode de consommation énergétique que les pays du Nord, il n'y aura aucune issue pour éviter le réchauffement climatique et ses effets (Butera, 2010; Ouedraogo *et al.*, 2012). Pour toutes ces raisons, le secteur de la construction s'organise, tant dans les pays du Nord que dans ceux du Sud, pour limiter son impact négatif sur l'environnement.

Ainsi, la performance énergétique des bâtiments est au cœur des préoccupations. Les actions à mener en ce qui concerne le niveau d'isolation et de ventilation sont imposées aux États membres de l'Union européenne à travers des directives. L'objectif affiché est d'atteindre à partir de 2021 le standard "Nearly zero energy building" (Kampelis *et al.*, 2017; Directive UE, 2010). L'Afrique subsaharienne n'en est qu'à ses débuts en ce qui concerne la réflexion autour de la performance énergétique des bâtiments. Il n'existe pas de directives et standards en la matière. Cependant, les pays de l'Afrique de l'Ouest, à travers l'Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine (UEMOA), ont adopté une initiative pour la promotion des énergies renouvelables nommée "initiative régionale pour l'énergie durable (IRED)" (UEMOA, 2009). Une des composantes de cette initiative vise à proposer un code d'efficacité énergétique avec pour objectif la réduction de 20 % de la consommation énergétique des bâtiments.

Il existe une réelle nécessité d'actions responsables à prendre afin de réduire l'impact négatif du secteur de la construction. Habiter autrement est désormais un enjeu écologique : «*Construction activities not only consume energy, but also cause environmental pollution and emission of greenhouse gases, which lead to climate change. Therefore, it is urgent to review, as well as modify, current construction practices such as design and engineering methods, construction techniques and manufacturing technology to tame energy consumption.*» (Dixit *et al.*, 2010)

1.1.2 Aspects sociodémographiques

Du fait des faibles capacités énergétique et économique actuelles de la plupart des pays d'Afrique subsaharienne, les défis climatiques et environnementaux à relever trouvent leur sens dans la réflexion à mener sur la ville de demain, où les leçons tirées du mode de consommation occidentale doivent être mises à profit. Les pays d'Afrique subsaharienne sont confrontés à une crise du logement dont le déficit est estimé à 200 millions d'unités (Habitat, 2014). Les principales raisons de ce déficit sont la forte croissance démographique, l'urbanisation accélérée et une offre quasi inexistante en ce qui concerne les logements à bas coûts. Les enjeux socio-économique et démographique à relever par le continent africain offrent l'occasion de développer une architecture plus responsable.

En effet, l'Afrique est de moins en moins rurale : 14.5 % de la population vivait en ville au début des années cinquante contre 50.4 % en 2015 (OCDE/CSAO, 2020). La population urbaine a quasiment triplé en 20 ans au Burkina Faso (Ouattara et Somé, 2006; INSD-Bukina, 2017), doublé en 25 ans au Sénégal (ANSD-Sénégal, 2014) et a été multipliée par 5.3 en 40 ans en Côte d'Ivoire (Ibrahim, 2014). Le besoin en infrastructures et en logements dans les centres urbains est par conséquent important. À ce titre, les pouvoirs politiques se sont fixé des objectifs en ce qui concerne la production de logements. Des 6.000 logements sociaux par an au Burkina Faso aux 20.000 habitations pour la seule ville d'Abidjan en Côte d'Ivoire en passant par le programme "Une famille, un toit" au Sénégal, les actions se multiplient (Ba et Bertrand, 2012; Premier ministère du Burkina, 2016). Cependant, deux principales difficultés, illustrées à travers le cas du Burkina Faso, se posent quant à la résorption du déficit de logements.

La première difficulté concerne l'inadéquation économique et environnementale des matériaux de construction utilisés. Le modèle contemporain de constructions propulse des matériaux tels que le verre, l'acier et le ciment comme bases pour la réalisation d'infrastructures modernes. Or, en plus des conséquences sur l'environnement du recours à ces matériaux discuté précédemment à la section 1.1.1, ils rendent plus difficile l'accès aux logements

pour la majorité des populations locales du fait de leur coût (Wyss, 2005).

La seconde difficulté concerne le manque ou la non-application des schémas directeurs d'aménagement des villes. Les actions visant à assurer une planification et un aménagement durable passent par la maitrise de l'espace urbain, le strict respect des limites des villes et la densification du tissu urbain. Or, lesdits principes ne sont pas suffisamment et efficacement appliqués. La conséquence est le développement de villes sans véritables limites géographiques, ou du moins dont les limites sont actualisées au gré de l'implantation anarchique des populations. La restructuration progressive des bidonvilles et zones non loties depuis des décennies a contribué à l'extension géographique de la ville de Ouagadougou telle qu'illustrée par la figure 1.2.

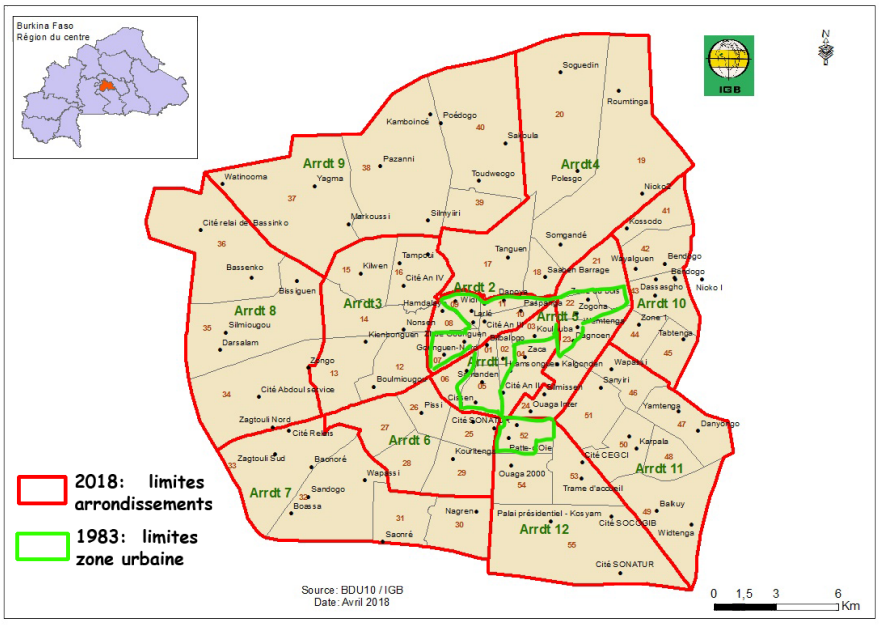


FIGURE 1.2: Extension géographique de la ville de Ouagadougou de 1983 à 2018, (recoupement INSD [2]et Fournet et Aude 2013)

1.1.3 Stress thermique

Les bâtiments ont une longue durée de vie au cours de laquelle les attentes des utilisateurs finaux doivent être satisfaites, y compris les exigences de qualité de l'environnement intérieur. Cette dernière est définie comme l'ensemble du confort thermique, visuel, acoustique et de la qualité de l'air inté-

2. Carte de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina, 2018

rieur (Yang et Moon, 2019; Soares *et al.*, 2017). En ce qui concerne spécifiquement le confort thermique, un environnement chaud impacte la santé ainsi que la productivité des utilisateurs finaux des bâtiments (Frontczak et Wargocki, 2011). Le contexte de changement climatique et de hausse des températures à l'échelle mondiale vient accentuer la difficulté à atteindre le confort thermique des bâtiments dans les régions au climat chaud (Latha *et al.*, 2015).

Les bâtiments en eux-mêmes sont susceptibles de contribuer à l'inconfort thermique en raison de la conception et du choix des matériaux. En effet, l'enveloppe des bâtiments, qui constitue un filtre entre le climat extérieur et intérieur, influence l'environnement thermique. Une option durable de conception consiste en l'utilisation de méthodes passives qui sont déterminées en fonction de l'environnement climatique. L'adéquation de l'enveloppe des constructions traditionnelles aux conditions climatiques chaudes apporte une réponse dans la quête du confort thermique. Les constructions modernes, quant à elles, n'ont pas su tirer profit des bonnes pratiques traditionnelles, et ce pour diverses raisons. Les multiples ouvertures et surfaces transparentes des constructions modernes ainsi que l'utilisation de matériaux aux propriétés thermiques non adaptées sont des maillons faibles de la transmission de la chaleur. Pourtant, des matériaux de construction écologiques tels que la paille, le bois, la brique de terre comprimée, etc. améliorent le confort thermique intérieur (Latha *et al.*, 2015; Kumar et P Singh, 2013).

1.2 Contexte de la construction et savoir-faire locaux

Une mise en situation précise est nécessaire à la compréhension du paysage architectural actuel des villes du Burkina Faso. À cet effet, les transformations opérées sur le mode de construction au fil des années ainsi que les cultures constructives actuelles dans les centres urbains sont développées dans cette section.

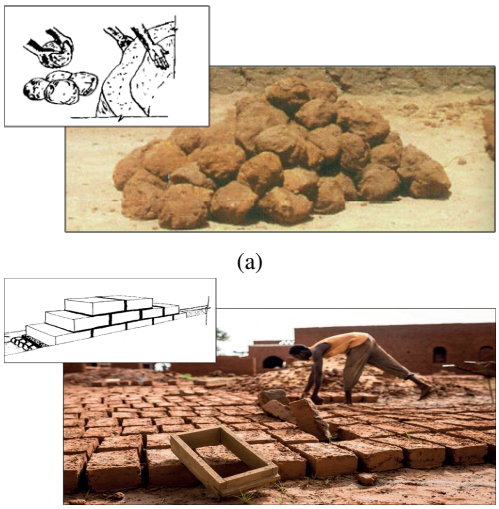
1.2.1 Mutations et aspirations sociales

De la tradition au modernisme, l'habitat du Burkina Faso a subi une évolution, une adaptation. Aussi bien les matériaux de construction que les formes des bâtiments d'antan ont cédé leur place à des matériaux réputés plus durables et contemporains. Ces nouveaux matériaux imposent une autre manière de concevoir l'habitat.

Terre crue et tradition

Par essence, l'architecture traditionnelle est conçue en harmonie avec l'environnement d'où elle émerge et qui a pour principale qualité de s'adapter au contexte (social, religieux, culturel) local. De ce fait, elle se développe autour de matériaux de construction disponibles localement. C'est ainsi qu'au Burkina Faso, la terre s'est affirmée comme le matériau par excellence, en l'absence de bois et au vu de la difficulté d'extraction des pierres de construction. À l'exception du nord du pays, où l'organisation sociale n'a pas permis son essor en raison du nomadisme, la terre se retrouve dans le paysage architectural de toutes les régions du pays.

La diversité des méthodes traditionnelles de mise en œuvre de la terre reflète, chaque fois, une identité culturelle propre au lieu de la construction. Les recherches semblent mettre en évidence une séquence temporelle universelle dans l'utilisation de la terre comme matériau de construction. Les méthodes de mise en œuvre sont passées du torchis vers la bauge, la brique crue et le pisé, répondant à l'exigence d'un habitat de plus en plus sédentaire et solide (Lebsir, 2016). À cet effet, l'adobe et la bauge qui constituent les techniques de mise en œuvre traditionnelle de la terre au Burkina Faso témoignent d'une histoire relativement récente (Kéré, 1995). Le peu d'outillages nécessaires à la mise en œuvre de ces deux dernières techniques, comme illustré à la figure 1.3, justifie leur essor dans le paysage traditionnel. En définitive, la terre crue a longtemps caractérisé l'habitat au Burkina Faso, mais les transformations opérées sur l'architecture ont changé l'aspect des villes et villages.



(a)

(b)

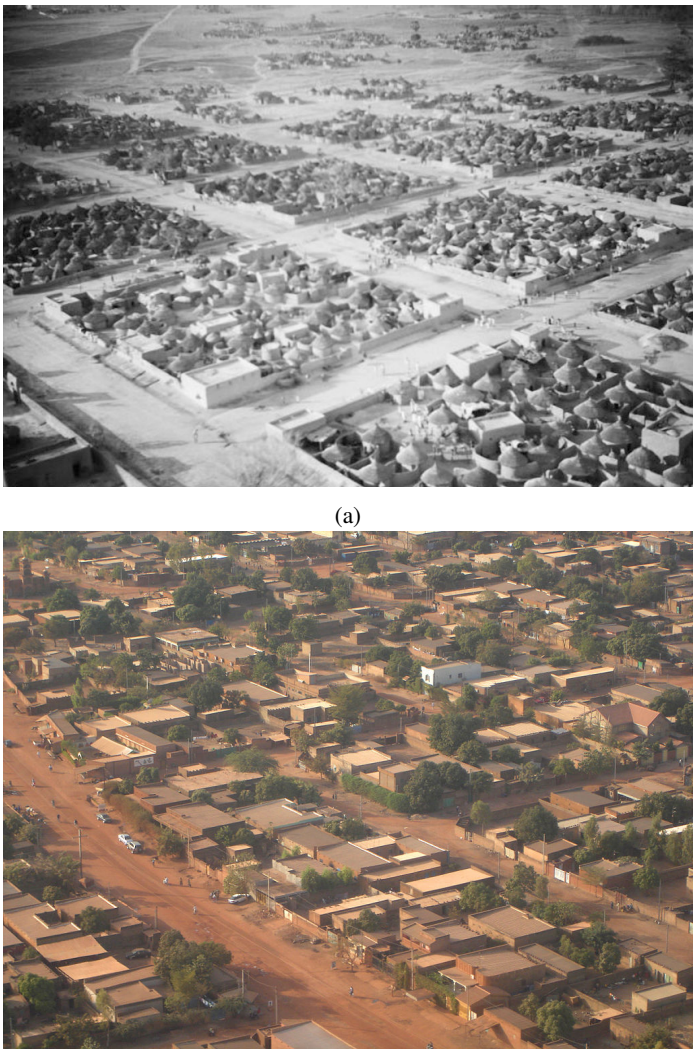
FIGURE 1.3: Technique de mise en œuvre traditionnelle de la terre crue au Burkina : (a) bauge et (b) adobe, (Kéré, 1995; Deramaux, 2017)

Évolution des pratiques traditionnelles

La fragilité des bâtiments en terre et l'envie de rupture avec les codes esthétiques et culturels du modèle traditionnel ont motivé les changements observés sur l'architecture. En effet, il est de plus en plus difficile de trouver des matériaux traditionnels de bonne qualité tels que le bois ou la terre. La déforestation et les changements climatiques rendent les essences de bois de construction rare. Le lessivage des sols par les inondations ainsi que le défrichage par le feu n'a cessé d'appauvrir la qualité de la terre. Outre les aspects liés à la qualité, l'abandon progressif des savoir-faire et des cultures constructives vernaculaires traduit une réponse à de nouvelles réalités concrètes, celles du monde moderne et occidental. Les populations aspirent à s'inscrire dans l'air du temps. Cela se traduit, pour elles, par le développement d'une architecture aux codes uniformes et universels, tout en rejetant la culture constructive traditionnelle qualifiée de primitive. En effet, le contact des cultures constructives locales avec les matériaux d'origine occidentale, au 19me siècle, a changé l'aspect et les aspirations en matière de logements (Moriarty, 1979).

L'élément le plus caractéristique à l'origine des transformations se situe au niveau de la toiture. En effet, les toits traditionnels à base de bois et de chaume cèdent leur place, dans la construction moderne, à des toitures faites de charpentes de poutres en bois ou métalliques surmontées d'une tôle métallique. La toiture moderne impose l'abandon des formes circulaires traditionnelles de l'habitat au profit de formes rectangulaires à l'instar de la tôle elle-même. La

figure 1.4 illustre le passage du paysage architectural traditionnel des années 30 (Fig. 1.4 (a)) au paysage plus moderne en 2007 (Fig. 1.4 (b)). Tant les transformations opérées sur le type de toiture que la forme des habitations y sont observables.



(a)

(b)

FIGURE 1.4: Photographie aérienne de la ville de Ouagadougou en (a) 1931 (Folkers et van Buiten, 2019) et (b) en 2007 [3]

Le second élément caractéristique de la construction moderne est, sans aucun doute, la nature des matériaux utilisés pour la réalisation des murs. En effet, la terre crue est abandonnée au profit de briques en parpaings de ciment. D'autres matériaux industriels tels que le verre, l'acier, l'aluminium, les

peintures, etc. viennent compléter et caractériser définitivement la construction moderne. De manière générale, la construction moderne est motivée par des considérations socio-économiques. L'habitat est considéré comme l'aspect le plus visible d'une certaine réussite sociale et cela en raison du coût financier nécessaire à l'achat des matériaux de construction (Wyss, 2005).

Défis en zones urbaines

En 2012, les villes de Ouagadougou et Bobo Dioulasso, respectivement capitale politique et économique, regroupaient 16.3 % de la population nationale alors qu'elles occupent en superficie 1.7 % du territoire national (INSD-Bukina, 2017). Le taux d'urbanisation est passé de 15.5 % en 1996 à 31.5 % en 2016 (INSD-Bukina, 2019; Comité National, 2015). Ce fort attrait pour ces centres urbains n'est pas soutenu par un développement économique suffisant, favorisant ainsi l'installation de la pauvreté : le taux de pauvreté en milieu urbain est passé de 10 % en 1994 à 20 % en 2003, parallèlement, il est resté constant en zone rurale (CEDEAO, 2008). Cette pauvreté urbaine se manifeste par une certaine précarité des habitations. Les matériaux de construction utilisés sont sommaires et les terrains non viabilisés sur lesquels les constructions sont érigées ne bénéficient pas des services de base tels que l'assainissement ou l'alimentation en eau courante. La figure 1.5 montre la stratification de la ville de Ouagadougou avec en périphérie les habitations spontanées et globalement précaires. La situation est telle que Valérie Sanou/Goungounga, directrice de la promotion de l'habitat et du logement, déclarait en 2014 ceci : «*L'acquisition d'un logement, surtout dans les centres urbains au Burkina Faso, relève d'un parcours du combattant pour la majorité de la population.*» (Kowoma, 2014).

Et si une solution à la précarité et à la quête d'un habitat décent se trouvait dans les matériaux de construction ? À la question "quel type d'habitat fait office de référence pour les populations ?" Wyss indiquait que deux tiers des répondants à l'enquête ont opté pour un habitat en parpaings de ciment (Wyss, 2005). Le parpaing de ciment semble être l'aspiration ultime en matière de construction pour les Burkinabè. Pourtant, seuls 25.8 % des habitations à l'échelle nationale ont leur mur en parpaings de ciment (INSD-Bukina, 2017). Face au choix limité - pour des raisons économiques et de marché - en ce qui concerne les matériaux de construction en général, et ceux des murs en particulier, le parpaing de ciment semble incontournable, mais reste inaccessible. Bon nombre d'acteurs de la construction prônent un retour à un modèle architectural endogène, qui s'affranchit des considérations sociales contemporaines et qui s'intègre aux réalités économiques (cf. section 1.3.4).

3. $https://als.wikipedia.org/wiki/Burkina_Faso$, consulté le 08 juin 2020

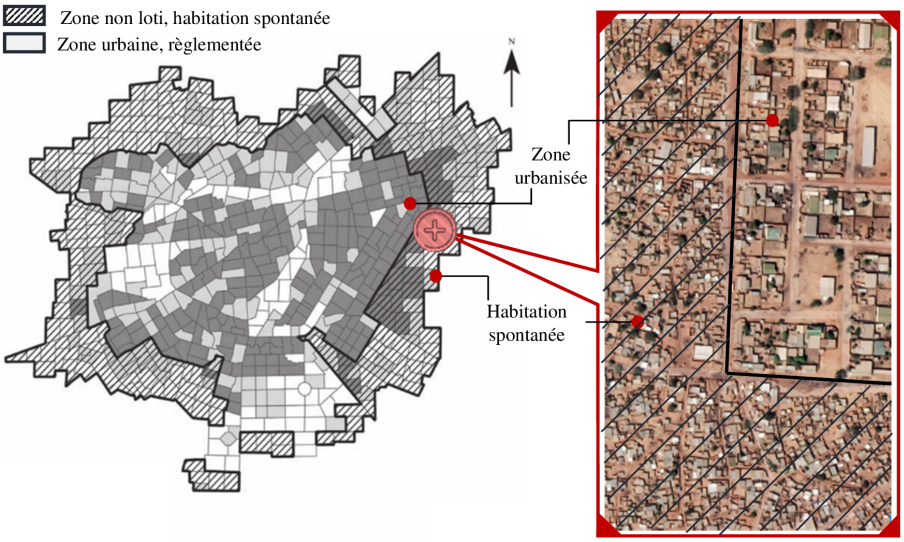


FIGURE 1.5: Stratification de la ville de Ouagadougou en 2006, (source Vallée *et al.* 2006)

1.2.2 Culture constructive en zone urbaine

L'habitat et son contexte urbain apparaissent de plus en plus en Afrique comme un outil important de la mondialisation référé à la modernité occidentale qui, de fait, est considérée comme l'unique modernité (Ouédraogo, 2015). La création architecturale au Burkina, la qualité des constructions et leur insertion dans le milieu environnant et social sont caractérisées par des mises en œuvre dualistes entre tradition et modernité dont l'aspect le plus visible est le recours à l'adobe et au parpaing de ciment respectivement. En effet, l'aspect le plus distinctif de l'habitat en zone urbaine se trouve dans les matériaux utilisés pour la réalisation des parois. Cependant, une nouvelle architecture basée sur la brique de terre comprimée ou la brique de latérite taillée fait son apparition dans le paysage urbain.

L'adobe

En Afrique de l'Ouest, bien qu'il existe plusieurs techniques de mise en œuvre de construction en terre, l'adobe ou banco est de loin la plus répandue au Burkina. Traditionnellement, la brique est simple à fabriquer et ne nécessite pas d'outils mécanisés. Elle consiste en un mélange de la terre - débarrassée éventuellement des granulats de dimensions non adaptés - et d'eau, le tout

coulé dans un moule rectangulaire. La taille des briques standards est de 30 x 15 x 10 cm^3 ou de 50 x 30 x 18 cm^3 (Keefe, 2012; Kéré, 1995).

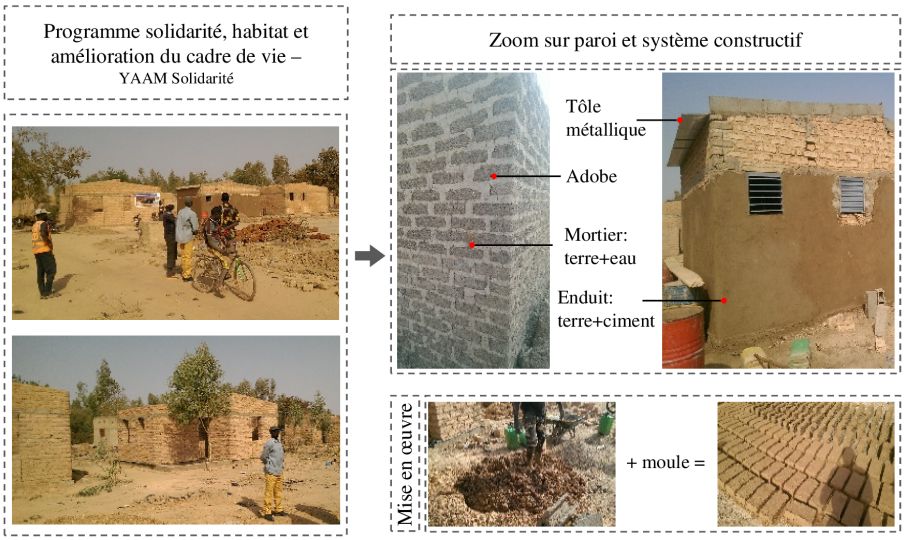


FIGURE 1.6: Mise en œuvre de l'adobe pour la construction d'un habitat

L'habitat urbain actuel en adobe, tel qu'illustré par la figure 1.6, est influencé par les matériaux issus de l'industrie. De ce fait, les toitures lourdes en terre crue ou légères en paille cèdent leur place à une toiture faite de tôles métalliques supportées par des chevrons en bois. Généralement, la tôle donne directement dans l'ambiance intérieure. Ce type d'habitat est essentiellement concentré dans les zones périphériques des villes, là où la terre est relativement moins chère voir gratuite, car hors des zones urbanisées ou de contrôles des autorités étatiques (cf. figure 1.5).

Cependant, le principal point faible de l'adobe est sa sensibilité à l'eau. Bien que la résistance à l'état sec convienne à la construction, à l'état humide une stabilisation s'avère nécessaire, car la brique d'adobe se détériore rapidement perdant ainsi sa résistance. Le mode de stabilisation traditionnel consiste à l'ajout de bouse de vache et de fibres végétales. Un enduit-ciment sur la face extérieure est mis en oeuvre localement pour se protéger de l'action de l'eau. Des études portant sur une stabilisation au ciment présentent des améliorations significatives sur la durabilité de la brique (Millogo et Morel, 2012; Dao *et al.*, 2018). Les statistiques quant à l'utilisation de l'adobe, figure 1.7, montrent que cette technique de construction est prépondérante au Burkina Faso ainsi que dans certains autres pays de la sous-région.

Le parpaing de ciment

Au-delà des considérations socio-économiques abordées à la section 1.2.1, l'essor que connait le bloc ou parpaing de ciment découle de sa résistance face à l'usure et aux aléas climatiques. Il est produit localement à partir de sable alluvionnaire, de ciment et d'eau dans des proportions définies. Malgré l'existence de normes nationales burkinabè pour sa production et sa mise en œuvre depuis 2009 (NBF 02-024 à NBF 02-026), celle-ci demeure essentiellement informelle. Les dimensions usuelles des blocs sont 10 x 20 x 40 cm^3, 15 x 20 x 40 cm^3 et 20 x 20 x 40 cm^3. La figure 1.8 illustre deux habitations types. Les murs sont généralement non porteurs et recouverts d'un mortier de ciment sur les deux faces. Pour des raisons esthétiques, un revêtement de finition pouvant être de la peinture, des briquettes en terre cuite ou en pierres est appliqué. La stabilité est assurée par un système de poutres, poteaux et semelles en béton armé.

Le bloc de latérite taillée (BLT)

Dans la dynamique de valorisation des matériaux latéritiques pour l'habitat en Afrique, les travaux de recherches menés par Lawane Gana 2014 font une synthèse précise sur le bloc de latérite taillé. Cette thèse est en grande partie la source des informations de cette section.

Le bloc de latérite indurée, localement appelé bloc de latérite taillée (BLT), est principalement utilisé dans la construction comme éléments de maçonnerie.

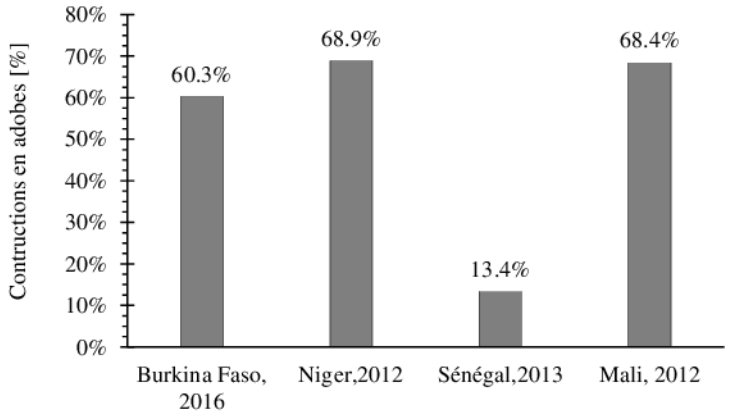


FIGURE 1.7: Pourcentage des constructions en adobes au Burkina Faso et dans la sous région, (ANSD-Sénégal, 2014; Vinima et Tiéblé, 2012; INS-Niger, 2012; INSD-Bukina, 2019).



FIGURE 1.8: Maison moderne en parpaings de ciment

Le mur peut être porteur ou de remplissage. L'utilisation du BLT au Burkina Faso date de l'époque coloniale où il a servi à la construction d'édifices administratifs, militaires et religieux. De nos jours, le BLT est prépondérant dans le paysage architectural de certaines villes du Burkina Faso telles que Dano et Toussiana. Les contraintes liées à son utilisation sont d'ordres socioculturels : association du matériau à une époque de travaux forcés et à la pauvreté économique. À ce jour, en Afrique de l'Ouest, il n'existe pas de norme régissant l'utilisation du BLT dans la construction. Pourtant plusieurs études scientifiques quant à son utilisation ont été menées (Lawane Gana, 2014; Kaboré, 2012; Abhilash *et al.*, 2016). Les propriétés physiques requises à son utilisation ne sont donc pas définies par des normes, mais les dimensions usuelles rencontrées sont 30 x 15 x 15 cm^3, 40 x 20 x 15 cm^3 et 24 x 12 x 12 cm^3. La résistance à la compression des blocs à l'état naturel est comprise entre 0.38 et 4.87 MPa suivant la teneur en eau, la profondeur d'extraction et la qualité de la roche mère (Lawane Gana, 2014; Abhilash *et al.*, 2016). La figure 1.9 illustre l'utilisation du BLT dans la construction.

La brique de terre comprimée (BTC)

Pour améliorer davantage les propriétés physiques de la terre, il peut être utile de recourir à une stabilisation. La stabilisation mécanique par compactage

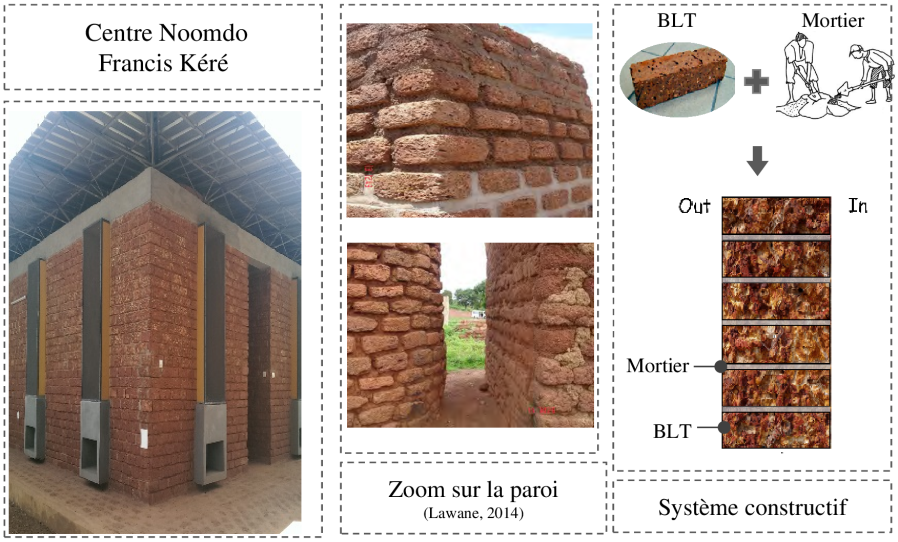


FIGURE 1.9: Mise en œuvre de la BLT pour la construction d'un bâtiment

réduit la porosité et donc l'absorption d'eau, la perméabilité et la compressibilité. Cependant, la brique ainsi formée reste très sensible à l'eau. Au contact avec cette dernière la résistance à la compression de la brique diminue comparativement à son état sec (Meukam, 2004). La stabilisation chimique permet de modifier les propriétés du matériau. La brique devient moins sensible à l'eau et sa résistance en compression augmente (González-López *et al.*, 2018). Le liant hydraulique usuel est le ciment ou la chaux, mais la stabilisation chimique peut s'intégrer dans une démarche plus respectueuse de l'environnement (Nshimiyimana *et al.*, 2019; Sore *et al.*, 2018).

La brique de terre comprimée, telle que mise en œuvre au Burkina Faso et dans la sous-région, consiste à la fois en une stabilisation mécanique et chimique. L'appellation BTC, dans la présente thèse, se réfère donc à cette mise en œuvre. La construction en BTC a pour objectif l'utilisation de la terre gratuite, disponible aux alentours du site de construction, afin de produire un bâtiment de qualité et à un coût abordable. Cette technologie, descendante moderne de l'adobe, a pour ambition de faciliter l'accessibilité à des logements décents avec un coût financier raisonnable.

Les spécifications techniques régissant l'utilisation de la BTC en Afrique sont décrites dans les normes ARS 674 à 683 (Normes-Régionales-Africaines, 1996). À l'échelle nationale, la BTC est encadrée par les normes NBF 02-001 à NBF 02-008. Les dimensions usuelles de la brique sont 29.5x14x9 cm^3 et

11x14x11.5 cm^3. L'épaisseur de la paroi est généralement de 14 cm mais elle peut être mise en œuvre avec les épaisseurs de 22 (cas de la BTC hydraform) et 29.5 cm (figure 1.10). La résistance à la compression de la BTC stabilisée au ciment se situe généralement entre 1.5 à plus de 7 MPa (Ouedraogo *et al.*, 2015b; Moevus *et al.*, 2013; Jayasinghe et Kamaladasa, 2007; Sore *et al.*, 2018). Cependant, dans des conditions spécifiques de production, elle peut être supérieure à 15 MPa (Guettala *et al.*, 2006). Bien que la résistance à la compression de la BTC puisse être supérieure à celle requise pour la construction des murs porteurs, ces derniers sont généralement non-porteurs et la stabilité est assurée par une ossature en béton armé.

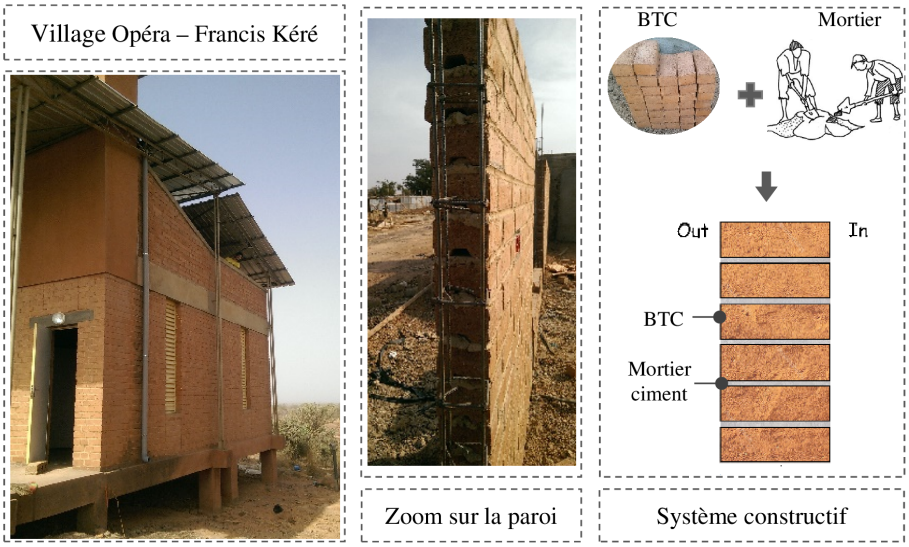


FIGURE 1.10: Mise en œuvre de la BTC pour la construction d'un bâtiment

Les données statistiques quant à l'utilisation de cette technologie dans les pays d'Afrique de l'ouest sont quasi-inexistantes. Mais avec l'hypothèse que la BTC se positionne entre la paroi de type "adobe améliorée" et celle de type "semi-dur", la figure 1.11 montre les pourcentages des ménages susceptibles d'avoir eu recours à la BTC pour la réalisation des murs extérieurs rapporté à l'ensemble des ménages.

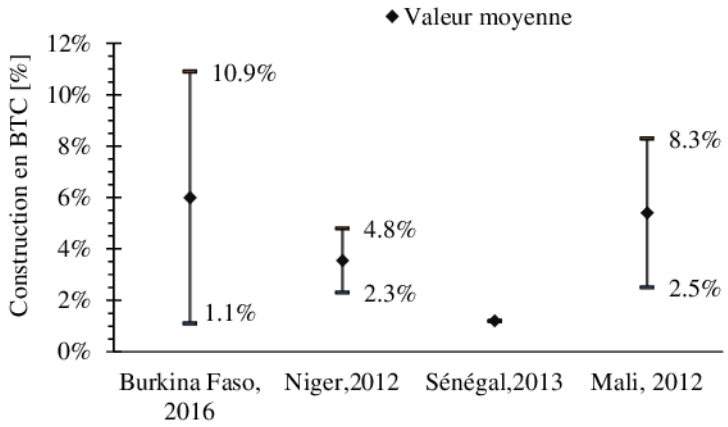


FIGURE 1.11: Pourcentage des potentielles constructions en BTC au Burkina Faso et dans la sous-région, (ANSD-Sénégal, 2014; Vinima et Tiéblé, 2012; INS-Niger, 2012; INSD-Bukina, 2019)

1.3 Néo-construction soutenable en terre crue

La soutenabilité [4] en construction se définit comme la rationalisation des ressources, à toutes les phases de la vie d'un bâtiment, dans le but de minimiser l'impact environnemental (Schroeder, 2016). À ce titre, le matériau terre présente des avantages indéniables. Il constitue une alternative soutenable aux briques à base de ciment ou de terre cuite. Cette section va examiner cette question en quatre partie. La première aborde les aspects liés à la sélection de la terre. La seconde présente les avantages économiques et environnementaux du matériau. La troisième est consacrée à l'interprétation contemporaine de la terre crue dans la construction. La quatrième s'intéresse aux initiatives locales de valorisation de la terre crue dans la construction.

1.3.1 Matière à construire

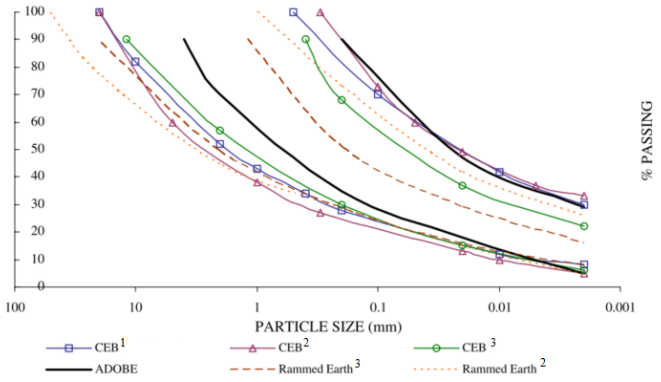
Une certaine connaissance du comportement des constituants de la terre crue (argile, granulats) ainsi que de sa composition et de sa structure minéralogique est nécessaire à son utilisation comme matériau de construction. À cet effet, les travaux de recherche menés par Nshimiyimana 2020 apportent de plus amples connaissances scientifiques sur ces aspects. Néanmoins, il est résumé ici les principaux critères de sélection de la terre de construction.

La granularité : les granulats ont une influence sur le comportement de la terre crue. Les granulats sableux agissent sur la teneur en eau nécessaire à la plasticité et donc sur les fissures de retrait lors du séchage. L'ajout de gravier augmente la résistance mécanique du matériau. L'argile, dans sa grande diversité de formes et de propriétés, constitue le liant. Les matériaux à base de terre crue ont leur résistance optimale lorsque les différentes fractions granulaires se retrouvent dans des proportions idéales, indiquées à la figure 1.12 (a) (Röhlen *et al.*, 2013; Delgado et Guerrero, 2007).

La plasticité : les limites d'Atterberg, à travers la limite de liquidité (LL), la limite de plasticité (PL) et l'indice de plasticité ($PI = LL - LI$), sont usuellement utilisées pour décrire l'habilité de la terre à se déformer sans se rompre. Suivant la technique de construction, la figure 1.12 (b) présente les intervalles recommandés (Delgado et Guerrero, 2007).

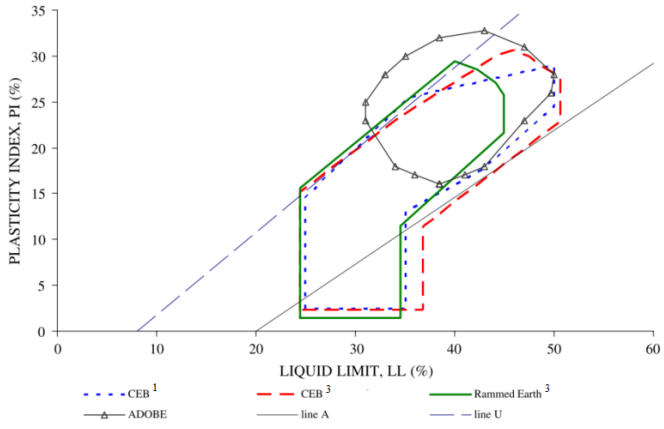
Autres recommandation : la présence de sels n'est pas recommandée car ils cristallisent et fragilisent le sol. Les matières organiques peuvent engendrer d'importants points de fragilité dans le mur.

4. traduit de l'anglais *sustainability*



(a)

(a)



(b)

(b)

FIGURE 1.12: Intervalles recommandés de (a) granulométrie et (b) d'indice de plasticité des techniques de construction en terre crue. [1] : AFNOR XP P13-901 ; [2] : MOPT,1992 ; [3] : Houben H, Guillaud H, 1994 cités par Delgado et Guerrero 2007

1.3.2 Économie et environnement

Pour être mise en œuvre, la terre a uniquement besoin d'être extraite et remaniée, réduisant ainsi l'impact négatif sur l'environnement lié à la transformation ou au transport. Comparée aux matériaux tels que les blocs de ciment ou la pierre de construction, la terre crue consomme moins d'énergie durant tout son cycle de vie (Huberman et Pearlmutter, 2008). Elle doit sa cohésion à un liant naturelle, l'argile, qui ne nécessite pas une activation par cuisson ou processus chimique, procurant ainsi à ce matériau un caractère réversible et donc recyclable. De plus, elle est un matériau hygroscopique, capable de contenir une certaine quantité d'eau en équilibre avec son environnement. L'excès d'humidité de l'air est stocké par le matériau puis restitué de manière différée quand l'air redevient trop sec. Cette propriété améliore les conditions hygrométriques des espaces intérieurs (Röhlen *et al.*, 2013).

Sur le plan économique, la terre crue offre l'opportunité aux pays en développement de développer une architecture adaptée et relativement moins couteuse qu'une construction classique. La figure 1.13 montre les coûts de construction d'une maison en rez-de-chaussée de $70m^2$ dont les murs extérieurs ont une épaisseur de 15cm (Adegun et Adedeji, 2017). En ce qui concerne spécifiquement les constructions en Afrique subsaharienne, des études ont montré que la paroi en terre crue est moins coûteuse que la paroi conventionnelle de l'ordre 33 % à 50 % (Olotuah, 2002; Muinde, 2013). De plus, dans les climats où la masse thermique est appropriée, la terre crue constitue le moyen le moins couteux pour y parvenir.

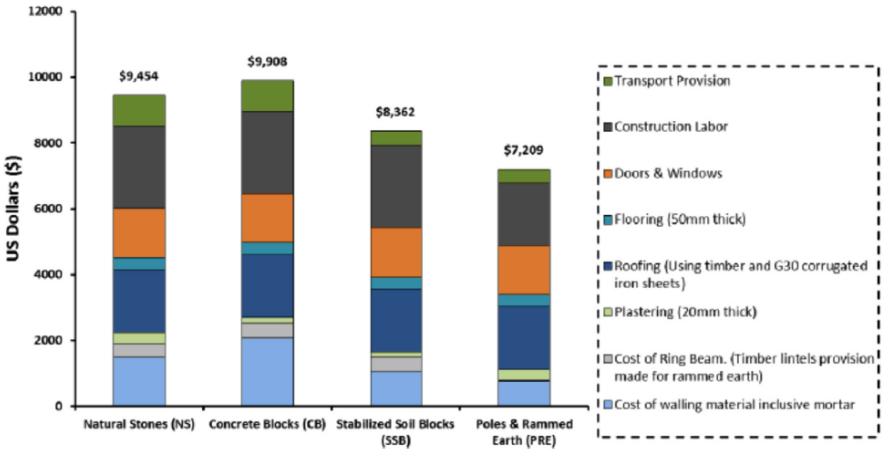


FIGURE 1.13: Comparaison des coûts de construction suivant la nature de l'enveloppe extérieure, (Adegun et Adedeji, 2017)

1.3.3 Interprétation contemporaine

La terre crue est aussi un matériau moderne et contemporain et est capable de répondre aux exigences de durabilité, de performance énergétique et mécanique. Un regain d'intérêt, entamé au lendemain du choc pétrolier de 1973, est constaté un peu partout dans le monde industrialisé en ce qui concerne son utilisation. L'essor contemporain de la terre crue s'est traduit dans les pays développés principalement par le développement de la technique de construction en pisé. Les avancées ont permis d'avoir des parois aux performances mécaniques en continuelle amélioration. À partir des années 80, cette technique s'impose en Australie comme un procédé de construction moderne allant de la réalisation de maisons individuelles aux habitats collectifs en passant par des usines et campus universitaires. C'est l'un des premiers pays à s'être doté de normes spécifiques pour la construction en terre (Dobson, 2015; Anger *et al.*, 2009). En Allemagne, elle a atteint un niveau de préfabrication industrielle et de standard de qualité équivalent à celui des matériaux plus conventionnels (Röhlen *et al.*, 2013). La chapelle de la réconciliation à Berlin (figure 1.14), aux murs porteurs en pisé, a marqué un tournant dans l'utilisation de ce matériau dans l'architecture moderne.



FIGURE 1.14: Chapelle de la réconciliation (Dobson, 2015)

En Afrique, les freins à l'utilisation de la terre crue sont encore bien ancrés. Dans sa version moderne, elle consiste principalement en la BTC. La figure 1.15 illustre deux bâtiments contemporains en BTC. Ces constructions montrent l'alliance entre tradition (terre crue) et modernisme (vitrerie, etc.).

1.3.4 Initiatives locales de valorisation et de revalorisation

Projets LOCOMAT et ADAOUA

La BTC a bénéficié de plusieurs projets de valorisation et de diffusion au Burkina Faso. Le projet ADAUA (Association pour le développement de l'architecture et de l'urbanisme en Afrique) pour la promotion de la BTC dans les

5. http ://www.kere-architecture.com/projects/



(a)



(b)

FIGURE 1.15: Architecture en brique de terre crue par Francis Kéré (a) clinique chirurgicale, Léo-Burkina Faso, (b) Centre de l'architecture en terre, Mopti-Mali [5]

années 80 a consisté à la construction de bâtiments pour un total de $5658m^2$ de surface au sol (Persson, 2014). Un bâtiment de l'institut panafricain de développement à Ouagadougou, illustré à la figure 1.16, fut réalisé dans le cadre de ce projet.

Par la suite, le projet LOCOMAT (projet de recherche, d'expérimentation et de vulgarisation des matériaux locaux), lancé en 1993 avait pour but de développer les initiatives et les chantiers permettant de valoriser les produits locaux. L'accent porta entre autres sur la promotion de la BTC. À cet effet, des formations et encadrements techniques des acteurs furent mis en œuvre.

Cependant, force est de constater l'échec des deux projets. Un désintérêt des acteurs (architectes, qualification de la main d'œuvre, etc.) et un prix, qui en fin de compte, n'était pas compétitif face aux parpaings ont contribué à cet échec. Une des critiques fondamentales à l'égard du projet LOCOMAT fut l'absence d'une analyse préliminaire de l'état du marché des matériaux de construction, notamment la négligence des tendances réelles et existantes et l'ignorance des besoins des masses populaires. En ce qui concerne le projet ADAUA, les expériences n'ont pas été concluantes et ont plutôt renforcé le besoin en matériaux importés, jugés plus durables (Wyss, 2005).



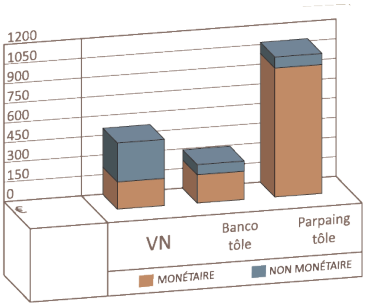
FIGURE 1.16: Construction ADAUA : institut panafricain de développement, (Deramaux, 2017)

Association la voûte Nubienne

Avec l'ambition d'apporter "une réponse adaptée et durable à la problématique de l'habitat en Afrique", l'association la voûte Nubienne (AVN) promeut des constructions en adobe sans recourt au bois, à la tôle ou au ciment. Elle s'inspire des techniques de construction originaires d'Égypte afin d'apporter une solution aux moins nantis (figure 1.17 (a)).



(a)



(b)

FIGURE 1.17: Construction AVN : (a) réalisation d'un bâtiment et (b) coût de construction du gros œuvre d'un bâtiment de 25 m^2 en milieu rural, (AVN, 2015)

En évitant l'utilisation de bois, AVN apporte une réponse à la question de la désertification et à la disparition des essences de bois de construction traditionnelles (AVN, 2015). La tôle et le ciment sont quant à eux jugés trop chers et inadaptés au climat. Elle est active dans 5 pays d'Afrique de l'Ouest, dont

le Burkina Faso. Les constructions réalisées par l'association s'appuient sur l'entraide et l'autoconstruction afin de fournir des habitations à la fois économiques, durables et confortables. L'étude comparative du coût de construction du gros œuvre d'un habitat en milieu rural, illustrée par la figure 1.17 (b), montre l'avantage économique des constructions AVN.

Cependant, l'architecture AVN est sujette à des désordres liés à l'action de l'eau. L'évacuation des eaux de la toiture nécessite une attention particulière. L'exposition des façades à la pluie battante entraine l'érosion des enduits ainsi que l'apparition de fissures dues au retrait et au gonflement hydraulique (figure 1.18).



FIGURE 1.18: Pathologies sur une façade d'un habitat AVN

YAAM Solidarité

Les inondations que connait le Burkina Faso le 1er septembre 2009 sont à l'origine de la création de l'association YAAM Solidarité. Elle veut répondre au problème de réhabilitation des maisons endommagées par les pluies. Les maisons en adobes sont les premières à subir les conséquences de ces inondations et constituent par conséquent les cibles de l'association. YAAM Solidarité a pour objectif de mettre en place un processus d'amélioration de l'habitat des personnes vulnérables en valorisant l'autoconstruction et l'aspect participatif des propriétaires, mais aussi en valorisant les matériaux locaux, en l'occurrence la terre. Le dernier projet de l'association est le"projet participatif d'amélioration du quartier informel de Boassa au Burkina Faso". Il vise à la réalisation de logements en adobes avec l'appui et la participation des futurs propriétaires.

Zi Matériaux, CC3D

Zi Matériaux est une entreprise très active dans la production et la commercialisation de matériaux de construction, notamment la BTC. Elle participe également à la formation des maçons sur la mise en œuvre de la BTC (Paulus, 2015). Elle fait partie des entreprises qui ont bénéficié des formations et encadrements techniques du projet LOCOMAT. Durant la dernière décennie, Zi Matériaux fut à l'origine de l'approvisionnement en BTC de pas moins d'une trentaine de chantier de construction au Burkina Faso [6].

CC3D est une entreprise de construction également active dans la production de BTC au Burkina Faso. La grande capacité de production de cette entreprise, jusqu'à 8000 blocs/jour, la positionne parmi les acteurs importants en matière de réalisation de construction en BTC. Elle est à l'origine de la réalisation d'importants chantiers notamment le marché en BTC de la ville de Koudougou d'une superficie est de 2.5 ha pour environ 1200 boutiques.

6. Entretien avec Zi Mahamoudou directeur général de l'entreprise Zi Matériaux, 2018

1.4 Principes passifs de conception de l'habitat

Cette section s'intéresse à la revue de la littérature scientifique en lien avec l'amélioration du climat intérieur des bâtiments. La première partie est consacrée à l'état de l'art sur les stratégies passives de conception. La seconde partie traite de la contribution de la paroi en terre crue à l'amélioration du confort thermique.

1.4.1 Stratégies passives de conception

Le présent état de l'art porte sur les différentes stratégies de conception des bâtiments qui permettent de mitiger et d'améliorer le climat intérieur. Sans prétendre révolutionner le mode constructif local, les stratégies développées sont relatives au contexte technologique, à la disponibilité des matériaux ainsi qu'aux savoir-faire.

Approche bioclimatique

Le domaine d'étude qui lie la conception de l'habitat au confort thermique, tout en limitant le recourt aux systèmes de conditionnement d'ambiance, fait principalement référence à l'approche bioclimatique. Ces principes concernent essentiellement l'orientation du bâtiment, l'épaisseur des parois, la nature des matériaux de construction et leur couleur, la gestion des apports solaires, le système constructif de la toiture, la ventilation naturelle (Labaki et Kowaltowski, 1998). L'analyse des données climatiques d'une région permet de formuler des principes architecturaux à même d'avoir une incidence positive sur le confort thermique des occupants.

Le premier diagramme bioclimatique est celui de Olgay (Olgyay, 1969). Il spécifie les différentes zones de confort en lien avec la température sèche et l'humidité. Il ne prend en compte que les conditions extérieures, ignorant les considérations physiologiques intérieures. Ce diagramme ne s'applique donc que dans les climats ou les différences entre températures intérieures et extérieures sont minimes (Sayigh et Marafia, 1998). Le diagramme bioclimatique le plus connu est celui de Givoni (Givoni, 1992). En fonction des conditions climatiques extérieures, 4 zones de refroidissement passif sont identifiées à savoir la zone de ventilation nocturne (zone 12), celle à forte masse thermique (zone 9), celle à forte masse thermique et à ventilation nocturne (zone 11) et la zone de refroidissement par évaporation (zone 10). Ces zones à la base établie pour les climats chauds ont été étendues et s'adresse à divers climats (figure 1.19).

Selon l'approche bioclimatique en climat chaud et à forte amplitude de température entre le jour et la nuit, la paroi extérieure doit être à même de stocker la chaleur et de retarder sa pénétration (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015).

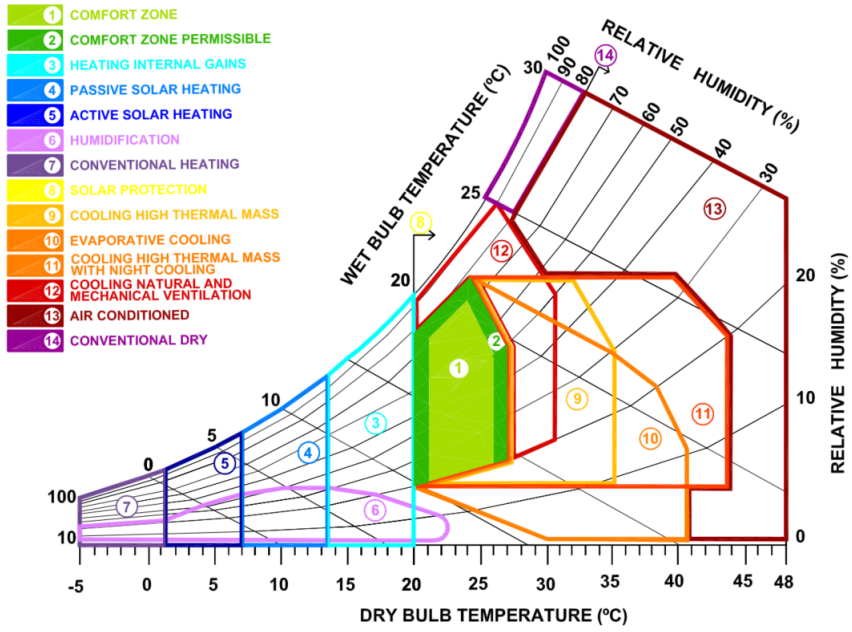


FIGURE 1.19: Diagramme psychométrique de Givoni, (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015)

Elle doit s'opposer à la variation de température entre le jour et la nuit, maintenant ainsi l'ambiance intérieure atour de la moyenne de température journalière extérieure. Cette spécificité est définie comme étant l'inertie thermique (cf. section 1.4.1).

L'application de l'approche bioclimatique doit s'adapter à la culture constructive dans laquelle elle est implémentée. Elle doit se baser sur une architecture vernaculaire qui se veut être la réponse aux besoins des populations locales. L'inertie thermique n'est une stratégie intéressante que si des matériaux à faible impact environnemental sont utilisés. Les matériaux à base de béton ainsi que les briques de terre cuite ont une énergie grise élevée qui ne peut être équilibrée par les économies d'énergie induites par l'inertie thermique qu'elles confèrent (Brambilla *et al.*, 2016).

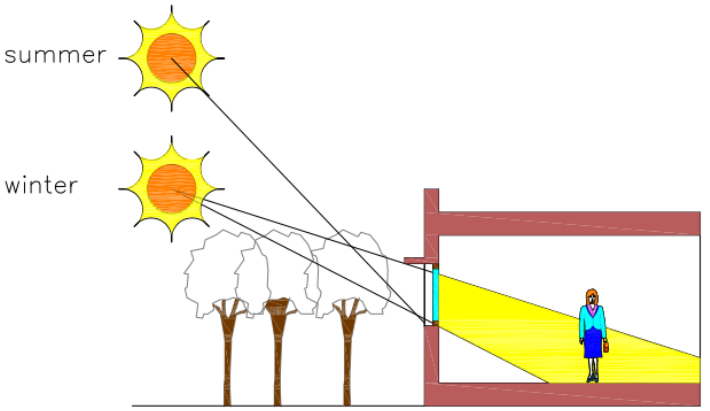
Protection solaire

Les systèmes passifs de protection solaire consistent en des stratégies ou en des dispositifs constructifs - dont le fonctionnement ne repose pas sur un apport d'énergie - situés en façades des bâtiments. Ils visent à améliorer le climat intérieur en réduisant le gain de chaleur dû au rayonnement solaire. Au-delà de l'orientation du bâtiment, ses systèmes intéressent les surfaces verticales (le cas de la toiture est abordé à la section 1.4.1) des habitats exposées au soleil à savoir les ouvertures (portes et fenêtres) et les parois.

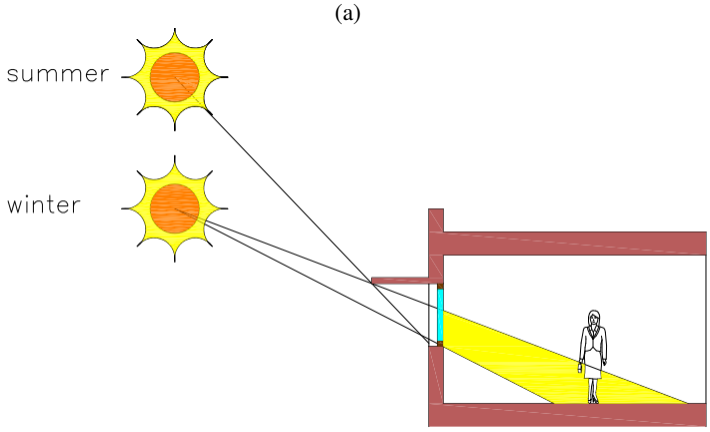
Les ouvertures peuvent être protégées à travers la mise en œuvre de solutions naturelles telles que l'utilisation d'arbres à feuilles caduques (figure1.20 (a)). En outre, les écrans extérieurs tels que les débords de toiture, les auvents, les persiennes ou les loggias permettent d'intercepter le rayonnement direct avant qu'il n'atteigne les ouvertures (figure1.20 (b)). Des dispositifs placés à l'intérieur (stores, rideaux) permettent également de réduire le gain de chaleur. Cependant, ces derniers sont moins efficaces que les dispositifs extérieurs, car le vitrage est opaque au rayonnement infrarouge émanant des surfaces intérieures (Kirimtat *et al.*, 2016).

Le nombre ainsi que la taille des fenêtres doivent être réduits. Les fenêtres doivent être installées dans la partie haute des murs afin de réduire l'impact du rayonnement au sol, faciliter l'évacuation de l'air chaud et de tirer le meilleur parti de l'éclairage naturel (Coch, 1998).

En ce qui concerne les parois extérieures, la densité des habitats (c.-à-d. des habitats disposés proches les uns des autres, laissant de petites séparations sous forme d'allées ou de cours intérieures) participe également à réduire la surface exposée au rayonnement solaire. En effet, la génération d'ombre entre bâtiments voisins réduit le réchauffement des parois. De plus, les allées et cours intérieures assurent le refroidissement des parois grâce à l'air frais qui y circule (amenée durant la nuit) ou qui y stagne (une partie de la journée).



(a)



(b)

FIGURE 1.20: Techniques de protection solaire des fenêtres grâce (a) à la végétation et (b) à un écran de protection (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015)

Le coefficient d'absorptivité solaire (α_s) ainsi que le coefficient d'émissivité ont une influence sur les échanges thermiques par rayonnement des parois. Si l'émissivité des matériaux de construction usuels des parois est relativement peu variable (pour les températures qui intéressent la physique du bâtiment), il n'en est pas de même pour le coefficient d'absorption solaire. Ce dernier est fonction de la nature des matériaux et de la couleur de la surface exposée au soleil (Cengel, 2014).

Grâce à une étude expérimentale menée sur deux bâtiments pilotes, l'un peint en blanc mat (α_s = 0.25) et l'autre en noir mat (α_s = 0.80), Cheng *et al.* 2005 ont montré l'impact du coefficient d'absorptivité solaire sur la température intérieure de l'air. Les auteurs ont montré que la température maximale du pilote peint en noir mat est supérieure d'environ 12 ° C à celle du pilote peint en blanc. La température de l'air à l'intérieur du pilote blanc mat est proche de l'air extérieur. De même, Mansouri *et al.* 2017 ont montré que la consommation annuelle d'énergie pour le refroidissement d'un bâtiment en béton de 70 m^2 vaut 12.41 kWh/m^2 lorsque α_s = 0.1 et 13.44 kWh/m^2 lorsque α_s = 0.9. Le contexte climatique est celui de l'Algérie (climat chaud) et la consigne de refroidissement est fixés à 26 ° C. Il convient donc de privilégier les couleurs claires pour limiter l'élévation de la température intérieure due au rayonnement solaire. Le coefficient d'absorptivité solaire de la terre crue se situe entre 0.40 et 0.70 (Reagan et Acklam, 1979). Un essai de caractérisation réalisé sur les BTC provenant de l'entreprise locale Zi-Matériaux a permis de déterminer une valeur de α_s = 0.64 (Sangam, 2019).

Limiter l'incidence du rayonnement solaire sur les parois, grâce à des dispositifs architecturaux, à l'orientation du bâtiment et à la présence d'arbres et de plantes permet également de réduire le flux de chaleur vers l'intérieur en journée. En fonction de la position géographique, la projection stéréographique du soleil permet de définir les orientations du bâtiment susceptible de recevoir le moins de rayonnement direct. Les débords de toiture ainsi que les bardages, par l'ombrage qu'ils créent, participes à réduire le gain de chaleur des parois exposées (figure 1.21). Les cours intérieures végétalisées créent un microclimat et permettent de réduire la température ambiante au voisinage des murs extérieurs de 2 à 2.5 ° C (Singh *et al.*, 2010; Kamal, 2012).

Conception de la toiture

La toiture est en contact avec l'environnement extérieur. À cet effet, sa conception doit prendre en considération les contraintes climatiques que sont le rayonnement solaire et la température de l'air extérieur. La toiture joue un rôle important dans la performance thermique des bâtiments en transférant la chaleur par rayonnement vers d'autres composants et en échangeant par convection avec l'air de la zone (Kaboré, 2015).



FIGURE 1.21: Protection solaire locale des façades d'un bâtiment

Les stratégies passives visant à réduire la transmission de chaleur par la toiture peuvent être catégorisées en solutions architecturales et non architecturales (Sanjay et Chand, 2008).

Les solutions architecturales sont relatives à la forme de la toiture ainsi qu'à sa ventilation. Ainsi, les toitures en forme de voûte et de dôme permettent de maintenir des conditions confortables en climat chaud. En raison de la stratification thermique, l'air chaud à l'intérieur du bâtiment converge vers l'espace sous le toit créant des conditions plus confortables au niveau de l'espace de vie. De plus, l'une des caractéristiques particulières de ces toitures est l'effet d'auto-ombrage qui se produit quasiment toute la journée (excepté quand le soleil est au zénith). Comparativement à la toiture plate, celle en voûte présente de meilleures performances thermiques (Hadavand *et al.*, 2008; Elseragy, 2004; Elnokaly *et al.*, 2019).

La ventilation adéquate de la toiture, en l'occurrence du comble, contribue à réduire le gain de chaleur par rayonnement et par conséquent, améliore le confort intérieur et réduit la consommation d'énergie (Al-Obaidi *et al.*, 2014; Sadineni *et al.*, 2011a). À travers la figure 1.22, Latif *et al.* 2019 montrent l'influence de la ventilation du comble sur la distribution de température en son sein. L'étude par simulation réalisée est appliquée à une maison située en climat chaud. Ainsi, les résultats de la figure 1.22 (a) sont relatifs au modèle pour lequel aucune ventilation n'est appliquée. La figure 1.22 (b) montre la

distribution des températures du modèle pour lequel la ventilation est possible grâce à des orifices et dont le flux est régi par la différence de température entre l'environnement extérieur et intérieur (différence de pression). Ces résultats montrent qu'il est possible de réduire la température moyenne dans le comble de plus de 13 ° C grâce à la ventilation.

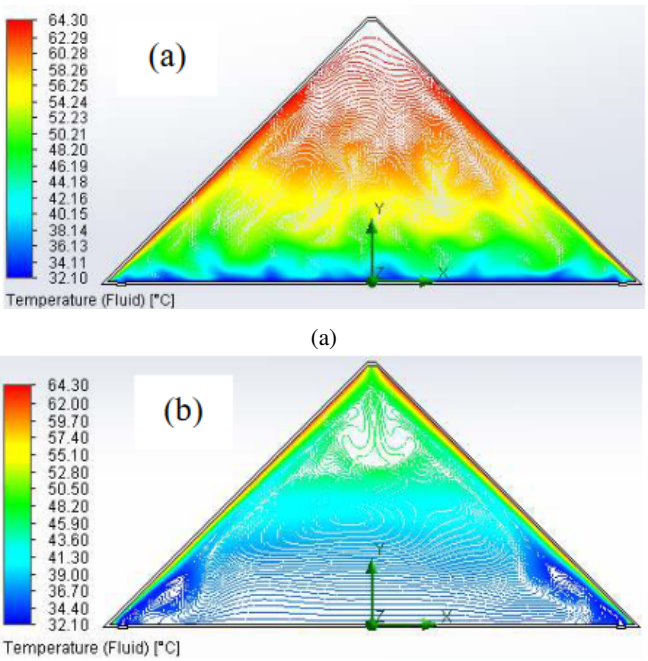


FIGURE 1.22: Distribution des températures à l'intérieur du comble d'un habitat en climat chaud et humide. Modèle (a) sans ventilation et (b) avec ventilation (Latif *et al.*, 2019)

Les solutions non architecturales sont, quant à elles, mises en œuvre indépendamment de la géométrie de la toiture. Ces solutions passives sont d'un intérêt grandissant, car elles peuvent être mises en œuvre dans les bâtiments déjà existants. Les barrières à la transmission de chaleur consistent en des matériaux qui empêchent ou réduisent le flux de chaleur vers l'intérieur. À ce titre, l'isolation de la toiture permet de réaliser une économie d'énergie de l'ordre de 50% (Toguyeni *et al.*, 2012; Daouas, 2016). De même, un toit réfléchissant permet de conserver une surface plus froide que les toits conventionnels et cela dans les mêmes conditions. Cette solution est simple d'application, car les propriétés optiques peuvent être contrôlées simplement en agissant sur la surface du toit en changeant par exemple la couleur (Hernández-Pérez *et al.*, 2014, 2018).

Inertie thermique

La notion d'inertie thermique n'est pas facile à appréhender. La plupart du temps, elle est définie comme étant la vitesse avec laquelle le bâtiment réagit à des perturbations extérieures (Chahwane, 2011). Elle se réfère à la capacité du bâtiment à absorber une quantité de chaleur durant la journée et à la restituer durant la nuit (Kosny *et al.*, 2001). La quantité de chaleur absorbée est fonction de la densité et de la chaleur spécifique des matériaux tandis que le taux d'échange de chaleur est régi par la conductivité thermique (Verbeke et Audenaert, 2018). L'inertie thermique permet de réduire les pics de chaleur et d'amortir les fluctuations de températures dans les bâtiments non conditionnés. Elle est exploitée comme stratégie passive d'amélioration du confort dans les climats chauds.

L'inertie thermique est une stratégie passive intéressante que si les températures maximales extérieures n'excèdent pas 28 ° C (avec une pression de vapeur inférieure à 20 $mmHg$). Cependant, une augmentation de la vitesse de l'air (2 $m \cdot s^{-1}$) permet d'étendre la limite à 30 ° C (Givoni, 1994).

Isolation thermique des parois

À l'instar de l'isolation de la toiture, il est possible de réduire la déperdition ou la transmission de chaleur à travers les parois grâce à l'utilisation d'isolants thermiques. Ces derniers sont en général caractérisés par leur résistance thermique ou leur coefficient de transmission thermique (U-value). Un matériau est considéré isolant lorsque sa conductivité thermique est inférieure à 0.07 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Nematchoua *et al.*, 2015). Des matériaux biosourcés comme la laine de bois ou synthétiques comme le polystyrène ou encore minéraux comme la laine de verre peuvent être associés à la mise en œuvre des parois.

Les études concernant l'isolation thermique des parois sont focalisées principalement sur les économies d'énergie ou sur l'épaisseur optimale de l'isolant. Nematchoua *et al.* 2017 ont montré que, dans l'environnement climatique du Cameroun, l'épaisseur optimale du polystyrène (en prenant en compte du coût de l'isolant, de l'énergie, mais aussi en considérant la durée de vie du bâtiment) appliqué à un mur en parpaings de ciment se situe entre 0.08 et 0.11 m en fonction de l'orientation du mur et de la ville. L'étude menée par Mohsen et Akash 2001 a montré que l'isolation par l'extérieur des murs contribue à une économie d'énergie de l'ordre de 77 % tandis que Daouas *et al.* 2010 montrent qu'une isolation "sandwich" à l'aide d'un polystyrène expansé de 0.057 m est le plus bénéfique pour les murs en briques. L'économie d'énergie réalisée est de 58 % avec un retour sur investissement de 3.11 ans.

Peu de recherches se sont penchées sur le cas des bâtiments naturellement ventilée. Or, Coffman *et al.* 1980 affirment que les parois extérieures

de ce type de bâtiment ne doivent pas être homogènes, mais constituées de plusieurs couches de matériaux aux propriétés thermiques différentes. Serrano *et al.* 2016 ont étudié l'impact de l'isolation des parois extérieures sur l'environnement thermique des bâtiments en évolution libre. L'étude expérimentale menée a porté sur l'analyse des températures intérieures d'une construction en pisé de 29 cm (U-value = 2.43 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) et d'une autre composée d'un isolant de 6 cm à l'extérieur et du pisé de 29 cm à l'intérieur (U-value = 0.56 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Les auteurs ont montré que la fluctuation de température intérieure est de 2-3 $°C$ et de 0.5-1.5 $°C$, respectivement dans la construction en pisé et dans celle intégrant la couche d'isolant.

De même, Beckett *et al.* 2017 ont analysé la performance thermique de deux bâtiments, l'un en pisé (U-value = 2.50 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), l'autre disposant d'une couche additionnelle de polystyrène (U-value = 0.47 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Les bâtiments sont construits dans la partie australe de l'Australie où les températures maximales atteignent 45 $°C$ en été. Aucun système de refroidissement d'air n'est installé. Les résultats ont montré que les températures intérieures des deux maisons se situent globalement dans la zone de confort thermique pendant l'été. Cependant, la maison isolée a des températures plus élevées.

Des études portant sur la position relative de la masse thermique dans les parois doubles sont également rencontrées dans la littérature scientifique. Givoni 1969 affirme que placer l'isolant du côté extérieur et la masse thermique du côté intérieur permet de réduire le flux de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur pendant la journée. Al-Sanea *et al.* 2012 sont parvenus à une conclusion similaire. Dans les conditions où le flux de chaleur est orienté de l'environnement extérieur vers l'intérieur du bâtiment, les auteurs ont montré que placer la masse thermique du côté intérieur et l'isolant du côté extérieur permettait un meilleur amortissement de la fluctuation de température comparativement à la configuration inverse (c.-a.-d masse thermique à l'extérieur et isolant intérieur). De même, l'analyse comparative par simulation menée par Ozel 2014, dans les conditions climatiques de la Turquie, a montré que la masse thermique intérieure fournit les plus faibles fluctuations de température. Il s'avère que dans la plupart des climats, les parois doubles qui consistent en de la masse thermique du côté intérieur sont les plus bénéfiques pour améliorer le confort (Verbeke et Audenaert, 2018; Eben Saleh, 1990).

Cependant, en fonction des paramètres tels que le mode d'occupation des espaces du bâtiment, d'autres études montrent que la paroi double inverse (c.-a.d masse thermique du côté extérieur) est susceptible de répondre aux attentes d'un meilleur climat intérieur (Bojic et Loveday, 1997; Kolaitis *et al.*, 2013; Tsilingiris, 2006b).

Ventilation

Une ventilation adaptée permet d'améliorer le confort physiologique des occupants grâce au flux d'air crée, mais aussi d'améliorer la température de l'air intérieur (Givoni, 1992). L'efficacité de la ventilation naturelle dépend de l'orientation du bâtiment, de l'interaction des occupants avec le bâtiment, spécifiquement du mode et du programme d'ouverture des fenêtres. Si en climat chaud et humide la ventilation continue toute la journée est préconisée (Liping et Hien, 2007), en climat chaud et sec une ventilation nocturne est plus adaptée en raison des températures élevées en journée et faible la nuit. Demosthenous *et al.* 2016 ont démontré que la ventilation nocturne avait un impact positif sur le refroidissement des espaces intérieurs et sur le niveau de confort en période chaude . La ventilation nocturne est souvent associée à l'inertie thermique de l'habitat. Lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure (c.-à-d. généralement la nuit) la ventilation naturelle permet de dissiper la chaleur stockée dans les parois.

Une vitesse de l'air élevée permet d'augmenter la limite de neutralité ainsi que de confort thermique. Une étude réalisée en climat chaud et humide révèle que la température de la neutralité thermique augmente de 2.6 $^\circ\, C$ pour une vitesse de 1.6 $m \cdot s^{-1}$ (Deb et Ramachandraiah, 2010). Des dispositifs passifs tels que les tours solaires, les cheminées à vent ou les puits canadiens peuvent contribuer à augmenter la vitesse de l'air à l'intérieur des bâtiments (Samuel *et al.*, 2013).

L'ensemble des stratégies passives de conception des bâtiments, développées dans cette section, contribuent à l'amélioration du confort thermique en climat chaud. Elles doivent être simultanément mises en œuvre afin d'agir de façon significative sur l'environnement climatique intérieur. Cependant, la présente recherche est focalisée sur la contribution des parois. Pour les raisons évoquées aux sections 1.3, 1.2 et 1.1, l'intérêt se porte sur la terre crue, spécifiquement sur la BTC. Ainsi, les principes liés à la capacité thermique et à l'isolation thermique des parois en BTC seront étudiés afin de préciser la conception des murs.

1.4.2 Contribution des parois extérieures à l'amélioration du confort thermique

La contribution des parois en terre crue à l'amélioration du confort thermique en zone chaude est largement démontrée par la littérature scientifique. Comparativement au parpaing de ciment, la terre crue est peu conducteur de chaleur et, grâce à sa capacité thermique, est capable d'absorber le flux de chaleur extérieur. Elle maintient ainsi l'environnement intérieur dans des condi-

tions acceptables (Adam et Agib, 2001).

Les études expérimentales menées par Ojo et Lawal 2011 dans le climat tropical du Nigéria ont montré que les constructions traditionnelles utilisant la terre crue offraient de meilleures conditions climatiques (atténuation des pics, fluctuations réduites) que la construction de type moderne.

Au Burkina Faso, Rincón *et al.* 2019 ont montré l'intérêt de la masse thermique de la terre crue. La technique *earthbag*, qui consiste à introduire de la terre dans des sacs qui sont ensuite empilés les uns sur les autres, est comparée à l'adobe. Les propriétés thermiques de la paroi *earthbag* sont : conductivité thermique λ = 1.1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, capacité thermique ρc = 2190 $kJ \cdot m^{-3}.K^{-1}$, épaisseur de paroi d = 0.32 à 0.64 cm. Les résultats ont montré que la forte inertie thermique du bâtiment *earthbag* permet presque de supprimer totalement l'inconfort annuel tandis que le bâtiment fait en adobe traditionnelle présentait pas moins de 3000 h d'inconfort.

Grâce à de la simulation thermique dynamique, Dong *et al.* 2014b ont montré l'impact de l'augmentation de l'épaisseur des parois en pisé (λ = 1.25 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, ρc = 1940 $kJ \cdot m^{-3}.K^{-1}$, d= 0.20 à 0.40 cm) sur le confort thermique. Le contexte climatique est celui de l'Australie (chaud et sec). Les résultats montrent que le pourcentage des heures de confort augmente de 5.8% lorsque l'épaisseur de la paroi en pisé passe de 20 à 40cm.

Fernandes *et al.* 2019 ont montré que grâce à l'inertie thermique de l'enveloppe conférée par le pisé (λ = 1.00 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, ρc = - , d = 0.60 cm) il est possible de maintenir des conditions intérieures confortables en dépit de températures extérieures extrêmes durant l'été au Portugal (jusqu'à 40°C). Il en est de même durant l'été en Suisse, où la couche supplémentaire de BTC (λ = 0.79 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, ρc= 2090 $kJ \cdot m^{-3}.K^{-1}$, d = 0.14 cm) associée à la paroi extérieure permet de réduire à zéro le risque d'inconfort chaud tandis que la pièce aux parois légères présente un risque de 7% (Brambilla et Jusselme, 2017).

Il ressort de cet état de l'art que la paroi en terre crue contribue à l'amélioration du confort thermique intérieur en climat chaud. Cependant, les propriétés thermiques du matériau restent variables. Or, l'interaction dynamique entre les propriétés thermiques de l'enveloppe, le contexte climatique et le mode d'utilisation de l'habitat impacte le niveau de confort. Il n'existe pas de méthode permettant la sélection des matériaux de construction de façon appropriée alors qu'ils ont un effet fondamental sur le comportement thermique du bâtiment (Chahwane, 2011).

1.5 Limites et perspectives de recherche

L'état de l'art précédent sur les stratégies de conception (cf. section 1.4.1) ainsi que sur la contribution des parois en terre crue à l'amélioration du climat (cf. section 1.4.2) présente des limites. Elles sont exposées ici.

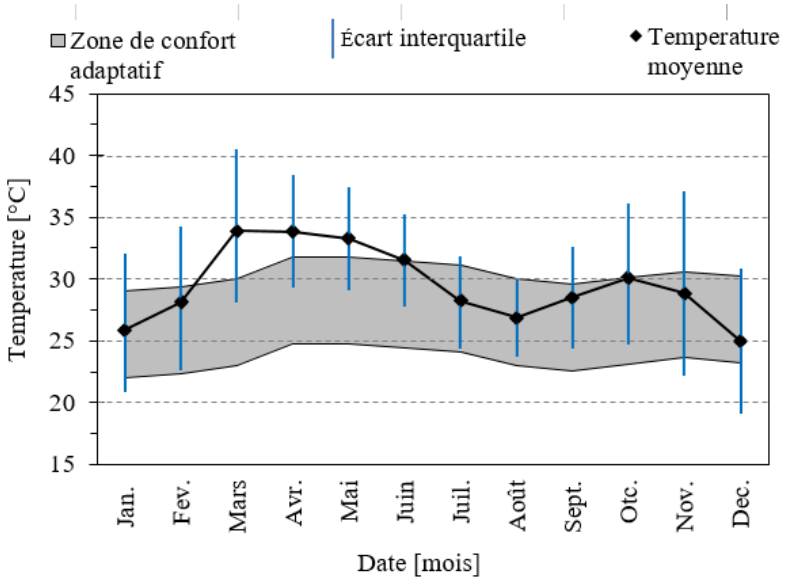
Inertie thermique vs climat de Ouagadougou

La conception bioclimatique préconise la forte inertie des parois des habitations, en climat chaud et sec, afin d'assurer un confort thermique. Bien que l'inertie thermique de la terre crue permette une amélioration du confort, elle peut être dans certaines conditions, source d'inconfort. Taylor *et al.* 2008 ont montré que l'inertie thermique de la terre crue n'offre pas nécessairement un meilleur climat intérieur comparativement aux matériaux de construction conventionnels. En réalité "la forte" inertie thermique devrait être quantifiée et adaptée à l'environnement climatique. Si l'étude menée par Sambou 2008 a permis d'établir l'inertie thermique maximale des parois extérieures (en fonction des propriétés thermiques), il n'en est rien pour ce qui est requis afin d'optimiser le confort thermique. Une importante capacité de stockage de chaleur de la paroi n'implique pas systématiquement un optimum de confort.

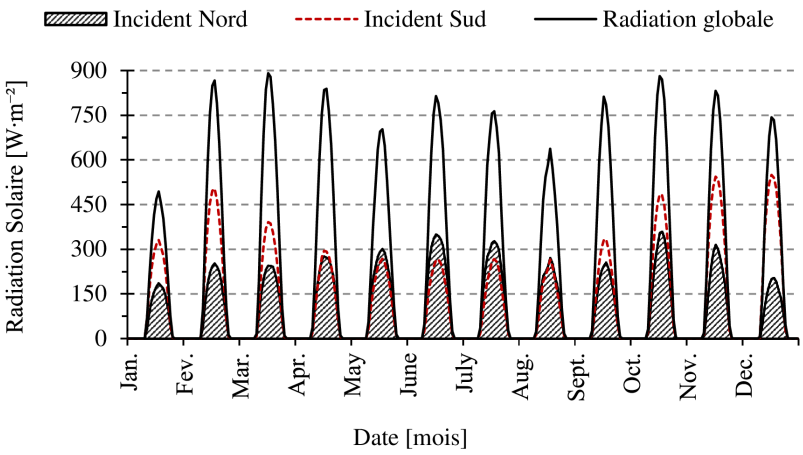
La forte inertie thermique des parois comme stratégie passive requière une variation de température, entre le jour et la nuit, supérieure à $10°C$ et une moyenne de température extérieure dans la zone de confort (Chahwane, 2011). À l'exception de quelques mois (mars à juin), le climat de la ville de Ouagadougou permet d'envisager l'inertie thermique comme stratégie passive (figure 1.24 (a)).

Cependant, la promesse du confort par l'inertie thermique n'est tenue que si on limite les autres sources d'apport de chaleur comme celle due à la radiation solaire. Or, dans le climat de Ouagadougou, elle constitue une part non négligeable du gain de chaleur des bâtiments (figure 1.24 (b) et (c)). Bien que des dispositifs de protection solaire soient mis en œuvre localement, ils restent insuffisants pour empêcher la pénétration de chaleur.

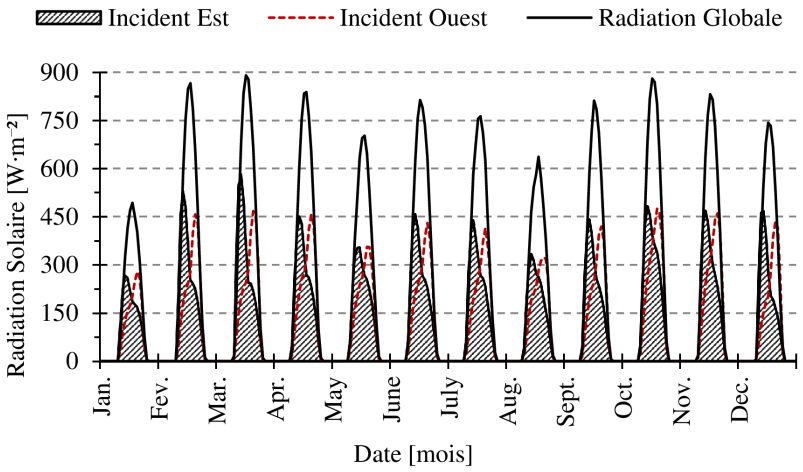
De ce qui précède, deux points importants se distinguent. (i) La forte inertie thermique des parois extérieures ne confère pas nécessairement le meilleur niveau de confort thermique. Il est essentiel de quantifier l'inertie thermique requise en lien avec le mode d'utilisation du bâtiment. (ii) Dans le contexte climatique de Ouagadougou, il est plus opportun d'œuvrer à la réduction de la surchauffe qu'à l'atteinte du confort thermique à l'échelle annuelle. D'autant plus que l'accent porte, dans cette recherche, sur les habitats sans système énergétique de refroidissement.


Zone de confort adaptatif
Écart interquartile
Temperature moyenne
Temperature [°C]
45
40
35
30
25
20
15
Jan.
Fev.
Mars
Avr.
Mai
Juin
Juil.
Août
Sept.
Otc.
Nov.
Dec.
Date [mois]

(a)


Incident Nord
Incident Sud
Radiation globale
Radiation Solaire [W·m⁻²]
900
750
600
450
300
150
0
Jan.
Fev.
Mar.
Apr.
May
June
July
Aug.
Sept.
Oct.
Nov.
Dec.
Date [mois]

(b)



(c)

FIGURE 1.24: Climat type (TMY2) de la ville de Ouagadougou : (a) évolution de la moyenne mensuelle de température sèche et de l'amplitude thermique, (b) radiation solaire incidente Nord et Sud et (c) radiation solaire incidente Est et Ouest

Conductivité thermique

Les propriétés thermiques de la paroi en terre crue sont relativement variables. De manière générale, la conductivité thermique, λ, des briques de terre crue est comprise entre $0.3W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ à $1.7W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (cf. annexe A). Elle dépend essentiellement d'une autre propriété thermophysique qui est la densité apparente sèche, ρ. Cette dernière est comprise entre 1600 et 2200 kg/m^3 (Moevus *et al.*, 2013). La régression entre les deux propriétés montre que la conductivité thermique augmente avec la densité apparente sèche comme illustrée par la figure 1.25 (Mansour *et al.*, 2016; Bogas *et al.*, 2018; Nshimiyimana, 2020).

La conductivité thermique est également fonction de la teneur en eau du matériau (figure 1.26). En effet, la présence d'eau dans les pores du milieu engendre des courts-circuits pour le transfert de chaleur. La conductivité thermique augmente avec la teneur en eau du matériau (Meukam, 2004; Hall et Allinson, 2009b; KABRE *et al.*, 2019; Hall et Allinson, 2009b).

Deux limitations en ce qui concerne la conception de la paroi en terre crue peuvent être notées. (i) L'approche bioclimatique de conception préconise des parois à forte inertie thermique dans les climats chauds. Cependant, l'augmentation de la densité implique celle de la conductivité. En d'autres termes, aug-

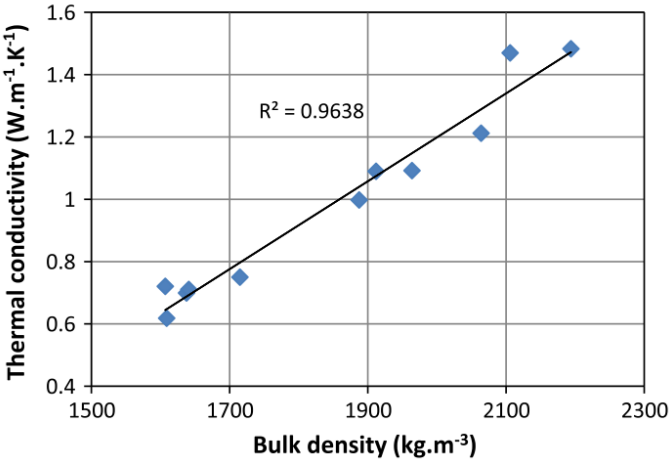
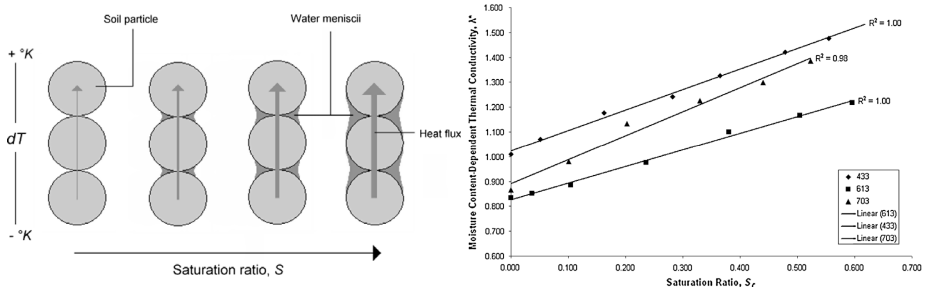


FIGURE 1.25: Évolution de la conductivité thermique de la brique de terre crue en fonction de la densité apparente, (Mansour *et al.*, 2016)



(a) (b)

FIGURE 1.26: Influence du ratio de saturation sur le la conductivité thermique de la terre crue : (a) illustration, (b) relation linéaire, (Hall et Allinson, 2009b)

menter la capacité de stockage de la paroi en terre crue conduit à réduire sa résistance thermique. Or, ces deux fonctions thermiques participent au confort. La question de la priorité à donner à ces deux propriétés (c.-à.-d. augmenter la densité ou réduire la conductivité thermique) reste ouverte. (ii) L'hygroscopie de la terre implique une variation de la teneur en eau en son sein. La chaleur latente d'évaporation et de condensation liée à ce processus peut contribuer à réguler la température intérieure. D'un autre côté, l'augmentation de la teneur en eau entraine une augmentation de la conductivité thermique. La question du réel bénéfice thermique liée à l'hygroscopie de la terre crue reste également ouverte.

Capacité thermique

La capacité thermique de la paroi est fonction de la densité apparente, de l'épaisseur et de la chaleur spécifique du matériau. Elle peut être quantifiée, en régime permanent, grâce à l'équation 1.1 (Tsilingiris, 2006a; Al-Sanea *et al.*, 2012). L'ajuster implique d'agir sur l'une ou sur l'ensemble des propriétés.

$$C = \sum_{i=1}^{n} \rho_i c_i d_i \tag{1.1}$$

Avec, C la capacité thermique de la paroi $[J/m^2 \cdot K]$, ρ la densité apparente $[kg/m^3]$, c la chaleur spécifique $[J/kg \cdot K]$, d épaisseur de la paroi $[m]$, i la i^{me} couche de matériau de la paroi.

L'intervalle des valeurs de densité est précisé à la section précédente (section 1.5). En ce qui concerne l'épaisseur, traditionnellement elle se situe entre 50 et 100 cm (Heathcote, 2011). Les parois en BTC sont, quant à elle, limitées à des épaisseurs de 14, 22 ou 29 cm (dimensions usuelles des moules de production). L'impact de l'épaisseur de la paroi n'est pas sans conséquence sur le confort thermique des bâtiments comme le montre la figure 1.27. Trois climats chauds sont concernés par l'étude (Adelaide, Longreach et Ballarat) et l'allure des courbes montre une amélioration du confort thermique avec l'augmentation de l'épaisseur.

Pour ce qui est des valeurs de chaleur spécifique elles se situent entre 500 et 1600 $J/kg \cdot K$ avec une moyenne autour de 830 $J/kg \cdot K$ (Moevus *et al.*, 2013; Mansour *et al.*, 2016), (cf. annexe A). C'est une grandeur extensive pouvant donc s'exprimer en fonction des capacités thermiques des constituants du milieu (Ingersoll, 1988).

La capacité thermique est directement reliée à la densité apparente, à l'épaisseur et à la chaleur spécifique. Pourtant, en régime dynamique, son ajustement n'est pas linéaire. La figure 1.28 montre l'évolution de la capacité thermique d'une paroi ($\lambda = 1.5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, $\rho = 2200 kg \cdot m^{-3}$, $c = 1000 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) en régime dynamique en fonction de l'épaisseur.

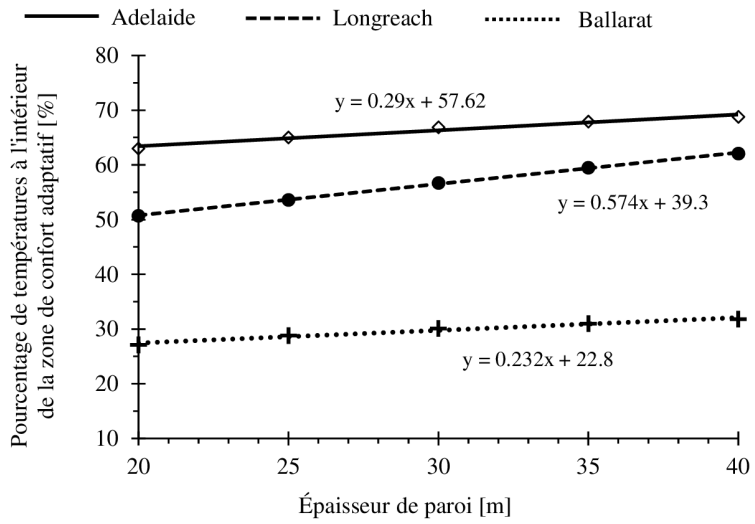


FIGURE 1.27: Effet de l'épaisseur de la paroi en terre sur le confort thermique, (données Dong *et al.* 2014a)

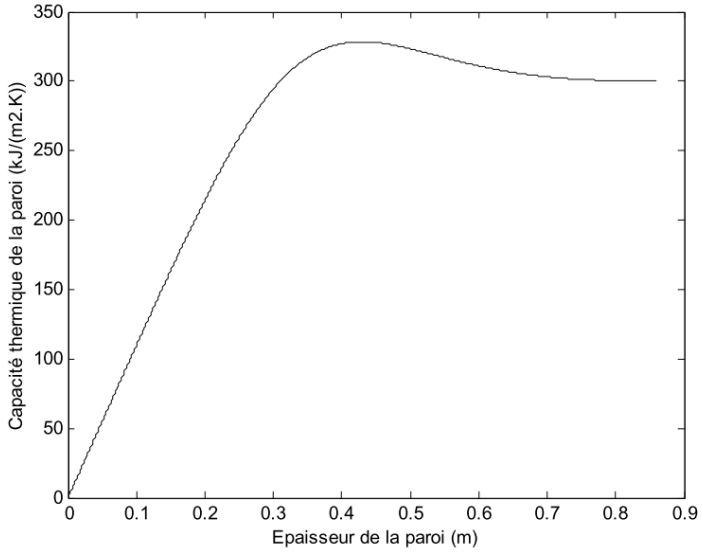


FIGURE 1.28: Variation de la capacité thermique en fonction de l'épaisseur, (Sambou, 2008)

La partie linéaire de la figure 1.28 explique les résultats obtenus à la figure 1.27. Cependant, est-ce à dire qu'au-delà d'une certaine épaisseur de paroi (d'une certaine capacité thermique) il n'y a plus d'amélioration du niveau de confort thermique ? Si tel est le cas, quelle en est la limite pour la terre crue ?

1.6 Conclusion

Le développement de modèles de construction responsable, en adéquation avec le mode de vie des sociétés dans lesquelles ils devraient être implémentés, semble complexe, tant les enjeux sont divers et multi-échelles. Si tout porte à pointer du doigt les pratiques de construction post-industrielles comme la cause de tous les maux (environnementaux à l'échelle mondiale, économiques et sociaux en Afrique Sub-saharienne), il est cependant impensable de nos jours à un retour total à une architecture traditionnelle, niant de ce faite toutes les avancées scientifiques et technologiques en la matière ainsi que les changements socio-anthropologiques opérés dans les sociétés.

Le cas des pays en développement d'Afrique, spécifiquement celui du Burkina Faso, est plus complexe en raison, en sus, de l'urbanisation accélérée, de la fragilité de l'économie, mais aussi des transformations au niveau social. Le secteur de la construction doit composer avec les exigences environnementales à l'échelle mondiale, les limites technologiques et les contraintes économique et climatique à l'échelle locale, tout en ayant comme responsabilité de penser la ville de demain.

À ce titre, la terre crue apporte une réponse efficace. Abandonnée d'antan par les pays du Nord, objet d'aversion en Afrique subsaharienne, elle est aujourd'hui, à bien des égards, une solution aux maux causés par le secteur de la construction. Cependant, son utilisation comme matériau doit être adaptée aux exigences contemporaines qu'impose l'habitat. C'est ainsi que la BTC, dans le contexte du Burkina Faso, se démarque des techniques de construction en terre crue.

La quête du confort thermique nécessite l'étude, l'ajustement des propriétés thermiques de la BTC afin d'en tirer le meilleur parti. L'état de l'art révèle l'efficacité de la paroi en terre crue vis-à-vis de l'amélioration de l'ambiance thermique intérieure dans les climats chauds, mais aussi une diversité de conception. La variation des valeurs de propriétés thermiques pose la question de la quantification de leurs impacts, individuels ou conjugués, sur le climat intérieur et de leur importance dans une démarche d'amélioration du climat intérieur. Là est la problématique scientifique à laquelle cette thèse est consacrée. La variation des propriétés thermiques de la BTC offre l'opportunité d'explorer le comportement thermique de l'habitat sous l'influence de diverses conceptions de paroi.

Le chapitre suivant formule avec plus de précision la question de recherche. Les objectifs ainsi que la démarche méthodologique y sont précisés.

Chapitre 2

Retour sur la question de recherche

Le chapitre précédent a pointé du doigt les transformations opérées sur l'architecture au Burkina Faso, notamment sur les types de parois mis en œuvre localement. Il ressort de l'état de l'art que la paroi en terre crue permet d'améliorer le confort thermique des habitats, mais aussi répond aux aspirations de modernité tout en restant économiquement avantageuse. Le présent chapitre capitalise l'état de l'art fait au chapitre 1 afin de préciser la question de recherche, d'établir les objectifs spécifiques ainsi que la démarche méthodologique.

Sommaire

2.1 Question de recherche 50
2.2 Objectifs et méthodologie 51
2.3 Structure méthodologique 54

2.1 Question de recherche

Les recherches sur les performances thermiques des parois en terre crue se focalisent sur la réduction de la transmission thermique à travers la conductivité (Meukam, 2004; Sore *et al.*, 2018; Ouedraogo *et al.*, 2015b). La pertinence de ne considérer que la transmission thermique comme gage de confort est insuffisante surtout pour des bâtiments sans système de conditionnement d'air. En effet, la masse thermique permet également d'agir sur l'ambiance thermique. Il convient donc, pour une amélioration substantielle, de considérer simultanément l'ensemble des propriétés thermophysiques que sont la conductivité, la densité, la chaleur spécifique et l'épaisseur de paroi.

De plus, la baisse de la conductivité thermique aurait davantage d'intérêt s'il était possible de parvenir à des valeurs suffisamment basses pour effectivement considérer le matériau comme un isolant. Or, la conductivité thermique la plus faible recensée dans la littérature pour ce qui concerne les briques de terre est de l'ordre de 0.5 $W/m.K$ (Moevus *et al.*, 2013). Cette valeur reste au-dessus de celle des isolants standards. La question de la pertinence des recherches visant à baisser la conductivité thermique des briques reste ouverte d'autant plus qu'elle implique une baisse de la densité. La paroi n'assure ni la fonction de résistance thermique ni celle de masse thermique. Il convient d'affecter une fonction thermique précise aux couches qui composent la paroi afin d'en tirer le meilleur parti.

La question de la capacité thermique optimale des parois en terre crue en lien avec l'interaction entre les occupants et leur habitat reste également ouverte. Certes, il est possible de déterminer la capacité thermique maximale d'une paroi extérieure (Sambou, 2008). Cependant, elle n'est pas synonyme de confort thermique surtout si le mode d'occupation des espaces de l'habitat est pris en compte.

L'hygroscopie de la terre permet de réguler l'humidité de l'air intérieur. Son processus implique un échange de chaleur qui pourrait contribuer à réguler la température de l'air intérieur. Cependant, la contribution de la chaleur latente à l'amélioration du climat intérieur doit être quantifiée dans le contexte climatique de Ouagadougou.

La présente thèse a pour objet d'apporter des connaissances scientifiques additionnelles en lien avec les zones d'ombres soulignées précédemment. La question de recherche est la suivante :

«**Quelles conceptions thermiques des parois en briques de terre comprimée pour l'amélioration du climat intérieur des habitats en climat chaud, spécifiquement à Ouagadougou ?**»

La conception thermique de la paroi en BTC pour le confort passe par l'étude de la réponse thermique de l'habitat. Les interdépendances entre les propriétés thermophysiques (cf. section 1.5) ainsi que les spécificités liées à

l'habitat doivent être considérées afin de traduire de manière précise la conception de la paroi. Aussi, il est plus pertinent d'aborder la conception de la paroi en affectant une fonction thermique précise aux couches qui la compose (c.-à.-d résistance ou masse thermique).

Le contexte climatique de cette recherche est celui de Ouagadougou, Burkina Faso. Cependant, la méthodologie développée dans la présente recherche est applicable à toutes les zones climatiques et peut même s'adresser à des bâtiments dont l'usage est autre que le logement.

2.2 Objectifs et méthodologie

Les objectifs spécifiques suivants ont été définis afin de répondre à la question de recherche :

Calibrer un logement type. Afin de représenter le comportement thermique de l'habitat burkinabè avec le plus de précision, un modèle thermique a été calibré grâce à des données expérimentales. L'atteinte de cet objectif a nécessité la détermination d'un habitat type, la collecte des données climatiques relatives à l'habitat, la détermination des propriétés thermiques de l'enveloppe, la modélisation thermique de l'habitat.

Établir la conception thermique optimum des parois. Sur la base du modèle de simulation thermique calibré, une étude paramétrique est réalisée sur les propriétés thermiques du matériau ainsi que les fonctions thermiques des différentes couches de la paroi. En prélude à l'étude paramétrique deux indicateurs sont définis. L'un est relatif au confort thermique et l'autre au comportement thermique de la paroi. L'impact des propriétés thermiques de la paroi sur le climat intérieur est étudié. Les résultats visés par une telle démarche sont l'identification des propriétés thermiques à même de contribuer au confort.

Définir l'impact des interactions entre les occupants et le bâtiment. Il s'est agi d'analyser l'impact des modes de renouvellement d'air et des profils d'occupation sur la réponse thermique. La sensibilité des résultats sur la conception de la paroi est testée en fonction de paramètres liés aux habitudes des occupants à savoir le mode de ventilation et le mode d'occupation des espaces. Le résultat visé est de définir ou d'ajuster les conceptions thermiques de la paroi en fonction des spécificités liées à un bâtiment à usage d'habitation.

Monitoring des performances thermiques des parois. L'atteinte de cet objectif s'est traduite par (i) l'implémentation in situ des différentes configurations de paroi, (ii) l'instrumentation et la collecte des données mesurées et par (iii) la détermination d'indicateurs de comparaison entre les parois. L'étude expérimentale est réalisée sur un bâtiment pilote en BTC et trois systèmes de parois sont étudiés. L'objectif premier de cette étude vise à confirmer les résultats obtenus par simulation thermique. L'impact de l'interaction occupant-habitat,

plus précisément ce qui concerne le mode de ventilation, est également étudié à travers cette étude expérimentale.

La figure 2.1 est le cadre logique qui illustre les objectifs ainsi que la méthodologie de la recherche.

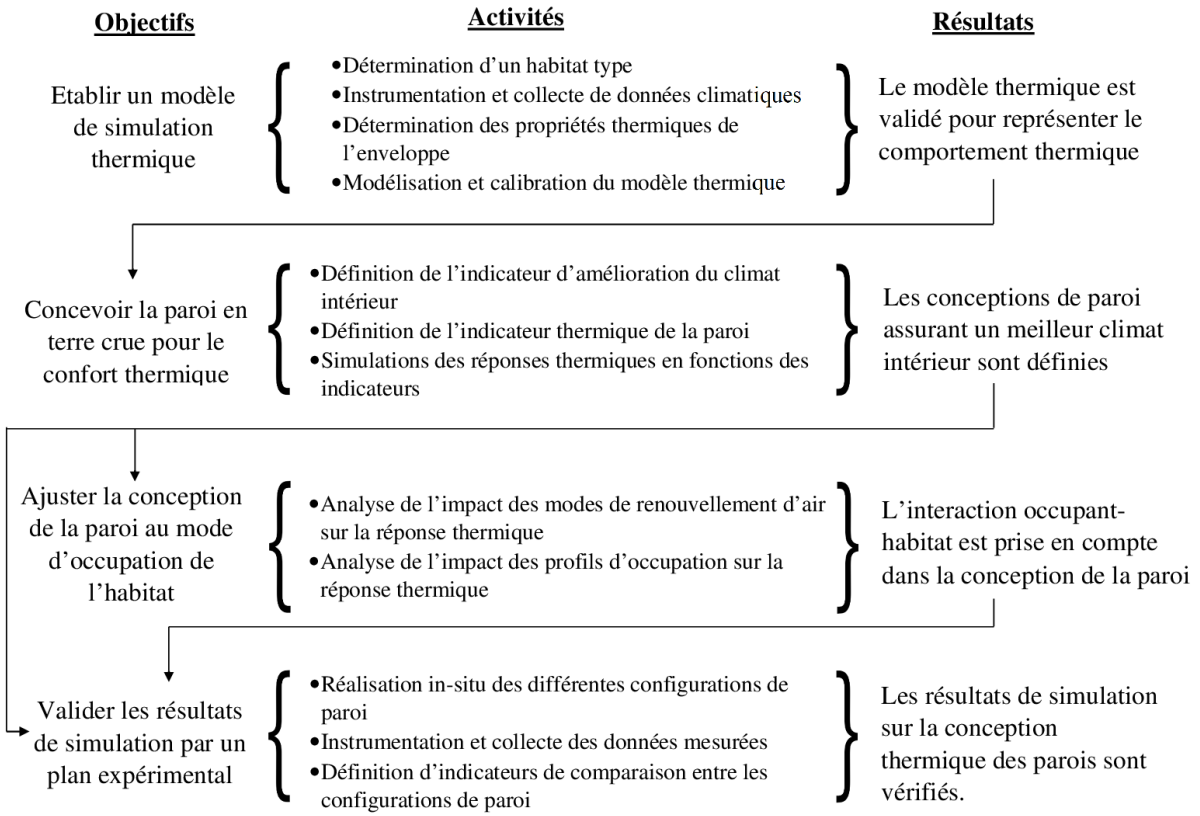


FIGURE 2.1: Cadre logique de la recherche

2.3 Structure méthodologique

En lien avec l'approche méthodologique, la suite de ce mémoire est organisé autour de trois chapitres :

- **Chapitre 3 : Modélisation thermique d'un bâtiment type, de la paroi et du confort**. La première partie de ce chapitre traite de la construction du modèle thermique. Le choix pertinent d'un habitat type et le suivi des variables environnementales ont permit de régler les paramètres du modèle de simulation thermique. Sur la base de critères de calibration définis et documentés, le modèle thermique est validé. La deuxième partie concerne la définition des indicateurs nécessaires afin de relier le climat intérieur à la conception de la paroi. À cet effet, les indices d'évaluation de l'ambiance thermique intérieure et de modélisation thermique de la paroi sont établis.
- **Chapitre 4 : Conception et optimisation des parois en BTC pour le confort thermique**. Les différents systèmes de parois étudiés sont décrits. Le comportement thermique de ces parois est appréhendé grâce à l'indicateur défini au chapitre 3. Il est identifié trois modes d'ajustement de cet indicateur susceptibles d'impacter l'ambiance thermique de l'habitat. Les spécificités liées à l'habitat sont intégrées et les résultats de conception thermique sont présentés.
- **Chapitre 5 : Étude expérimentale sur la performance thermique des parois en BTC**. Les systèmes de parois, étudiés par simulations thermiques au chapitre 4, sont implémentés afin d'étudier leur impact sur l'évolution de la température intérieure. Différents modes de ventilation sont également testés. Le monitoring des variables environnementales a permis de comparer la performance thermique des parois.
- Une **conclusion** viendra clore ce manuscrit. Les limites en ce qui concerne l'étude par simulation et l'expérimentation y sont explicitées. Les perspectives quant à ce vers quoi les recherches futures devraient se focaliser sont également énoncées.

Chapitre 3

Modélisation thermique d'un bâtiment type, de la paroi et du confort

Les modèles de simulation thermique des bâtiments jouent un rôle important en ce qui concerne l'évaluation des impacts des mesures de confort thermique ou d'économie d'énergie tant au stade de conception qu'au stade opérationnel. La conception de la paroi en terre crue en vu du confort thermique a nécessité de recourir à un modèle de simulation calibré mais aussi de définir le mode d'évaluation de la sensation thermique des occupants. Ce chapitre vise à mettre en place les outils nécessaires à la conception thermique de la paroi à savoir le modèle thermique de simulation, l'indicateur reflétant le comportement thermique de la paroi et celui relatif au confort thermique. La méthodologie de conception de ce modèle constitue la première partie de ce chapitre. La seconde partie a pour objet de définir du paramètre thermique lié aux propriétés de la paroi. Pour ce faire, l'état de l'art sur la modélisation du comportement thermique de la paroi est effectué. La troisième et dernière partie vise à définir l'indicateur de confort thermique adopté. L'état de l'art sur les modèles d'évaluation de la sensation thermique y est développé.

Sommaire

3.1 Conception d'un modèle thermique pour l'habitat . . . 56
3.2 Modélisation du comportement thermique de la paroi . 64
3.3 Modèles et indicateurs de sensation thermique 77
3.4 Conclusion 88

3.1 Conception d'un modèle thermique pour l'habitat

Vue la complexité de l'environnement bâti et au regard du grand nombre de variables, il est difficile, voir impossible, d'aboutir à un modèle dont la réponse reflète exactement le comportement thermique du bâtiment en situation réelle. Néanmoins, l'une des méthodes pour parvenir à un modèle dont le comportement se rapproche le plus de celui du bâtiment réel consiste à faire converger les données issues du modèle à celles mesurées expérimentalement. La calibration est le processus par lequel on s'assure que le modèle numérique représente de manière acceptable le comportement thermique qu'aurait un bâtiment en situation réelle. Cette section présente la méthodologie de calibration du modèle numérique. La première partie présente l'habitat type ainsi que la campagne de mesures. La seconde partie définit les critères de calibration du modèle. La troisième partie est consacrée au réglage du modèle thermique. La quatrième partie présente les résultats de calibration du modèle.

3.1.1 Habitat type et campagne de mesures expérimentales

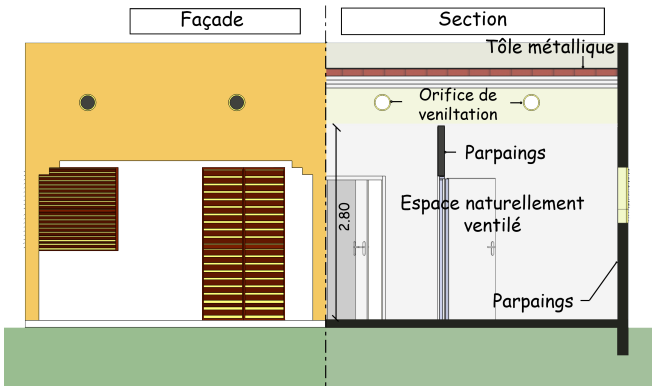
Des travaux de recherche visant à étudier les performances énergétiques des bâtiments en Afrique subsaharienne ont été menés par Kaboré 2015. Les informations de cette section, notamment la description du bâtiment, la campagne de mesures et les données mesurées, sont essentiellement issues de la recherche conduite par Kaboré 2015.

La mise en place d'un modèle thermique précis requiert des données mesurées expérimentalement et donc un bâtiment sur lequel un suivi de l'évolution des paramètres thermiques est effectué. La figure 3.1 illustre le bâtiment de type urbain sur lequel les mesures ont été réalisées. Le choix a été motivé par l'état de l'art (Cf. chapitre 1). Il s'agit d'un logement de la classe moyenne au Burkina Faso. Il a été construit dans le cadre d'un projet national visant la construction de logements sociaux dans le quartier de Bassinko (12°24' N 1°39' W).

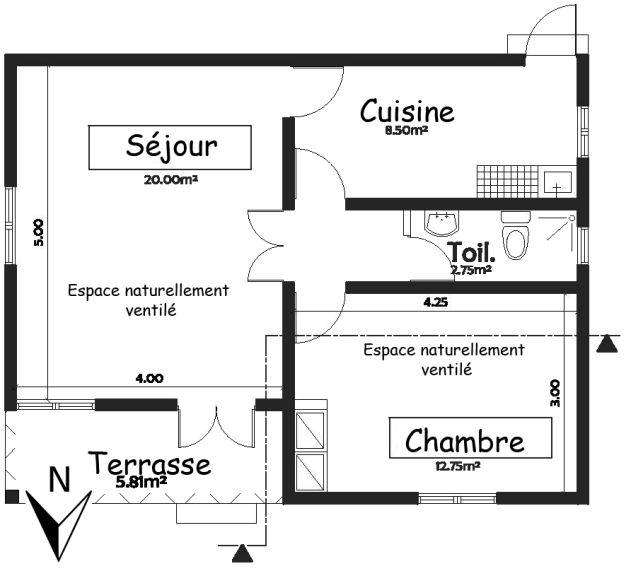
Le bâtiment se compose d'un séjour, d'une chambre, d'une salle d'eau et d'une cuisine. Sa superficie est d'environ 60 m^2 au sol. Les murs extérieurs consistent en une couche des parpaings de ciment alvéolés de 15 cm. Un enduit de ciment d'environ 2 cm recouvre les surfaces extérieures et intérieures des parpaings. Une couche de peinture de couleur rouge orangé et une autre de couleur blanche sont respectivement appliqués sur l'enduit extérieur et intérieur. Les cloisons ont la même composition que le mur extérieur à l'exception de la peinture blanche qui recouvre les deux faces. La toiture se compose d'une tôle en acier galvanisé pré-laquée d'une couleur rouge orangé, sans comble, donnant directement sur l'air intérieur du bâtiment. Le dallage est composé



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.1: Bâtiment expérimental : (a) façade principale, (b) coupe en élévation partielle et (c) vue en plan

d'un remblai latéritique sur lequel une couche de béton est coulée comme revêtement de finition. Les fenêtres, de dimensions 120 x 120 cm^2, 60 x 60 cm^2 et 100 x 60 cm^2, consistent en des jalousies métalliques qui permettent de contrôler l'ouverture et la fermeture. L'entrée principale du bâtiment est orientée 328 ° nord.

Le bâtiment, maintenu fermé durant le suivi, a été instrumenté de capteurs de température et d'humidité relative dont les mesures sont enregistrées suivant un pas horaire :

— Dans la zone du séjour et de la chambre, les capteurs, montés sur des trépieds à une hauteur de 1.10 m, ont permis d'enregistrer la température et l'humidité relative de l'air. L'absence de portes entre les pièces a imposé de considérer un échange d'air entre les deux zones.

— Sur les surfaces intérieures des parois les températures sont mesurées par contact des capteurs à la paroi.

Les capteurs de type PT100 "TG" de Waranet Solution, ayant une précision de 0.36 $°C$ (à 30.12 $°C$), ont été utilisés pour les mesures de température. Ceux de type PT100 " TH" ont servi à la mesure simultanée de la température et de l'humidité relative avec une précision de 0.12$°C$ (à 30.12 $°C$) et 2 % (de 3.0 à 99.7 % d'humidité relative) respectivement. Le bâtiment ne disposait d'aucune source de chaleur interne et n'était pas occupé durant la période de suivi.

Les variables climatiques extérieures sont mesurées grâce à la station météorologique automatique de l'Institut 2iE situé à Kamboinsé. Les données enregistrées sont la température sèche, l'humidité relative de l'air, l'ensoleillement direct normal et diffus horizontal.

L'ensemble des mesures ont couvert la période allant du 20 mars 2014 à 00h00 au 11 juin 2014 à 11h00, mais celle ayant servi de base à la calibration du modèle s'étale du 01er avril 2014 à 00h00 au 10 juin 2014 à 23h00. En effet, la période allant du 20 mars au 1er avril, soit 12 jours, a servi de période d'initialisation et de convergence du modèle. Il est ainsi considéré que cette période de 12 jours (soit 288 itérations à raison de 24 itérations/jour) est suffisante pour que le modèle thermique converge vers des valeurs affranchies des conditions initiales. Dans son étude, Kaboré 2015 a considéré une initialisation sur une période correspondant à 50 itérations.

3.1.2 Méthodes et critères de calibration

La calibration d'un modèle thermique consiste à régler les variables d'entrées d'un programme de simulation par ordinateur de sorte que les mesures faites in situ coïncident avec les prédictions du programme. Différentes approches de calibration existent (Coakley *et al.*, 2014; Kaboré, 2015) :

— **La calibration manuelle, itérative et pragmatique.** Elle se réfère à une itération de paramètres spécifiques par le modeleur sur base des

résultats de simulation.

— **La calibration sur la base de comparaisons de graphiques de données.** La comparaison visuelle des différences entre prédictions et mesures permet d'aboutir à la calibration.

— **La calibration sur tests spécifiques et procédures analytiques.** Les mesures expérimentales obtenues sur une courte période sont utilisées pour évaluer certains paramètres de simulation.

— **La méthode de calibration analytique et mathématique.** Des méthodes comme l'analyse des incertitudes ou de la sensibilité sont utilisées.

La calibration manuelle, itérative et pragmatique est celle adoptée, car elle est celle qui s'appuie directement sur les résultats de simulations thermiques. Les indices statistiques utilisés pour évaluer la qualité du modèle thermique sont basés sur l'estimation des différences entre les résultats de simulation et les données mesurées. À cet effet, les indices statistiques suivants sont proposés (Bou-Saada et Haberl, 1995; Coakley *et al.*, 2014) :

— L'erreur de biais normalisé (*mean bias error, MBE*) est un indice adimensionnel qui estime la différence moyenne entre mesures et simulations. Cependant, les différences positives peuvent compenser celles négatives et il convient de lui associer un autre indicateur, RMSE.

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N}(m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{N}(m_i)} \tag{3.1}$$

— L'erreur quadratique moyenne (*root mean square error, RMSE*) est une estimation de la variabilité des données. Les erreurs, c'est-à-dire les différences entre les paires de données, sont élevées au carré avant d'être additionnées sur la période totale considérée. Cette somme est ensuite divisée par le nombre de points que comporte la période.

— Le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (*coefficient of variation of root mean square error CV(RMSE)*) permet de déterminer à quel point le modèle reflète les données mesurées

$$CV(RMSE)(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(m_i - s_i)^2/N}}{\bar{m}} \tag{3.2}$$

Avec, m_i et s_i respectivement les valeurs mesurées et simulées pour chaque occurrence *i*, $\bar{m}$ la valeur moyenne des données mesurées, N le nombre de points de l'intervalle de mesure/simulation.

La validation des modèles de simulation énergétique des bâtiments est actuellement basée sur une conformité des modèles aux critères CV(RMSE) et MBE. Les valeurs de CV(RMSE) et MBE à atteindre varient selon que le

modèle est calibré en fonction de données mensuelles ou horaires. Les modèles de simulation énergétique sont généralement considérés calibrés s'ils répondent aux critères définis par ASHRAE Guideline 14 à savoir $MBE < 0.1$ et $CV(RMSE) < 0.3$ si le modèle est calibré sur une base horaire ($MBE < 0.05$ et $CV(RMSE) < 0.15$ si base mensuelle) (ASHRAE, 2002). Cela signifie qu'une fois qu'il existe un accord raisonnable entre les données mesurées et les données simulées, le modèle peut être considéré comme calibré selon les critères actuels d'acceptation pour les modèles traitant de la performance énergétique des bâtiments.

Un indicateur supplémentaire, le coefficient de détermination R^2, peut être utilisé pour traiter de la qualité de l'ajustement d'un modèle par rapport aux données mesurées. En règle générale, pour traiter de la performance de la prédiction, la valeur de R^2 ne doit jamais être inférieure à 0.75. En ce qui concerne la validation de la qualité de l'air intérieur, il est recommandé une valeur de $R^2 > 0.90$. La pente de la ligne de régression doit être comprise entre 0.75 et 1.25 et l'ordonnée à l'origine inférieure à 25% de la mesure moyenne (ASHRAE Handbook, 2009).

3.1.3 Outil de modélisation et réglages du modèle thermique

L'outil de modélisation et de simulation thermique utilisé est WUFI Plus v2.5.1.0. Ce logiciel a été développé au *Fraunhofer-Institut for Building Physics* pour modéliser le transfert et le stockage de chaleur et d'humidité dans les composants du bâtiment. En plus de simuler les conditions hygrothermiques dans les composants du bâtiment, WUFI Plus v2.5.1.0 permet de prédire le climat intérieur. La modélisation mathématique est basée sur les équations d'équilibre de chaleur (équation 3.3) et d'humidité (équation 3.4) (Künzel, 1995; Evrard, 2008).

$$\lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial^2 x} = \rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + L \cdot \Omega(\mu, T(x,t)) \tag{3.3}$$

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial x} \right) + \Omega(\mu, T(x,t)) \tag{3.4}$$

Avec, L la chaleur latente d'évaporation, condensation de l'eau considérée égale à $2257\ kJ \cdot kg^{-1}$ (approximation suffisante pour ce qui concerne les températures et humidités en physique du bâtiment, cf. figure 3.6), $\Omega\ (\mu, T(x,t))$ le taux de production de masse de vapeur due aux changements de phase $[kg \cdot s^{-1}]$, u la teneur en eau $[-]$, HR l'humidité relative $[-]$, ρ_w la densité de l'eau $[kg \cdot m^{-3}]$, D_w le coefficient de transport liquide $[m^2 \cdot s^{-1}]$.

Les matériaux de construction utilisés pour la réalisation de l'habitat type F2 ont été modélisés par leurs propriétés thermiques. Un processus itératif a

permis d'arrêter les valeurs optimisées qui figurent dans le tableau 3.1. Ce même processus itératif a conduit à considérer un renouvellement d'air de 0.2 Vol/h (infiltration). Dans le tableau 3.1, les valeurs des propriétés thermiques optimisées sont comparées à celles obtenues par Kaboré 2015. Les différences constatées sont faibles et peuvent s'expliquées par la période de calibration (72 jours dans la présente recherche contre 10 jours pour Kaboré 2015).

TABLE 3.1: Propriétés thermiques optimisées pour la modélisation de l'enveloppe de l'habitat

Système constructif	Paramètre thermique		Valeur optimum	Valeur optimum Kaboré
Paroi extérieure	$\lambda_{coating}$	$[W/m.K]$	1.16	1.189
	$\rho_{coating}$	$[kg/m^3]$	1600	1590
	$C_{coating}$	$[J/kg.K]$	1000	900
	$d_{coating}$	$[m]$	0.02	0.015
	λ_{HCB}	$[W/m.K]$	0.84	0.867
	ρ_{HCB}	$[kg/m^3]$	950	900
	C_{HCB}	$[J/kg.K]$	950	900
	d_{HCB}	$[m]$	0.15	0.15
	α_s	$[-]$	0.40	0.47
	ϵ	$[-]$	0.95	0.95
Toiture	λ_{sheet}	$[W/m.K]$	50	50
	ρ_{sheet}	$[kg/m^3]$	7800	7800
	C_{sheet}	$[J/kg.K]$	450	450
	d_{sheet}	$[m]$	$15*10^{-4}$	-
	α_s	$[-]$	0.39	0.45
	ϵ	$[-]$	0.95	0.85
Porte, fenêtres	ϵ	$[-]$	0.85	-
	SHGC	$[-]$	0.73	-
	U-value	$[W/m^2.K]$	5	-
Sol	$\lambda_{concrete}$	$[W/m.K]$	1.4	-
	$\rho_{concrete}$	$[kg/m^3]$	2100	-
	$C_{concrete}$	$[J/kg.K]$	775	-
	$d_{concrete}$	$[m]$	0.10	-

3.1.4 Résultats de calibration du modèle

La calibration du modèle s'est basée sur (i) la température de l'air intérieur du séjour, (ii) la température de l'air intérieur de la chambre, (iii) l'humidité relative de l'air intérieur du séjour et (iv) la température de surface intérieure de la paroi Sud.

Le tableau 3.2 montre le résultat de la calibration. Les valeurs des indices statistiques *MBE* et *CV(RMSE)* des températures et humidités relatives sont inférieurs aux limites requises pour la validation du modèle de simulation thermique énergétique. Autrement dit, le modèle thermique est à même de

représenter de façon acceptable le comportement thermique du bâtiment et est considéré calibré. Cependant, le coefficient de détermination R^2 ainsi que les conditions sur la régression apportent une précision supplémentaire au modèle.

TABLE 3.2: Évaluation des critères de calibration du modèle thermique

Indice Statistique	Condition	Température de l'air du séjour	Température de l'air de la chambre	Humidité relative du séjour	Température de surface de la paroi sud
MBE	<0.10	0.038	0.026	-0.080	0.052
CV(RMSE)	<0.30	0.050	0.034	0.122	0.066

La figure 3.2 montre les régressions entre valeurs expérimentales et simulées. Sur la figure 3.2 (a), relative à la température de l'air du séjour, la pente ainsi que l'abscisse à l'origine sont conformes aux recommandations formulées par ASHRAE Handbook 2009 ($0.75 < 0.96 < 1.25$ et $2.53 < 0.25 \cdot 34.3$ respectivement). Le coefficient de détermination R^2 est inférieur à la valeur recommandée pour la qualité de l'air, mais supérieur à celle recommandée pour assurer la fiabilité de la prédiction ($0.75 < 0.86 < 0.90$). La figure 3.2 (b) concerne la température de surface de la paroi sud. Les résultats qui y figurent sont similaires à ceux du séjour : les valeurs de pente et d'abscisse à l'origine sont conformes, tandis que la valeur de R^2 est comprise entre 0.75 et 0.90. Les figures 3.2 (c) et (d) présentent les régressions sur la température de la chambre et sur l'humidité relative de l'air. L'ensemble des paramètres sont conformes aux recommandations formulées par American Society of Heating et Engineers 2009.

Les valeurs de $R^2 < 0.90$ obtenues dans le séjour peuvent s'expliquer par les inconsistances constatées dans les données mesurées. En effet, entre deux mesures consécutives, des différences de températures supérieures à $6\,^\circ C$ (38 occurrences) sont constatées sur la température de l'air extérieur. Dans 51 % des cas, ces sauts de températures se produisent entre 07h00 et 8h00. L'hypothèse la plus probable est un défaut de l'isolation des capteurs. Ainsi, l'influence de la radiation solaire pourrait être la cause de la forte augmentation de température.

Néanmoins, le modèle thermique est calibré. Les valeurs des indices statistiques MBE et $CV(RMSE)$ respectent les critères de calibration thermique des bâtiments. Les valeurs recommandées de pentes et d'abscisses à l'origine des régressions sont atteintes. Les valeurs de R^2 obtenues indiquent la performance du modèle à prédire le comportement thermique de l'habitat.

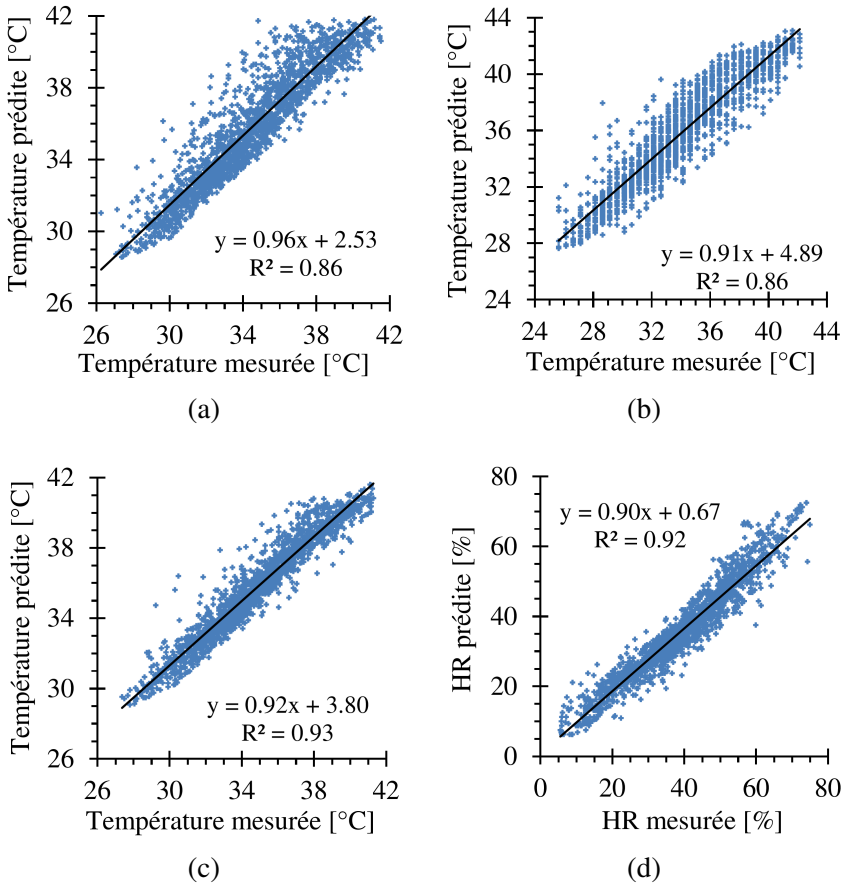


FIGURE 3.2: Régression entre valeurs mesurées et valeurs prédites (a) température de l'air du séjour, (b) température de surface de la paroi sud, (d) température de l'air de la chambre et (d) humidité relative du séjour

3.2 Modélisation du comportement thermique de la paroi

Cette section reprend les mécanismes liés au transfert de chaleur à travers les parois en terre. La première partie présente les grandes lignes de modélisation du matériau. La seconde partie est consacrée à la description du transfert de chaleur par conduction, tandis que la troisième partie décrit le transfert de chaleur lié à l'évaporation et à la condensation. La quatrième partie a pour objet de définir un indicateur du comportement thermique de la paroi.

3.2.1 Modélisation du matériau terre

La terre crue est constituée d'une matrice solide dans laquelle des vides forment un espace poreux. Les transferts de chaleur et de masse à travers la paroi découlent de cette structure. La figure 3.3 illustre les différents modes de transfert à travers le matériau. La matrice solide sert de support au transfert de

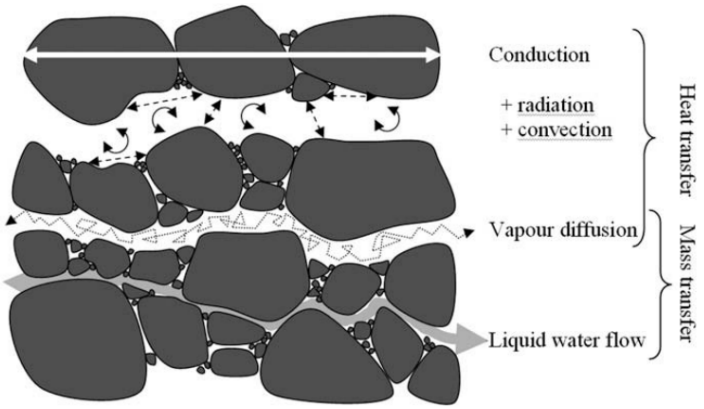


FIGURE 3.3: Représentation des mécanismes de transfert de masse et de chaleur à travers les matériaux poreux(Hall et Allinson, 2009a)

chaleur par conduction, tandis que dans les pores la chaleur est transférée par convection ou rayonnement. Cependant, les quantités de chaleur issues de ces deux modes de transfert sont négligeables face au transfert par conduction. De plus, la mesure de la conductivité thermique apparente du matériau englobe l'effet de la convection et du rayonnement dans les pores. Par conséquent, seul le transfert par conduction sera présenté par la suite (cf. section 3.2.2).

L'espace poreux est constitué de pores dans lesquelles règnent des fluides sous forme liquide, gazeuse, voire même solide. Suivant la taille, les pores sont classés en 3 catégories (Daïan, 2013) :

— **Les micropores :** il s'agit de pores de diamètres inférieurs à 2 nm. La taille très réduite des pores rend inapplicables les propriétés ordinaires des fluides telles que la viscosité ou la pression. À cette échelle, l'étude du comportement des fluides contenus dans les pores relève de la dynamique moléculaire.
— **Les mésopores :** le diamètre des pores se situe entre 2 et 50 nm. Les dimensions sont suffisantes pour la présence d'une phase liquide qui interagit avec l'atmosphère ambiante.
— **Les macropores :** le diamètre des pores est supérieur à 50 nm.

La terre crue est composée pour une part non négligeable de micropores et de mésopores, toutes choses qui lui confère son caractère hygroscopique, c'est à dire capable de fixer de l'eau en présence d'une atmosphère humide non saturante. Les mécanismes de transfert de masse à travers l'espace poreux ne sont pas décrits ici, car la présente recherche est focalisée sur l'aspect thermique. Cependant, les implications thermiques des échanges de masse sont étudiées.

3.2.2 Transfert de chaleur : conduction

La modélisation du transfert de la chaleur par conduction nécessite la *macropisation* du matériau c'est-à-dire de le considérer comme homogène bien que plusieurs phases en présence le composent (cf. section 3.2.1). En effet, la formulation des grandes lois de la physique est le résultat de l'homogénéisation, explicité ou non, d'une réalité qui est essentiellement discrète à l'échelle moléculaire (Daïan, 2013). L'homogénéisation implique des propriétés de la matière uniformes et invariables et donc de faire abstraction des dépendances et interdépendances énoncées à la section 1.5 du chapitre 1.

La modélisation du transfert de la chaleur par conduction est faite sur la base de l'équation d'équilibre du stockage de chaleur dans une section. Pour l'établir, considérons une paroi plane, finie, aux propriétés thermophysiques constantes, sans source interne de chaleur et dont la surface est exposée à une variation sinusoïdale dans le temps de la température T_1 (figure 3.4 (a)). Les dimensions de la paroi sont telles que la conduction n'est importante que dans la direction Ox (hauteur et longueur très grande par rapport à l'épaisseur).

Le flux de chaleur $q(x,t)$ sous l'effet du gradient de température $T(x,t)$ est donné par l'équation 3.5.

$$q(x,t) = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \tag{3.5}$$

Considérons maintenant une petite section à l'intérieure de la paroi comme illustrée par la figure 3.4 (b) et établissons le bilan énergétique sous l'effet d'un flux entrant q_x et d'un flux sortant $q_{x+\Delta x}$. La variation du flux de chaleur est $(q_{x+\Delta x} - q_x)/\Delta x$. Quand $\Delta x \longrightarrow 0$, on peut écrire $\partial q(x,t)/\partial x$. Cette

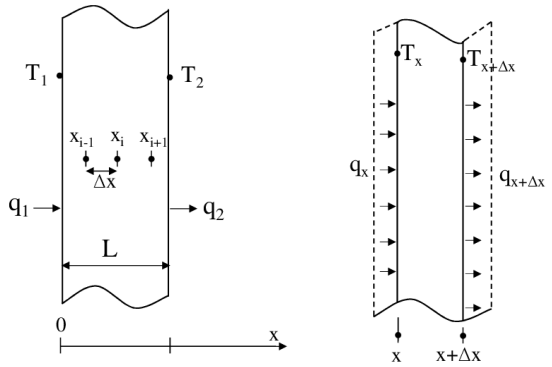


FIGURE 3.4: Schéma d'une paroi mono couche : (a) contraintes extérieures, (b) bilan de chaleur dans une tranche intérieure

variation doit être équilibrée par la quantité de chaleur stockée dans la section qui vaut $\rho c(\partial T(x,t)/\partial t$. L'équation d'équilibre est donnée par 3.6 :

$$\lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial^2 x} = \rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \tag{3.6}$$

Le flux de chaleur par conduction à travers un milieu dans une direction définie est proportionnel au gradient de température de part et d'autre de la section considérée.

Plusieurs méthodes analytiques et numériques permettent de résoudre l'équation aux dérivées partielles de la conduction de chaleur en utilisant soit la méthode de transformée de Laplace, la méthode de séparation de variables, les méthodes des différences et des éléments finis, etc. Les résultats présentés ici sont basés sur la transformée de Laplace.

La transformée de Laplace permet d'exprimer les températures et les flux de surface sous forme complexe. Ils sont notées $\widetilde{T_1}$, $\widetilde{T_2}$, $\widetilde{q_1}$ et $\widetilde{q_2}$. Il existe une relation linéaire entre les grandeurs d'entrée et ceux de sortie :

$$\begin{array}{l} \widetilde{T_2} = A \cdot \widetilde{T_1} + B \cdot \widetilde{q_1} \\ \widetilde{q_2} = C \cdot \widetilde{T_1} + D \cdot \widetilde{q_1} \end{array} \rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{\mathrm{T}}_2 \\ \tilde{\mathrm{q}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathrm{T}}_1 \\ \tilde{\mathrm{q}}_1 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

En supposant la paroi composée de n-couches de matériaux homogènes, la relation linéaire s'écrit :

$$\begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{T_2} \\ \widetilde{q_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \ldots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{T_1} \\ \widetilde{q_1} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

Les coefficients A_i, B_i, C_i et D_i sont fonction des paramètres thermiques du matériau, de l'épaisseur de la paroi ainsi que de la fréquence du phénomène

thermique. Ils s'écrivent sous forme complexe :

$$A_i = D_i = cosh(\xi)cos(\xi) + jsinh(\xi)sin(\xi)$$

$$B = -\frac{\delta}{2\lambda}\{sinh(\xi)cos(\xi) + cosh(\xi)sin(\xi) + j[cosh(\xi)sin(\xi) - sinh(\xi)cos(\xi)]\}$$

$$C = -\frac{\lambda}{\delta}\{sinh(\xi)cos(\xi) - cosh(\xi)sin(\xi) + j[sinh(\xi)cos(\xi) + cosh(\xi)sin(\xi)]$$

$$\xi = \left[\frac{\pi\rho c}{P\lambda}\right]^{1/2} \cdot d \qquad \delta = \left[\frac{\lambda P}{\pi\rho c}\right]^{1/2}$$

Des propriétés thermiques d'intérêt peuvent être obtenues grâce à la transmittance thermique, X, qui est définit comme étant l'amplitude de la densité du flux de chaleur d'un côté quand l'amplitude de température sur cette même face vaut zéro, équation 3.9.

$$X = \left.\frac{\widetilde{q}_2}{\widetilde{T}_1}\right|_{\widetilde{T}_2=0} = -\frac{1}{Z_2} \tag{3.9}$$

Son module est la magnitude de la transmittance tandis que son argument correspond au déphasage entre le flux $\widetilde{q}_2$ et la température $\widetilde{T}_1$ Davies (1994). En normalisant le module de la transmittance thermique en régime dynamique, $|X|$, à celui en régime permanent noté U_o (U-value), l'on déduit l'amortissement thermique, f.

$$f = \frac{|X|}{U_o} \tag{3.10}$$

L'admittance isotherme est le ratio entre le flux de chaleur, $\widetilde{q}_2$ et l'excitation qui en est la cause $\widetilde{T}_2$ du même coté de la paroi quand l'amplitude de température $\widetilde{T}_1 = 0$:

$$Y = \left.\frac{\widetilde{q}_2}{\widetilde{T}_2}\right|_{\widetilde{T}_1=0} = -\frac{Z_1}{Z_2} \tag{3.11}$$

3.2.3 Transfert de chaleur : chaleur latente

L'air qui transite dans les pores de la terre crue est chargé d'une certaine quantité de vapeur d'eau qui peut être adsorbée à la surface de ces derniers. Deux théories permettent d'expliquer l'adsorption. La première est une

condensation de l'eau dans les pores avec comme hypothèse qu'à l'échelle moléculaire la condensation peut avoir lieu à une pression inférieure à la pression de vapeur saturante. La seconde suppose que la surface du pore induit un dipôle dans la première couche de molécules qui se fixe à elle, qui à son tour, induit un dipôle dans la couche suivante et ainsi de suite. Cette dernière hypothèse est la base des travaux ayant conduit à la théorie de BET qui semble le mieux convenir à l'explication de l'adsorption (Brunauer *et al.*, 1938). Les molécules d'eau recouvrent, dans un premier temps, une couche superficielle des pores lorsque l'humidité de l'air qui transite est faible. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une couche recouvrant toute la surface externe des pores. Une augmentation de l'humidité de l'air aura pour conséquence la formation d'autres couches qui viendront se superposer à la première. Enfin, lorsque l'hygrométrie devient très élevée, les couches d'eau se rejoignent pour former un ménisque. L'eau est maintenue à la surface des pores par les forces capillaires, ce qui entraîne le remplissage des pores les plus fins puis des pores plus gros. La figure 3.5 résume le phénomène d'adsorption d'eau dans la matrice poreuse des matériaux.

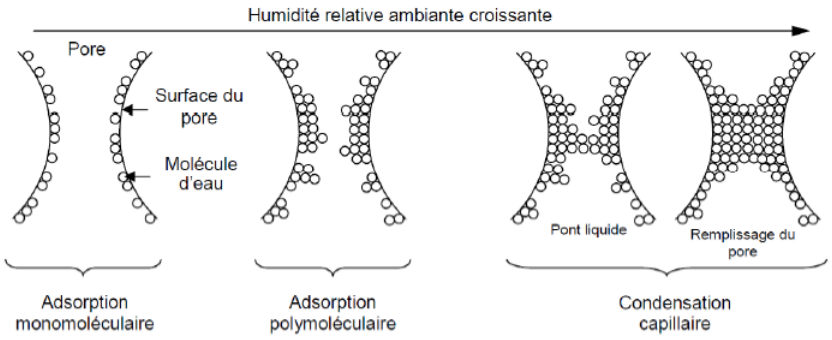


FIGURE 3.5: Représentation schématique du phénomène d'adsorption, (Chamoin, 2013)

La structure poreuse de la terre et son affinité physico-chimique avec l'eau font qu'elle contient toujours une proportion d'eau sous forme liquide adsorbée par les parois des pores. Cette eau est susceptible de s'évaporer ou de se condenser à nouveau en fonction des conditions thermiques et hygrométriques extérieures. Ce changement d'état implique l'absorption d'énergie lorsque l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux ou la libération d'énergie dans le processus inverse. La chaleur latente, $L(T, RH)$, mise en œuvre dans le processus d'évaporation de l'eau, fait de la terre un matériau à changement de phase (Soudani *et al.*, 2016).

Très peu d'études se sont penchées sur l'estimation de l'impact de la chaleur latente sur le climat intérieur d'un bâtiment. Allinson et Hall 2010 ana-

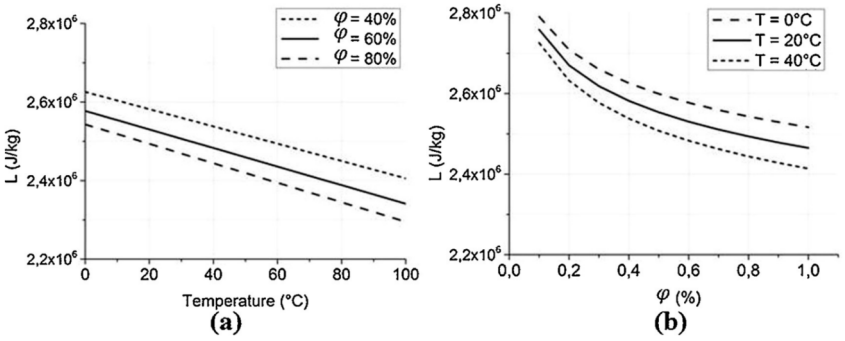


FIGURE 3.6: Chaleur latente d'évapo-condensation de l'eau en fonction de la température (a) et de l'humidité relative (b), (Soudani *et al.*, 2016)

lysent l'impact de différents revêtements appliqués à un mur en pisé (SRE) sur le climat intérieur d'une chambre de 12 m^2 . L'application des revêtements a pour objectif de modifier la perméabilité à la diffusion de la vapeur d'eau, allant d'un revêtement perméable (Plaster board) à un revêtement imperméable (Foil). Ainsi, les différences constatées entre les profiles de températures pour chaque type de revêtement sont dues à la chaleur d'évaporation et de condensation, les propriétés thermiques des murs restant inchangées. Les résultats de cette étude sont illustrés par les figures 3.7 (a) et (b). Le taux d'humidité relative de l'ambiance est fonction de la perméabilité à la diffusion de la vapeur d'eau contrairement à la température de l'air. Une conclusion est donc que l'impact de la chaleur d'évaporation et de condensation sur la température de l'air est très faible.

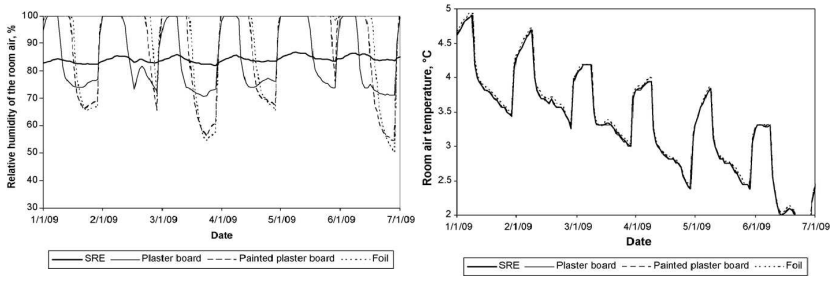


FIGURE 3.7: Impact de la perméabilité à la vapeur d'eau sur le climat intérieur : (a) humidité relative, (b) température de l'air, (Allinson et Hall, 2010)

Janssens et De Paepe 2005 ont évalué la sensibilité des modèles numériques de transfert de masse à la prédiction du climat intérieur d'un bâtiment en béton cellulaire. Trois modèles sont étudiés à savoir *EMPD*, *EMPD2* et

HAM. Les deux premiers modèles considèrent que seulement une fine couche près de la surface intérieure interagit avec l'ambiance (couche non isotherme pour le modèle *EMPD* et isotherme pour *EMPD2*). Le modèle HAM considère l'influence de l'humidité sur le transfert de chaleur, c'est-à-dire l'impact de la chaleur latente. Les courbes d'humidité relative en fonction des modèles sont présentées à la figure 3.8.

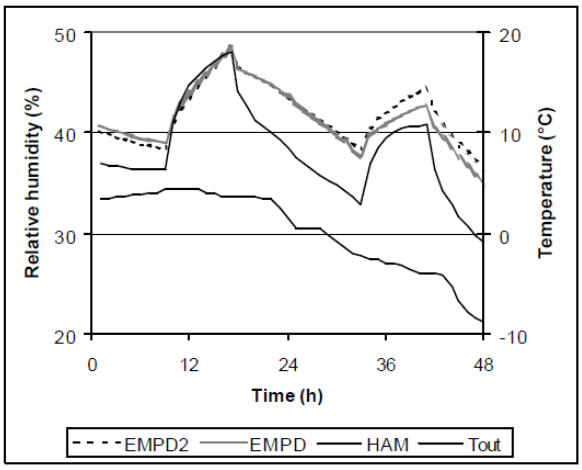


FIGURE 3.8: Impact des modèles de simulation sur l'évolution de l'humidité relative, (Janssens et De Paepe, 2005)

Le modèle HAM se différencie des deux autres modèles (EMPD et EMPD2) par une humidité relative globalement inférieure. Cependant, les résultats sur les températures intérieures (tableau 3.3) ne montrent pas de différences significatives entre les modèles.

TABLE 3.3: Températures intérieures en fonction du modèle thermique de simulation, (Janssens et De Paepe, 2005)

	Moyenne	Minimum	10-percentile	90-percentile	Maximum
HAM	20.1	20	20	20	26.8
EMPD	20.1	20	20	20	26.5
EMPD2	20.1	20	20	20	26.5

Ces résultats montrent le faible impact de la chaleur latente sur les températures intérieures (HAM vs. EMPD et EMPD2). Bien que le caractère plus hygroscopique de la terre crue (comparativement au béton cellulaire) laisse supposer un flux de masse plus important, il est raisonnable de conclure, même pour ce matériau, que la chaleur latente d'évaporation et de condensation à une influence très faible sur la sensation thermique.

C'est également une des conclusions à laquelle la présente recherche a

abouti (Hema *et al.*, 2017). L'évolution du flux de chaleur et de la température de la surface intérieure d'un mur en BTC a été simulée à l'aide de deux modèles. Le premier, purement thermique et nommé *Th*, consiste en la résolution de l'équation de conduction de chaleur (Cf. équation 3.6). Le second, *Hy-Th* intègre l'influence de la chaleur latente suivant l'équation 3.3. La conductivité thermique est maintenue constante afin de n'évaluer que l'impact de la chaleur latente.

Le climat de part et d'autre de la paroi BTC est présenté à la figure 3.9

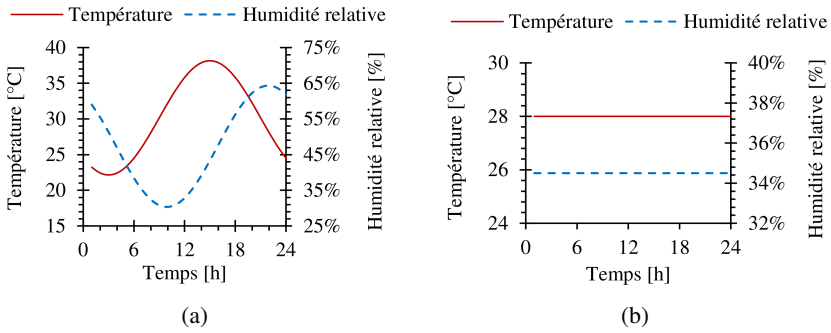


FIGURE 3.9: Température et de l'humidité relative adoptées pour l'évaluation de l'impact de la chaleur latente de la BTC (a) climat extérieur, (b) climat intérieur

La figure 3.10 montre les résultats de l'évolution des flux de chaleur et des températures de la surface intérieure de la paroi BTC. L'allure sinusoïdale

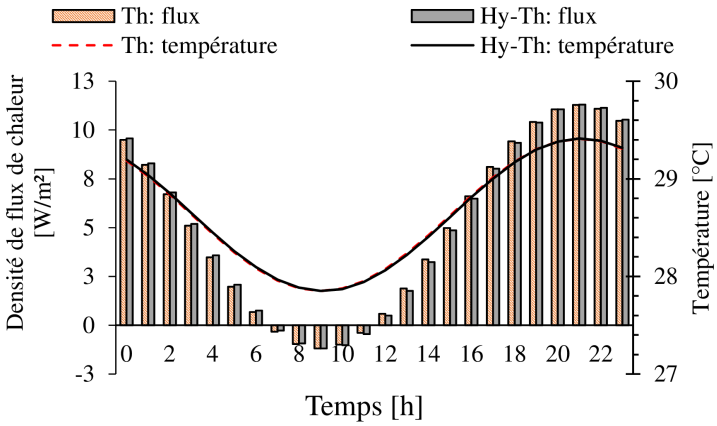


FIGURE 3.10: Évolution des flux de chaleur et des températures de la surface intérieure d'une paroi BTC en fonction du modèle de simulation

des courbes est à l'instar de l'oscillation extérieure de température. Les flux de chaleur et les températures, calculés suivant les deux modèles, sont quasi identiques. Les différences maximales observées entre les modèles *Th* et *HyTh* sont $0.13W \cdot m^{-2}$ et de $0.016°C$ respectivement pour le flux de chaleur et la température de surface.

De ce qui précède, il est possible de conclure que l'hygroscopie de la paroi en terre crue participe à la régulation de l'humidité relative de l'air intérieur. Cependant, la contribution de la chaleur latente aux échanges de chaleur l'échelle globale est très faible. Par conséquent, cette dernière ne sera pas considérée dans la suite de la recherche et l'optimisation concernera les propriétés thermophysiques de la paroi.

3.2.4 Essai de caractérisation thermique

Selon la norme ISO 13786, le comportement thermique (transfert par conduction) de la paroi est complètement caractérisé à travers la transmittance isotherme X, l'admittance isotherme Y et le facteur d'amortissement f en régime dynamique (NF ISO 13786, 2007). Cependant, la matrice de transfert de chaleur et les trois propriétés sus-citées sont fonction uniquement de deux paramètres (cf. équation 3.8) : l'épaisseur cyclique ξ et le ratio $\delta/2\lambda$. Le ratio $\delta/2\lambda$ est indépendant de l'épaisseur de la paroi, mais fonction des propriétés du matériau sous la forme du produit $\lambda\rho c$. L'épaisseur cyclique ξ, quant à elle, considère les propriétés du matériau sous la forme $(\rho c)\lambda^{-1}$ et donne une interprétation directe de l'influence de l'épaisseur sur le comportement thermique de la paroi. ξ à pour unité le radian, mais il convient de le considérer dans le sens physique comme l'épaisseur adimensionnelle de la paroi. Une faible valeur de l'épaisseur cyclique ($\xi \leq 0.1$) représente une paroi " mince" dans le sens que la différence de température des surfaces est faible tandis que pour $\xi \geq 3$ l'excitation sur l'une des surfaces a un effet relativement faible sur l'autre surface (Davies, 1994). La valeur de ξ détermine à la fois la capacité de la paroi à transmettre le flux de chaleur dû à une excitation (cf. équation 3.9) ainsi que sa capacité à en stocker (cf. équation 3.10).

La recherche des propriétés thermiques optimales de la paroi en terre crue nécessite de tenir compte de l'ensemble des variables susceptibles d'impacter le climat intérieur. La caractérisation thermique par l'intermédiaire de la transmittance, de l'admittance et du facteur d'amortissement peut s'avérer fastidieuse du fait d'un nombre de variable important. L'épaisseur cyclique ξ permet de tenir compte de l'épaisseur de la paroi et des propriétés thermiques du matériau. Elle permet une caractérisation "simplifiée" du comportement thermique de la paroi en ce sens qu'une valeur déterminée de ξ donne lieu à une multitude de combinaison de $\lambda,\ \rho,\ c$, et d. Autrement dit, pour une valeur déterminée de ξ, la réponse thermique est susceptible de varier en fonction des

valeurs que prennent les propriétés thermiques de la paroi. Pour définir les limites de l'épaisseur cyclique comme indicateur du comportement thermique de la paroi un plan de simulation thermique a été établi.

Plan de simulation

Pour chaque valeur que peut prendre l'épaisseur cyclique, ξ, il existe plusieurs possibilités de combinaison des propriétés thermiques permettant d'aboutir à cette valeur. L'objectif est de vérifier l'hypothèse selon laquelle à une valeur de ξ correspond, en moyenne, une réponse thermique. La réponse thermique est mesurée grâce à la température opérative moyenne et à l'indicateur *WEH*. Ces derniers sont décrits plus loin dans la thèse (cf. section 3.3.4), ici considérons qu'il s'agit de paramètres qui définissent le climat intérieur. Le modèle thermique calibré de l'habitat type est utilisé (cf. section 3.1). D'une simulation thermique à l'autre, les propriétés thermiques des parois extérieures sont ajustées afin de converger vers des valeurs définies de ξ.

L'analyse statistique est basée sur l'écart-type ainsi que sur le test-t de Welch. La population est constituée de l'ensemble des valeurs de *WEH* qui peuvent être obtenues à partir d'une valeur donnée de ξ. Un échantillon issu d'une population est constitué des valeurs de *WEH* obtenues pour 7 combinaisons possibles des propriétés thermiques. ξ est compris entre 1.0 et 5.0. Les valeurs que peuvent prendre les propriétés thermiques sont étendues au-delà de celles recensées dans la littérature afin de converger vers les valeurs définies de ξ. Le tableau 3.4 donne les indications en ce qui concerne ξ et les propriétés thermiques utilisées dans le modèle de simulation thermique.

L'analyse statistique de la réponse thermique de la paroi est basée sur les critères suivants :

— **L'écart-type (s^2) de température opérative :** les dispersions des moyennes ainsi que des premiers et troisièmes quartiles sont évaluées au travers de l'écart-type. L'écart-type est estimé pour une valeur de ξ (intra-échantillon).

$$s^2 = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2} \tag{3.12}$$

Avec, X_i la température opérative moyenne d'un individu $[°C]$ (c'est-à-dire pour une combinaison déterminée de λ, ρc et d), X : la température opérative moyenne d'un échantillon $[°C]$ (c'est-à-dire pour une valeur déterminée de ξ).

— **Le test-t de Welch de *WEH* :** Il permet d'estimer, du point de vue statistique, la significativité de la différence de *WEH* entre deux échantillons, spécifiquement lorsque l'on passe de ξ_i à ξ_{i+1}. L'hypothèse

TABLE 3.4: Propriétés thermiques des échantillons ξ du test-t de Welch

ξ [-]	$\rho \cdot c$ $[J/m^3.K]$	λ $[W/m.K]$	$d\,[m]$
1.00	835120	0.300	0.100
	980000	1.700	0.220
	115989	1.500	0.600
	1500000	2.155	0.200
	3520000	0.700	0.074
	227244	1.000	0.350
	800000	5.820	0.450
1.50	835120	0.300	0.149
	980000	1.700	0.328
	257853	1.500	0.600
	1500000	0.970	0.200
	3520000	0.700	0.111
	505181	1.000	0.350
	800000	2.618	0.450
2.00	835120	0.300	0.199
	980000	1.700	0.437
	459328	1.500	0.600
	1500000	0.544	0.200
	3520000	0.700	0.148
	899907	1.000	0.350
	800000	1.470	0.450
2.50	835120	0.300	0.249
	980000	1.700	0.546
	2865030	1.500	0.300
	1500000	1.40	0.400
	3520000	0.700	0.185
	1403280	1.000	0.350
	800000	0.942	0.450
3.00	835120	0.300	0.299
	980000	1.700	0.656
	1033487	1.500	0.600
	1500000	0.242	0.200
	3520000	0.700	0.222
	2024791	1.000	0.350
	800000	0.653	0.450
3.50	835120	0.300	0.348
	980000	1.700	0.765
	1404671.8	1.500	0.600
	1500000	0.178	0.200
	3520000	0.700	0.259
	2752010.1	1.000	0.350
	800000	0.481	0.450
4.00	835120	0.300	0.398
	980000	1.700	0.874
	1833619.2	1.500	0.600
	1500000	0.307	0.300
	3520000	0.700	0.296
	3592396.7	1.000	0.350
	800000	0.368	0.450
4.50	835120	0.300	0.447
	980000	1.700	0.983
	2320674.3	1.500	0.600
	1500000	0.242	0.300
	3520000	0.700	0.333
	4546627.1	1.000	0.350
	800000	0.291	0.450
5.00	835120	0.300	0.497
	980000	1.700	1.093
	2867336.3	1.500	0.600
	1500000	0.196	0.300
	3520000	0.700	0.370
	5617638.4	1.000	0.350
	800000	0.235	0.450

nulle consiste donc à dire que les moyennes de températures des deux populations sont égales. Cette hypothèse est rejetée si la statistique t est supérieure à la valeur critique correspondant à un risque $\alpha = 10\ \%$.

$$t = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_{i+1}}{\sqrt{\frac{s_i^2}{N_i} + \frac{s_{i+1}^2}{N_{i+1}}}} \tag{3.13}$$

Résultats

La figure 3.11 présente les écarts-types de températures opératives moyennes pour chaque valeur ξ, ainsi que pour ceux des premiers et troisièmes quartiles. L'allure des courbes des trois indicateurs (moyenne, premier et troisième quartile) est semblable. L'écart-type décroit avec l'augmentation de ξ jusqu'au point d'inflexion compris entre 2.5 et 3.00. Pour $\xi > 3$, l'écart-type est croissant. L'écart-type de températures opératives moyennes est compris entre 0.035 et 0.058 $°C$. Celui du premier quartile est compris entre 0.016 et 0.089 $°C$ tandis que celui sur troisième quartile est compris entre 0.18 et 0.06 $°C$.

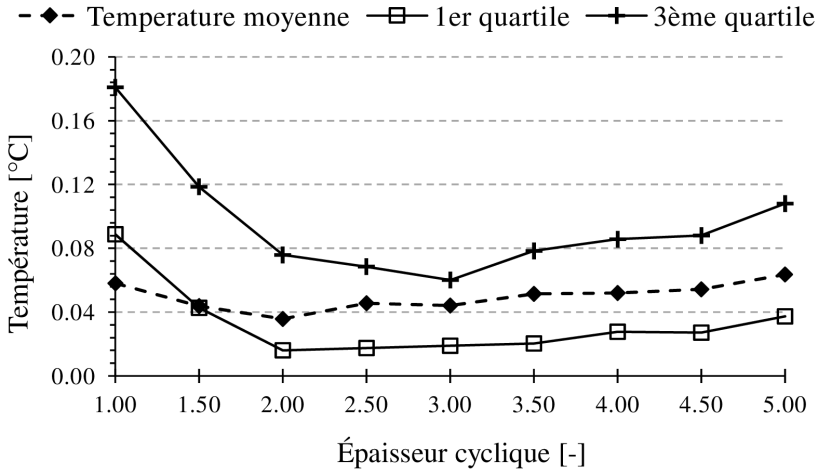


FIGURE 3.11: Évolution des écarts-types des moyennes, premiers et troisièmes quartiles de températures opératives du séjour en fonction de ξ

Le tableau 3.5 montre les résultats du test-t de Welch. Les valeurs-t décroissent avec l'augmentation de ξ jusqu'à 4. Au-delà de $\xi = 4$, elles augmentent. Elles sont comprises entre 0.03 et 4.25 tandis que les valeurs critiques sont comprises entre 1.78 et 1.79.

TABLE 3.5: Résultats du test-t de Welch : *WEH*

	ξ=1	ξ=1.5	ξ=2	ξ=2.5	ξ=3
Moyenne	18439.9	16551.9	15527.6	14914.5	15181.2
Taille, n	7	7	7	7	7
Écart-type, S	910.64	741.92	596.21	684.16	685.06
ddl		11.53	11.47	11.78	12.00
t-value		4.25	2.85	1.79	0.73
Valeur critique (10%)		1.79	1.79	1.78	1.79

TABLE 3.6: Résultats du test-t de Welch : *WEH* (suite)

	ξ=3.5	ξ=4	ξ=4.5	ξ=5
Moyenne	15294.5	15308.1	15368.9	15498.6
Taille, n	7	7	7	7
Écart-type, S	796.22	785.77	818.56	964.46
ddl	11.74	12.00	11.98	11.66
t-value	0.29	0.03	0.14	0.27
Valeur critique (10%)	1.79	1.78	1.78	1.79

Pertinence et limites de l'épaisseur cyclique

Pour une valeur déterminée de ξ il existe plusieurs réponses thermiques (fonction des valeurs que peuvent prendre λ, ρc et d) qui se traduisent par des écarts-types différents de zéro de la température opérative (figure 3.11). Cependant, ces variations restent faibles et ont peu d'influence sur la sensation thermique. En effet, lorsque l'amplitude de la variation de la température intérieure est inférieure à 1 $°C$, il n'y a aucune répercussion sur le confort thermique (ISO 7730, 2006).

Le test-t de Welch a permis d'évaluer la significativité des différences de *WEH* lorsque l'on passe de ξ_i à ξ_{i+1} pour un pas d'incrémentation de 0.50. Pour $\xi \leq 2.5$, les différences sont significatives. De ce fait, la réponse thermique ξ_i est statistiquement différente de celle ξ_{i+1} pour $0 < i+1 < 3$.

L'épaisseur cyclique, ξ, est adoptée comme le paramètre décrivant le comportement thermique de la paroi. La limite de cet indicateur est qu'il ne permet pas à lui seul de caractériser la réponse thermique. Cependant, entre $1 < \xi < 3$ la différence des réponses thermiques n'est pas imputable aux variations des propriétés thermiques de la paroi (p-value = 0.1).

3.3 Modèles et indicateurs de sensation thermique

Cette section est consacrée à l'état de l'art sur la modélisation de la sensation thermique des occupants des bâtiments. Cette revue scientifique a pour objectif le choix d'un indicateur approprié au contexte de la présente recherche. La première partie aborde le confort thermique et sa modélisation. La seconde présente les by-pass qui peuvent être établis entre les modèles de confort thermique. La troisième est consacrée aux indices de long terme du confort thermique. La dernière partie traite de la justification de l'indicateur de confort adopté dans le cadre de cette recherche.

3.3.1 Notion de confort thermique

La notion de confort renvoie aux sensations physiques, physiologiques ainsi qu'aux perceptions de facteurs discrets tels que l'acoustique, les conditions thermiques, l'éclairage, la qualité de l'air intérieur. Pour ce qui concerne spécifiquement le confort thermique intérieur des bâtiments, la notion reste subjective, car fonction de plusieurs paramètres. Du point de vue psychologique, le confort thermique se définit comme un état d'esprit qui exprime la satisfaction de l'individu vis-à-vis de l'environnement thermique dans lequel il se trouve (ASHRAE Handbook, 2009). Il est exprimé par la satisfaction de l'ambiance dans laquelle la majorité des occupants ne ressent pas d'inconfort de chaud ou de froid (Givoni, 1992). Du point de vue thermophysiologique, le confort thermique est fonction des signaux nerveux des récepteurs thermiques sous la peau et dans l'hypothalamus. La sensation de froid ou de chaud est détectée par ces récepteurs lorsque la température tombe en dessous ou dépasse un certain seuil (Mayer, 1993). C'est donc l'état dans lequel il n'y a pas d'impulsion motrice pour corriger l'environnement par le comportement (Hensen, 1991). Du point de vue énergétique, l'état de confort thermique est atteint lorsque les flux de chaleur vers et depuis le corps humain sont équilibrés et que la température de la peau et le taux de sudation sont dans une plage de confort qui ne dépend que du métabolisme (Fanger, 1970a).

Définir la neutralité thermique reste un exercice délicat. Les occupants seraient plus exigeants quant à la température de confort dans un bâtiment où l'air est conditionné que dans celui en évolution libre comme le montre les deux droites de régression de la figure 3.12 (Nicol et Humphreys, 2002). Les variations de la neutralité thermique sont observées d'un individu à l'autre, mais aussi en fonction des moments de la journée (figure 3.13). L'acclimatation des personnes, la variation de la sensibilité à la chaleur (température membrane tympanique) ou au froid (récepteur thermique cutanée) expliquent les différences observées (Mayer, 1993).

Il existe deux approches largement reconnues par la communauté scienti-

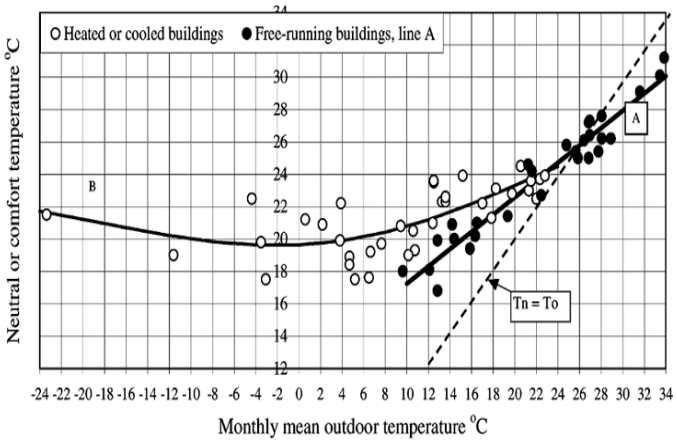


FIGURE 3.12: Neutralité thermique en fonction du mode de conditionnement du bâtiment, (Nicol et Humphreys, 2002)

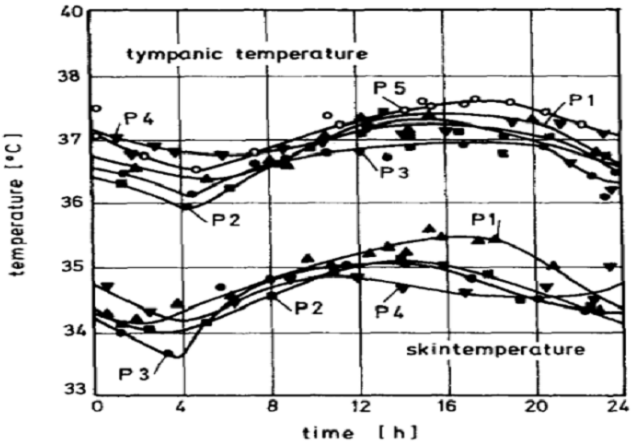


FIGURE 3.13: Seuil d'inconfort à la chaleur et au froid en fonction du temps, (Mayer, 1993)

fique en ce qui concerne l'évaluation du confort thermique intérieur des bâtiments.

Approche analytique

L'approche analytique, développée par Fanger en chambre climatique, est fondée sur l'équilibre thermique du corps humain (équation 3.14) (Fanger, 1970b; Gagge et Nishi, 2010). Le modèle utilise comme paramètres d'entrées, quatre qui sont liés à l'environnement climatique (température, radiation thermique, humidité relative et vitesse de l'air) et deux autres liés à l'occupant (l'activité et l'habillement). L'ambiance contrôlée des chambres climatiques dans lesquelles l'expérimentation est réalisée permet une mesure précise des paramètres environnementaux tandis que l'activité et l'habillement des participants à l'expérience sont standardisés.

$$S = M_{sk} \pm R \pm C \pm E_{sk} \tag{3.14}$$

Avec, S la quantité de chaleur stockée dans le corps $[W/m^2]$, M_{sk} la quantité de chaleur net à la surface de la peau $[W/m^2]$, R la chaleur échangée par radiation $[W/m^2]$, C la chaleur échangée par convection $[W/m^2]$, E_{sk} la quantité de chaleur transférée par évaporation à la surface de la peau $[W/m^2]$.

Ce modèle combine équilibre thermique et thermorégulation pour déterminer une gamme de températures de confort pour les occupants des bâtiments. Afin de maintenir un équilibre entre la chaleur produite par le métabolisme et la chaleur perdue par le corps, des processus physiologiques sont actionnés par la corps humain (c.-à-d. la transpiration et les frissons). L'équation développée par Fanger décrit ainsi l'inconfort comme le déséquilibre entre le flux de chaleur réel du corps dans un environnement thermique donné et le flux de chaleur requis pour un confort (c'est-à-dire la neutralité thermique) pour une activité donnée (Djongyang *et al.*, 2010). L'indice PMV (Predicited mean vote), calculé suivant l'équation 3.15, estime le vote moyen de sensation thermique d'un groupe de personnes sur une échelle de sensation à 7 niveaux (-3 = très froid, +3 = très chaud). L'indice PPD (Predicted percentage of dissatisfied) estime le pourcentage de personnes insatisfaites, c'est-à-dire susceptibles d'avoir trop chaud ou trop froid dans l'ambiance considérée.

$$\begin{aligned} PMV &= [0.303exp(-0.036M) + 0.028] \cdot L \\ PPD &= 100 - 95exp[-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)] \end{aligned} \tag{3.15}$$

Où L est la chaleur interne au corps, définie comme la différence entre la production de la chaleur interne et la chaleur perdue dans l'environnement lorsque la personne est hypothétiquement maintenue dans un état de confort.

L'ambiance thermique est acceptable lorsque le PMV est compris entre -0.5 et $+0.5$. Dans ces conditions, il est estimé qu'au moins 90 % des occupants du bâtiment jugeront l'ambiance thermique satisfaisante (PPD= 10) (Fanger, 1988). La relation entre les deux indices est illustrée par la figure 3.14. Le modèle PMV-PPD du confort thermique fut une importante contribution à la théorie du confort. Le modèle a été standardisé pour la conception et l'estimation de l'ambiance des bâtiments (ASHRAE, 2013; ISO 7730, 2006). Doherty et Arens 1988 ont montré la capacité des modèles analytiques à prédire le confort pour des gens pratiquant une activité précise.

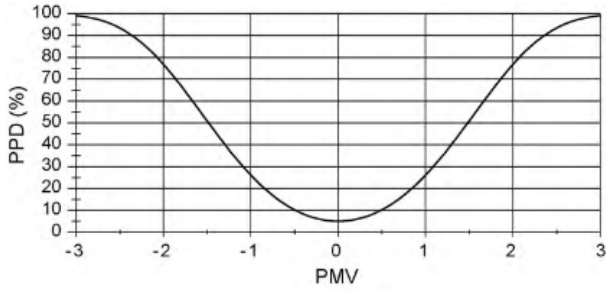


FIGURE 3.14: Évolution de l'indice PMV en fonction de l'indice PPD

Un autre modèle, basé également sur l'équilibre thermique, a été développé par Gagge *et al.* 1986. Ils reprochent au modèle PMV-PPD d'être peu sensible à l'humidité alors qu'elle joue un rôle plus important dans le transfert de chaleur par évaporation. Ils introduisent la température effective standard, SET^*, comme étant la température sèche équivalente d'un environnement isotherme à 50% HR dans lequel un sujet, tout en portant des vêtements standardisés pour une activité donnée aurait la même mouillure cutanée et échangerait la même quantité de chaleur qu'il aurait dans l'environnement réel. Ils estiment en effet que la mouillure de la peau est un paramètre à prendre en compte et définit la nouvelle température effective (ET^*) comme driving force en lieu et place de la température opérative T_o du modèle de Fanger. L'indice de confort qui en résulte, PMV^*, permet de prendre en compte les effets d'humidité.

Approche adaptative

L'approche adaptative du confort thermique est basée sur les résultats d'enquêtes de confort menées sur le terrain grâce à la collecte simultanée des données sur l'environnement thermique et sur la réponse de la sensation des occupants. L'hypothèse fondamentale de cette approche est que " si un changement se produit de sorte à entrainer un inconfort, les habitants réagissent de sorte à réhabiliter leur confort " (Nicol et Humphreys, 2002). Le terme adaptation

pourrait être interprété au sens large comme la diminution progressive de la réponse de l'organisme à une stimulation environnementale répétée. Trois types d'adaptations sont possibles (De Dear *et al.*, 1998) : (i) l'ajustement comportemental qui consiste aux actions prises par l'individu - à savoir le changement du vêtement ou la mise en marche d'une ventilation mécanique - pour modifier le flux de chaleur ou de masse qui gouverne l'équilibre du corps humain ; (ii) l'adaptation physiologique qui comprend les changements au niveau physiologique qui résultent de l'exposition aux facteurs climatiques et qui conduisent à diminuer progressivement la réponse induite par une telle exposition ; (iii) l'adaptation psychologique, processus dans lequel les consignes de confort ne sont plus thermostatiques, mais liées à une perception ou à de l'information sensorielle due à une expérience et des attentes passées.

L'approche adaptative relie la température de confort intérieur à la seule variable extérieure qui est une moyenne de température. Ce modèle est plus approprié pour évaluer la sensation thermique des bâtiments naturellement ventilés (Fanger et Toftum, 2002). Il est basé sur l'équation linéaire 3.16 (Halawa et van Hoof, 2012).

$$T_{comf} = A \cdot T_{out} + B \tag{3.16}$$

Avec, T_{comf} la température de confort $[°C]$, T_{out} la moyenne mensuelle de température extérieure $[°C]$.

Les constantes A et B de l'équation 3.16 sont déterminées grâce à l'analyse des résultats issus d'enquêtes sur le confort. Le tableau 3.7 présente les régressions linéaires et les valeurs des coefficients A et B de différentes études issues de la littérature scientifique.

TABLE 3.7: État de l'art des régressions du modèle adaptatif

Équation	Référence	Domaine d'application
$T_{comf} = 0.534T_{out} + 11.9$	Humphreys 1978	$10\,°C < T_{out,mm} < 33°C$; monde
$T_{comf} = 0.31T_{out} + 17.9$	Auliciems 1981b,a	Bâtiments conditionnés ou en évolution libre, Australie
$T_{comf} = 0.52T_{out} + 12.3$	Auliciems 1981b,a	Bâtiments en évolution libre, Australie
$T_{comf} = 0.31T_{out} + 17.8$	ASHRAE 2013	Bâtiments en évolution libre
$T_{comf} = 0.35T_{out} + 13.5$	Williamson et Daniel 2019	Climat tempéré de l'Australie
$T_{comf} = 0.53T_{out} + 11.6$	Bouden et Ghrab 2005	Contexte Tunisien

Deux intervalles d'acceptabilité autour de la neutralité thermique sont définis par l'ASHRAE 55 : celui à 80% qui tolère un écart de $\pm 3.5°C$ autour de la neutralité thermique et celui à 90% qui tolère un écart de $\pm 2.5°C$, figure 3.15. La norme européenne EN 15251 (EN, 2007) présente également

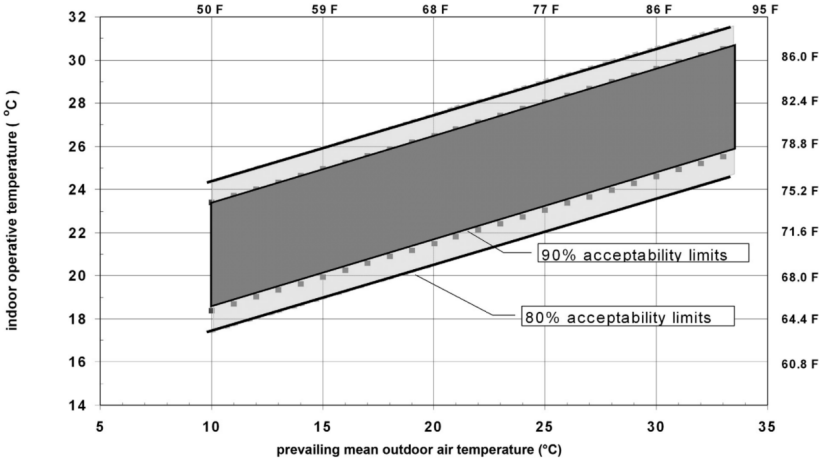


FIGURE 3.15: Limites d'acceptabilité des températures opératives du modèle adaptatif selon la norme ASHRAE

une évaluation de l'ambiance intérieure par la méthode adaptative qui est, de façon conceptuelle, similaire à l'ASHRAE 55

3.3.2 Limites et by-pass entre approches de confort

Le modèle analytique surestime la sensation thermique des occupants, particulièrement pour les bâtiments en évolution libre (Rodriguez et D'Alessandro, 2019; Jazizadeh *et al.*, 2013). Le caractère statique de certains paramètres, pourtant de principe dynamiques, est problématique. À titre d'exemple, une augmentation du métabolisme de 0.9 met à 1.5 met entraine une variation de plus de $2°C$ de la température de neutralité thermique (Luo *et al.*, 2016a). De plus, la tolérance de ± 0.5 PMV est remise en cause, car des personnes habituées à un climat froid préfèreront une ambiance légèrement chaude à la sensation neutre tandis que celles habituées au climat chaud préfèreront la sensation légèrement froide à la sensation neutre (Enescu, 2017).

D'un autre côté, l'approche adaptative pousse les zones d'acceptabilité du confort thermique à des limites critiques, augmentant ainsi la gêne thermique et encourageant potentiellement le recours à de l'énergie (Rodriguez et D'Alessandro, 2019). De plus, son application requière des conditions bien définies et la question de sa pertinence se pose dans un contexte où les bâtiments nouveaux pourraient redéfinir les interactions entre les occupants et leur environnement. Des méthodes ont ainsi été développées pour tenter de prendre en compte les limites des deux principales approches d'évaluation du confort thermique.

Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)

Ce modèle tente de réconcilier le modèle adaptatif à celui analytique du PMV en prenant en compte les aspects psychologique et comportemental tout en considérant l'équilibre thermique. aPMV évalue le confort thermique et prédit la même température opérative optimum que l'approche PMV mais en utilisant la moyenne de température effective extérieure comme seul paramètre d'entré en lieu et place de l'habillement, du métabolisme, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air, requis dans le modèle PMV (Enescu, 2017). Il est développé par Yao *et al.* 2009; Holopainen *et al.* 2014 :

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \alpha \cdot PMV} \tag{3.17}$$

$$\alpha = \frac{K}{T_m - T_n} \tag{3.18}$$

Avec, α le coefficient d'adaptation représentant le ratio entre impact psychologique et comportemental (K), et la différence entre la température intérieur (Tm) et de neutralité thermique (T_n). $\alpha = 0.293$ pendant la période chaude et $\alpha = -0.125$ pendant la période froide pour les bâtiments naturellement ventilés en Chine (Yao *et al.*, 2009). Cependant d'autres valeurs sont obtenues en fonction de l'environnement climatique (Enescu, 2017).

Extension du PMV (ePMV)

Il est établi en 2002 par Fanger et Toftum 2002 pour évaluer le confort thermique des bâtiments sans systèmes de conditionnement d'air en climat chaud. Le facteur d'attente est introduit comme réponse aux limites du modèle PMV. Ainsi, ce modèle permet de tenir compte de l'acclimatation des individus grâce au coefficient d'attente, e. ePMV permet d'obtenir la valeur corrigée du PMV correspondant au vote thermique moyen d'un groupe d'individus (Enescu, 2017).

$$ePMV = e \cdot PMV \tag{3.19}$$

Fanger et Toftum 2002 proposent les valeurs de e : 0.9 à 1.0 dans les régions ou l'air conditionné est courant et commun et les épisodes chauds brefs, 0.7-0.9 dans les régions ou l'air conditionné est présent et avec une saison chaude marquée, 0.5-0.7 dans les régions avec peu de systèmes de conditionnement d'air dans les bâtiments et des températures élevées toute l'année. Ils proposent également d'ajuster le métabolisme, car l'activité des personnes exposées à un climat chaud est inconsciemment ajustée. En effet, la méthode d'évaluation actuelle du métabolisme est limitée à une approche mécaniste. Le métabolisme doit être réduit de 6.7% pour chaque unité de PMV au dessus de la neutralité (PMV=0).

Nouveau PMV (nPMV)

Ce modèle est proposé par Humphreys cité par (Enescu, 2017) pour évaluer l'ambiance thermique des bâtiments disposant d'un système de conditionnement d'air. Il est basé sur l'équilibre entre l'approche adaptative et l'indice PMV.

$$nPMV = \beta \cdot [PMV - f_{(PMV_{ASHRAE})}] \tag{3.20}$$

Avec :

$$f_{(PMV_{ASHRAE})} = -4.03 + 0.0949 \cdot T_{op} + 0.00584 \cdot RH\% + 1.201 \cdot M \cdot I_{cl} 0.000838 \cdot T_{out}^2$$

3.3.3 Indices à long terme d'évaluation du confort

Le nombre d'indices pour décrire la relation entre le ressenti thermique des personnes et leur environnement immédiat n'a cessé de croire au fil des années (Carlucci et Pagliano, 2012). Ces indicateurs intègrent les effets des paramètres de base liés à l'environnement thermique à un moment précis. De ce fait, leur valeur donne une indication sur le ressenti thermique des individus.

Les indices d'évaluation à long terme de l'ambiance thermique, quant à eux, permettent d'étendre le champ d'application des indices de confort standards à une longue période donnant ainsi une évaluation plus générale de la qualité de l'ambiance thermique du bâtiment. Elles se fondent principalement sur les modèles de confort analytique et adaptatif. Les normes ASHRAE 2013, ISO 7730 2006 et EN 2007 en donnent quelques-unes, tandis que d'autres sont développés dans la littérature scientifique (Nicol *et al.*, 2009; Borgeson et Brager, 2011a). Les indices d'évaluation à long terme peuvent être classés en trois catégories :

Les indices cumulatifs : le nombre d'heures au-delà d'un seuil du confort adaptatif ou statique est cumulé sur la période d'évaluation de l'ambiance thermique. C'est un indicateur simple qui permet de comparer les performances de confort de bâtiments dans divers climats. Il peut être exprimé en pourcentage lorsqu'il est indexé au nombre total d'heures, *t*, durant lequel l'ambiance thermique est évaluée :

$$Index_{\%} = \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^{n} \begin{cases} si\ Limite_{low} \leq IIT_i \leq Limite_{upp} & \rightarrow 0 \\ sinon & \rightarrow 1 \end{cases}}{t} \tag{3.21}$$

Indices cumulatifs et pondérés. Cette catégorie d'indicateurs exprime l'inconfort comme un cumul du stress thermique durant les périodes d'occupation.

Son expression générale est donnée par l'équation 3.22 et suivant la norme de confort thermique servant de base (EN 15251, ISO7730 ou ASHRAE 55), le calcul du facteur de pondération,wf varie.

$$Index_{cum} = \sum_{i=1}^{n} wf_i \cdot t_i \tag{3.22}$$

Indices moyennés. L'ambiance thermique est évaluée grâce à la moyenne des valeurs du PPD pendant la période d'occupation. (équation 3.23)

$$Index_{average} = \sum_{i=1}^{n} \frac{PPD_i}{n} \tag{3.23}$$

D'autres indices d'inconfort sont présents dans la littérature tels que celui développé par Borgeson et Brager 2011b afin d'intégrer le nombre d'occupants dans l'évaluation de l'ambiance ou celui encore développé par Nicol *et al.* 2009 qui évalue l'inconfort en termes d'écart par rapport à la température de confort.

3.3.4 Évaluation du confort thermique : cas de Ouagadougou

Approche analytique ou approche adaptative ?

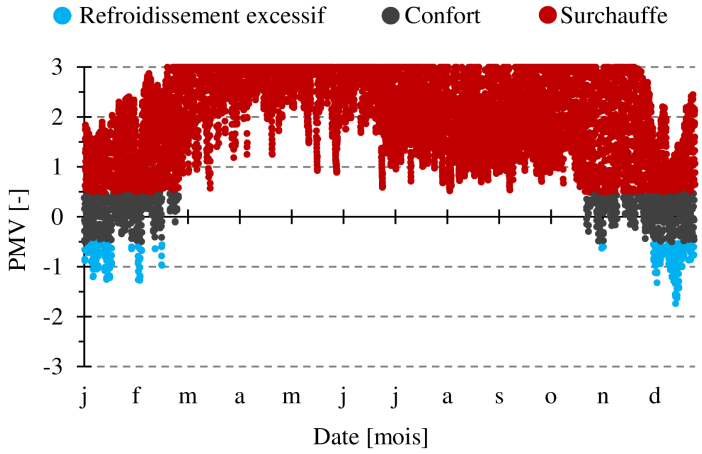
La section 3.3.1 a présenté les deux modèles d'évaluation de la sensation thermique des occupants des bâtiments. La section 3.3.2 en a donné les limites.

L'approche adaptative est indiquée pour les bâtiments en évolution libre tandis que celle analytique est plus pertinente lorsque l'environnement climatique est contrôlé. Bien que la cible de la présente recherche soit le bâtiment en évolution libre, une application des deux approches est réalisée à titre illustratif. Le modèle calibré de l'habitat type est utilisé (Cf. section 3.1). L'annexe B fournit les détails méthodologiques en ce qui concerne l'évaluation du confort suivant les deux approches.

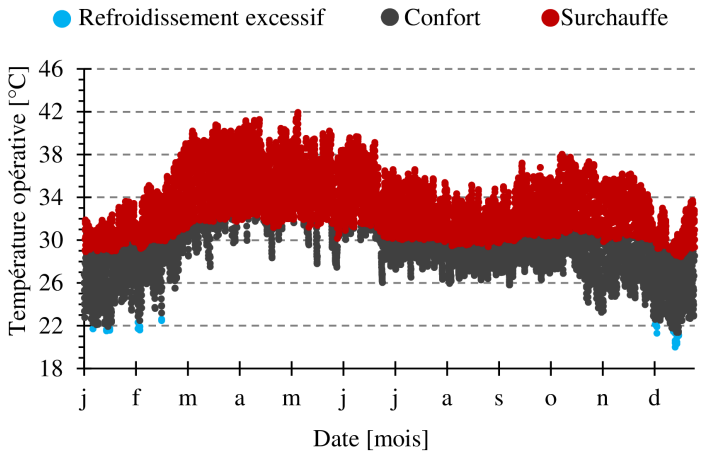
Les figures 3.16 (a) et (b) montrent respectivement les résultats de l'évaluation du confort thermique suivant l'approche PMV et adaptative. Chacune des figures comporte 8760 points correspondant au nombre d'heures d'une année. Les points dans la zone de confort sont matérialisés par la couleur grise tandis que ceux dans la zone d'inconfort sont colorés en rouge (surchauffe) et bleu (refroidissement excessif).

Dans l'approche PVM (figure 3.16 (a)), 89% des heures annuelles sont dans la zone de surchauffe contre 8% dans la zone de confort. Dans l'approche adaptative (figure 3.16 (b)), la zone de surchauffe compte pour 64.2% et la zone de confort 35.5%.

La fréquence de surchauffe est plus élevée dans l'approche PMV que dans celle adaptative. Ces résultats étaient prévisibles vu le domaine d'application des modèles. L'application de l'une des méthodes de correction du PMV (cf.



(a)



(b)

FIGURE 3.16: Évaluation de l'ambiance thermique de l'habitat type suivant l'approche (a) PMV et (b) adaptative

section 3.3.2) permettrait de l'adapter au contexte de l'étude, mais la question des valeurs des paramètres de correction se pose. Le domaine d'application des deux modèles, dont les résultats pour le cas de Ouagadougou sont illustrés par la figure 3.16, permet d'adopter l'approche adaptative pour évaluer la sensation thermique de l'habitat.

Indice à long terme pondéré ou moyenné ?

Les indices à long terme d'évaluation de l'ambiance thermique ont des limites. Ceux basés sur le cumul et la pondération ne permettent pas de dire si l'inconfort est causé par un dépassement excessif opéré pendant un temps court ou par un faible dépassement du seuil pendant une longue période. Les indices basés sur le pourcentage ne donnent aucune information sur la sévérité de l'inconfort. Les indices moyennés n'arrivent pas à faire ressortir la fréquence des épisodes d'inconfort sur une période donnée et ne tiennent pas compte de la sévérité. Malgré ces limites, l'état de l'art révèle une récurrence à l'utilisation des indices cumulatifs et pondérés basées sur le modèle adaptatif.

C'est ainsi que pour évaluer l'inconfort de bâtiments en terre crue à Ouagadougou, Burkina Faso, Rincón *et al.* 2019 utilisent l'indice cumulatif et pondéré *discomfort degree days (DDD)*. Son calcul consiste à diviser l'équation 3.22 par 24 (nombre d'heures d'une journée). Kordjamshidi 2011 suggère l'utilisation de *degree discomfort hours (DDH)* (Cf. équation 3.22) pour évaluer la performance thermique des habitats en évolution libre. Hamdy *et al.* 2017; Heracleous et Michael 2020 utilisent comme indice *indoor overheating degree (IOD)* pour évaluer le risque de surchauffe dans différentes zones thermique d'un bâtiment en évolution libre. *IOD* est calculé, toujours, suivant l'équation 3.22. Pour évaluer le risque d'inconfort lié à des températures élevées pendant l'été à Chypre, Heracleous et Michael 2018 utilisent *daily weighted exceedance (We)*.

Ces études montrent la pertinence d'un indice cumulatif pondéré, basées sur le modèle adaptatif, pour évaluation de l'ambiance thermique des bâtiments sans systèmes de conditionnement d'air.

Dans la présente étude, l'indice cumulatif pondéré adopté est *weighted exccedance hours (WEH)* (conformément à l'appellation dans ASHRAE 2013), décrit par l'équation 3.22. Il est égal aux indices *DDH* et *IOD* et équivalent à *DDD* et *We*. En effet, pour ces deux derniers indices l'évaluation est réalisée à l'échelle journalière contre une échelle annuelle pour *WEH*. Bien que l'utilisation de plusieurs indices à long-terme soit suggérée par Nicol 2013, des simulations thermiques ont montré que les différents indices conduisent à des tendances similaires (Silva *et al.*, 2016).

3.4 Conclusion

Une méthode pour étudier l'impact et la contribution de la paroi extérieure en terre cure sur le confort thermique consiste en de la modélisation. Dans ce chapitre, cette modélisation a concerné un bâtiment typique de la ville de Ouagadougou, le comportement thermique de la paroi, spécifiquement celle en terre crue et l'ambiance thermique intérieure.

Le processus de calibration a permis d'aboutir à un modèle capable de reproduire la réponse thermique du bâtiment choisi. Les propriétés thermiques des parois du modèle, à l'origine basées sur des matériaux à base de ciment, vont être étendues de sorte à explorer leur impact sur le confort. L'ensemble des propriétés thermiques de la paroi ont été rassemblées dans un unique indicateur, l'épaisseur cyclique. Cet indicateur permet une caractérisation dynamique limitée du comportement de la paroi, mais à l'avantage d'intégrer de façon simplifiée l'ensemble des propriétés thermiques.

Il est aussi défini un indice relatif à l'ambiance thermique intérieur du bâtiment, *weighted exccedance hours (WEH)*. Le chapitre suivant, consacré à la conception de la paroi, aura pour objet de proposer des solutions visant à minimiser au mieux WEH.

Chapitre 4

Conception et optimisation des parois en BTC pour le confort thermique

L'enveloppe des bâtiments présente un grand potentiel en ce qui concerne l'amélioration du climat intérieur. Cependant, un ajustement adéquat des propriétés thermiques des matériaux est nécessaire. En ce qui concerne la terre crue en général et la BTC en particulier, il a été montré au chapitre 1 que ses propriétés thermiques sont relativement variable. Alors que plusieurs recherches tentent d'améliorer les propriétés thermiques de la terre, l'on pourrait se demander quelle est la cible ? En effet, la conductivité thermique est intimement liée à la densité. L'épaisseur et la chaleur spécifique de la paroi déterminent sa capacité de stockage. Un compromis doit être défini entre les deux fonctions de la paroi que sont la masse et la résistance thermique. Laquelle des fonctions privilégier afin d'améliorer le climat intérieur des habitats à Ouagadougou ? Quelles sont les valeurs des propriétés thermiques que devrait avoir la paroi extérieure en BTC ? Quel impact peut avoir les habitudes des occupants sur la conception de la paroi ? Voici les questions auxquelles ce chapitre apporte des réponses. La première partie donne des éléments méthodologiques de l'étude. La seconde partie présente les résultats de la conception thermique de la paroi en BTC. Enfin, une discussion et conclusion vient clore ce chapitre.

Sommaire

4.1 Méthodologie et plan de simulation 90
4.2 Résultats 95
4.3 Discussion et Conclusion 107

4.1 Méthodologie et plan de simulation

Les simulations thermiques réalisées dans le cadre de la conception thermique de la paroi se sont appuyées sur le modèle de l'habitat type. À l'exception des parois, de la ventilation et de l'occupation, les paramètres du modèle sont ceux déterminés lors de la calibration. Les indices *WEH* et ξ sont les paramètres sur lesquels la conception de la paroi s'est appuyée(cf. chapitre 3). Ils sont néanmoins approfondis dans cette section. L'annexe C donne des informations complémentaires sur le plan de simulation. La première partie présente la conception thermique des parois étudiées. La seconde apporte des informations additionnelles en ce qui concerne l'indice d'évaluation de l'ambiance. La dernière partie traite de l'interaction entre les occupants et le bâtiment.

4.1.1 Conception thermique des parois

Fondements théoriques

Le comportement thermique de la paroi est modélisé par l'épaisseur cyclique ξ. La pertinence et les limites de ce paramètre ont été présentées précédemment (cf. section 3.2.4). En rappel, ξ est calculé grâce à l'équation 4.1.

$$\xi = \left[\frac{\pi \rho c}{P\lambda}\right]^{1/2} \cdot d \tag{4.1}$$

Avec, c la chaleur spécifique $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$, d l'épaisseur de la paroi $[m]$, P la période de retour $[s]$. Le caractère périodique de la contrainte climatique extérieure permet de considérer P =86400s (soit 24 heures), λ la conductivité thermique $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$, ρ la densité apparente $[kg \cdot m^{-3}]$.

La conception de la paroi vise donc à définir les valeurs de ξ qui offrent les meilleures opportunités d'amélioration du confort thermique dans les habitats. Pour une valeur déterminée de ξ, il est possible soit (i) de définir l'épaisseur que doit avoir la paroi en supposant une diffusivité thermique fixe et connue (équation 4.2) ; soit (ii) de définir la diffusivité que le matériau doit avoir en supposant une épaisseur fixe et connue (équation 4.3).

$$d = \xi \cdot \left(\frac{a \cdot P}{\pi}\right)^{1/2} \tag{4.2}$$

$$a = \frac{d^2 \pi}{\xi^2 \cdot P} \tag{4.3}$$

Avec, a la diffusivité thermique $[m^2/s]$.

ξ peut est considéré comme une unique fonction de l'indice de masse $(\rho \cdot c)^{1/2}$ en supposant que la conductivité thermique du matériau ainsi que

l'épaisseur de la paroi sont fixes (équation 4.1). Il est alors noté $\xi(\rho \cdot c)$. De même, $\xi(\lambda)$ et $\xi(d)$ sont respectivement les notations de l'épaisseur cyclique comme unique fonction de l'indice de conductivité $(\lambda^{-1})^{1/2}$ et de l'épaisseur d. L'impact du mode d'ajustement de ξ, (c'est-à-dire de la variation de $(\rho \cdot c)^{1/2}$, $(\lambda^{-1})^{1/2}$ et d) sur le confort thermique est étudié. En effet, en fonction des indices utilisés pour ajuster l'épaisseur cyclique du mur, la réponse thermique peut être différente.

Interdépendance des propriétés thermiques

Les propriétés thermiques de la BTC sont variables. La conductivité thermique est fonction de la densité tandis que la chaleur spécifique varie très peu pour un matériau déterminé (Cf. section 1.5). Il est possible d'exprimer la conductivité comme une fonction de la densité sous la forme $\lambda(\rho) = a \cdot \rho + b$. Ainsi, l'équation 4.2 devient :

$$d = \xi \cdot \left(\frac{a \cdot P}{\pi}\right)^{1/2} = \xi \cdot \left(\frac{\frac{\lambda(\rho)}{\rho \cdot c} \cdot P}{\pi}\right)^{1/2} = \xi \cdot \left(\frac{(a \cdot \rho + b) \cdot P}{\rho \cdot c \cdot \pi}\right)^{1/2} \quad (4.4)$$

Différents auteurs ont établi la fonction $\lambda(\rho)$ dont Mansour *et al.* 2016 ($\lambda(\rho) = 0.0014 \cdot \rho - 1.62$) pour la latérite de la région de Ariana, Tunisie et Nshimiyimana 2020 ($\lambda(\rho) = 0.0008 \cdot \rho - 0.414$) pour la latérite de la carrière de Kamboinsé, Burkina Faso. Ces deux régressions linéaires seront utilisées dans une application de la conception de la paroi.

Modélisation des parois étudiées

La paroi extérieure est modélisée par ces propriétés thermiques, écrites sous la forme de l'épaisseur cyclique ξ. Les valeurs de ξ de la BTC sont recensées dans le tableau 4.1 avec comme hypothèse une épaisseur de paroi égale à $0.14\ m$. Deux types de parois sont étudiées.

- La paroi monocouche dont l'épaisseur cyclique ξ varie de 0.42 à 6.44.
- La paroi double composée d'une masse thermique et d'un isolant. Les propriétés thermiques de la couche isolante sont fixes (polystyrène expansé : λ = 0.04 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ = 20 $kg \cdot m^{-3}$, c = 1500 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, d = 0.05 m) tandis que pour la masse thermique, ξ varie de 0.42 à 4.94. En plus des valeurs appropriées de ξ, il est aussi étudié la position relative des couches de matériaux composant la paroi double.

Le tableau 4.2 résume les modes d'ajustement de ξ pour les deux types de parois.

En raison du faible impact des propriétés thermiques des parois intérieures sur le confort, elles ne sont pas étudiées (Long et Ye, 2016). Les propriétés

TABLE 4.1: État de l'art des valeurs de ξ de la BTC

Description	ξ $[-]$	Référence
BTC stabilisée à 8% de ciment	1.13 à 1.21	Meukam 2004
BTC incorporant de la sciure de bois	1.10 à 1.31	Meukam 2004
BTC incorporant de la cellulose	1.85 à 2.01	Ouedraogo *et al.* 2015a
BTC stabilisée à 8% de ciment	1.33	Sore *et al.* 2018
BTC géopolymère	1.38 à 1.40	Sore *et al.* 2018
BTC stabilisée à la chaux résiduelle et cendre de balle de riz	1.10 à 1.28	Nshimiyimana *et al.* 2020
BTC creux	1.44 à 1.60	Adam et Jones 1995
BTC non stabilisée	0.74 à 0.98	Mansour *et al.* 2016

TABLE 4.2: Modélisation thermique des parois étudiées

Type de paroi	Symbole	$(\rho \cdot c)^{1/2}$ $[\sqrt{J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}}]$	$[(\lambda^{-1})^{1/2}]$ $[\sqrt{m \cdot K \cdot W^{-1}}]$	d $[m]$	ξ $[-]$
Paroi mono-couche	$\xi(\rho c)$	De 240 à 3685	1 [a]	0.29	De 0.42 à 6.44
	$\xi(\lambda)$	1387.95 [b]	De 0.17 à 2.65	0.29	
	$\xi(d)$	1387.95 [b]	1 [a]	De 0.05 à 0.77	
Paroi double	$\xi(d)$	1387.95 [b]	1 [a]	De 0.05 à 0.59	De 0.42 à 4.94

[a] : corresponds à λ = 1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
[b] : corresponds à ρ = 1921.60 $kg \cdot m^{-3}$ and c = 1002.50 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

thermiques des parois intérieures en BTC sont λ = 1.00 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ = 1921.60 $kg \cdot m^{-3}$, c = 1002.50 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, d = 0.14 m.

4.1.2 Indice de l'ambiance thermique

L'indice *WEH*, basé sur l'approche adaptative du confort thermique est utilisé pour évaluer le climat intérieur de l'habitat (ASHRAE, 2013). La justification et la pertinence de cet indice ont été discutées précédemment (Cf. section 3.3.4, voir aussi annexe C). *WEH* est calculé pour une année (8760 h) grâce à l'équation 4.5.

$$WEH = \sum_{i=1}^{8760} (EH \cdot wf_i) \tag{4.5}$$

$$EH = \begin{cases} 1 si\ T_{op} \geq T_{op,upp} \\ 0\ si\ T_{op} < T_{op,upp} \end{cases}$$

$$wf = T_{op,i} - T_{op,upp,i}$$

Avec, EH l'heure de dépassement du seuil de confort $[h]$, T_{op} la température opérative simulée $[C]$, $T_{op,upp}$ limite d'acceptabilité à 80% de la température opérative suivant la norme ASHRAE 2013 $[C]$ (équation 4.6).

$$T_{op,upp} = 0.31 T_{out} + 21.3 \tag{4.6}$$

$$T_{out} = (1 - 0.7)[T_{e(d-1)} + 0.7 T_{e(d-2)} + 0.7^2 T_{e(d-3)} + ... + 0.7^6 T_{e(d-7)}]$$

4.1.3 Interaction entre occupants et bâtiment

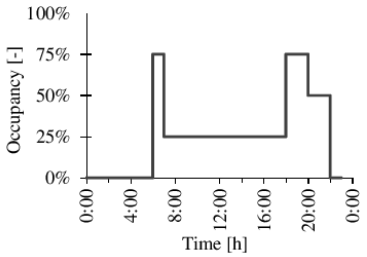
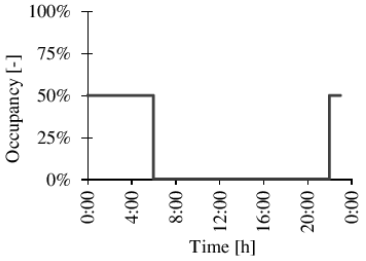
Deux facteurs liés aux occupants du bâtiment sont susceptibles d'influencer le confort thermique et potentiellement la conception de la paroi. Il s'agit du profil d'occupation des espaces de l'habitat et du mode de ventilation adopté.

Profils d'occupation

La sensibilité de deux profils d'occupation des espaces sur la conception de la paroi est étudiée. Le premier considère une *occupation de jour* comme c'est le cas pour le séjour. Le second considère une *occupation de nuit* comme c'est le cas pour les chambres à coucher. Le tableau 4.3 montre les profils adoptés.

Les deux profils se distinguent par l'évaluation de l'indice *WEH*. En effet, *WEH* est calculé pour les périodes durant lesquelles les occupants sont présents. À ce titre, *WEH* vaut 0 pour la période allant de 22h00 à 6h00 dans le cas d'un profil d'occupation de jour indépendamment de l'équation 4.5. De même, *WEH* vaut 0 de 6h00 à 22h00 pour le profil d'occupation de nuit. Il s'agit donc de la répartition entre jour et nuit des valeurs de *WEH*.

TABLE 4.3: Profil d'occupation des espaces

Profil d'occupation de jour	Profil d'occupation de nuit
	

Occupation : 100% = 4 personnes

Stratégies de renouvellement de l'air

La sensibilité de trois scénarios de renouvellement de l'air est étudiée. Le scénario, noté *ACH0* [1] reproduit le bâtiment avec les portes et fenêtres closes. Bien que ce scénario ne corresponde à aucun mode de ventilation d'un habitat sans systèmes de conditionnement d'air, il permet dans un premier temps d'analyser les solutions sans l'influence de la ventilation. L'échange d'air qui subsiste est dû à l'infiltration, le taux étant celui déterminé lors de la calibration du modèle thermique c'est à dire 0.2 $Vol \cdot h^{-1}$.

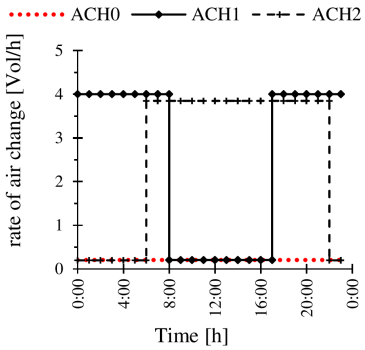
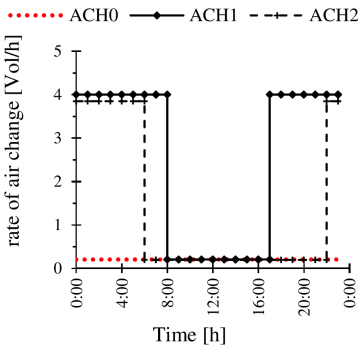
L'hypothèse qui sous-tend le scénario noté *ACH1* est un bâtiment dont les fenêtres sont closes durant la journée et ouvertes durant la nuit. La fermeture des fenêtres a pour objet d'éviter l'entrée de l'air chaud diurne tandis que l'ouverture a pour but de tirer profit des faibles températures durant la nuit.

Le scénario noté *ACH2* est celui dans lequel les périodes d'ouverture et de fermeture des fenêtres sont calquées sur les profils d'occupation. Il est supposé que les fenêtres de l'habitat soient ouvertes en présence des occupants et fermées en leur absence. Le tableau 4.4 résume les trois modes de ventilation.

À l'instar d'autres études sur la ventilation des habitats, notamment au Burkina Faso, le taux de renouvellement de l'air est fixé à 4 $Vol \cdot h^{-1}$ (fenêtres ouvertes) (Rincón *et al.*, 2019; Sadineni *et al.*, 2011b).

1. Air change per hour

TABLE 4.4: Scénarios de renouvellement de l'air

Profil d'occupation de jour	Profil d'occupation de nuit
	

4.2 Résultats

4.2.1 Réponse thermique globale de l'habitat

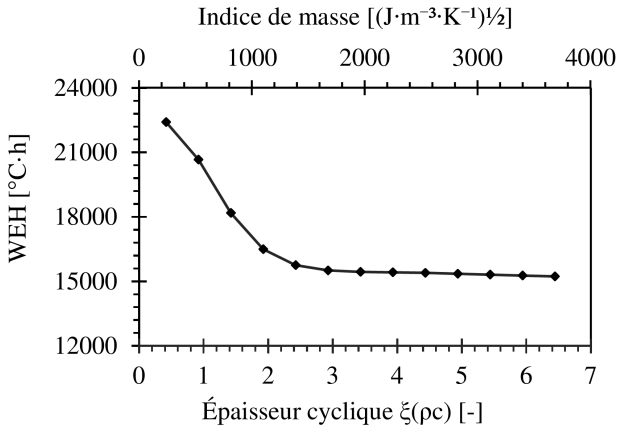
Les paramètres du modèle de simulation thermique dans cette section sont basés sur ceux du bâtiment expérimental, c'est-à-dire sans occupation et avec une infiltration d'air de 0,2 $Vol \cdot h^{-1}$ (ACH0). L'évaluation de *WEH* est faite pour toutes les heures. Seules les propriétés thermiques des parois extérieures ont été modifiées pour modéliser la BTC suivant les plages de valeurs définies à la section 4.1.1.

Paroi mono couche

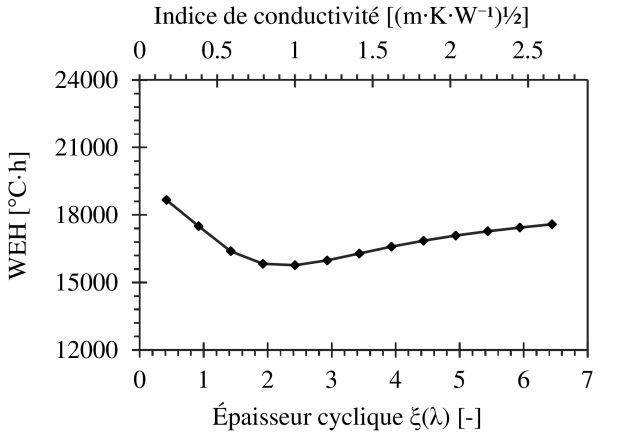
La figure 4.1 montre l'évolution de l'indice de l'ambiance thermique, *WEH*, en fonction de l'épaisseur cyclique, ξ, de l'habitat mono couche BTC. Pour chaque mode d'ajustement de ξ présenté en abscisse principale, la propriété thermique correspondante est présentée en abscisse secondaire.

Les résultats montrent que les ajustements de ξ suivant la masse thermique (figure 4.1 (a)), la conductivité thermique (figure 4.1 (b)) et l'épaisseur de paroi (figure 4.1 (c)) présentent un profil de *WEH* similaire. En effet, *WEH* décroit rapidement avec l'augmentation de ξ jusqu'à atteindre un état quasi stationnaire (pour $\xi(\rho c)$ et $\xi(d)$) ou un point d'inflexion (pour $\xi(\lambda)$).

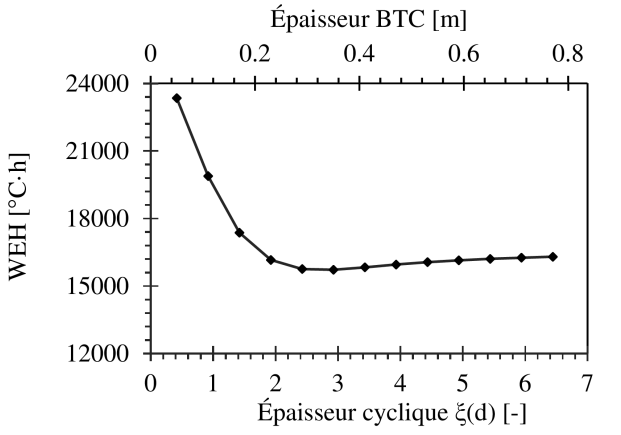
L'optimum de ξ, noté ξ_{opt} est défini comme la valeur qui permet de minimiser *WEH* ou à partir de laquelle un état quasi stationnaire est atteint. L'état quasi stationnaire est considéré atteint lorsque la variation de *WEH* est inférieure à 3 %.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 4.1: Évolution de *WEH* de l'habitat mono couche en fonction de (a) l'indice de masse, (b) l'indice de conductivité thermique et (c) l'épaisseur

Ainsi, $\xi_{opt}(\lambda)$ = 2.43 et $\xi_{opt}(d)$ = 2.93 (figure 4.1 (b) et (c)). Au-delà de ces valeurs, il est constaté une augmentation de *WEH*. Dans le cas de l'ajustement par la conductivité thermique, l'augmentation de $\xi(\lambda)$ (c'est-à-dire la diminution de la conductivité thermique) a pour conséquence l'augmentation de la résistance thermique des parois. De ce fait, au-delà de $\xi_{opt}(\lambda)$, la chaleur introduite dans l'habitat pas infiltration est emprisonnée du faite de la résistance thermique élevée des parois. Il en est de même pour $\xi(d) > \xi_{opt}(d)$ car l'augmentation de l'épaisseur entraine l'augmentation de la résistance thermique. Cependant, l'augmentation de la capacité de stockage induite par l'épaisseur à pour conséquente d'atténuer la hausse de *WEH* comparativement à $\xi(\lambda) > \xi_{opt}(\lambda)$. Pour ce qui concerne l'ajustement par la masse thermique, $\xi_{opt}(\rho \cdot c)$ = 2.43 (figure 4.1 (a)). Au-delà, la variation de *WEH* est très faible.

De ce qui précède, la valeur optimum ξ_{opt} = 2.43 est définie indépendamment du mode d'ajustement de l'épaisseur cyclique.

Paroi double

La figure 4.2 présente les résultats de l'habitat dont les parois extérieures sont composées d'une couche de BTC (masse thermique) et d'une couche de polystyrène expansé (résistance thermique). Les propriétés de la résistance thermique étant définies et fixes, les variations opérées sur ξ concernent uniquement la couche en BTC. Deux types de parois sont étudiés suivant la position relative de la BTC. La paroi BTC_{in} est celle qui possède la couche BTC placée du côté intérieur et la résistance thermique placée du côté extérieur. La paroi BTC_{ext} est la configuration inverse, c'est-à-dire constituée de la couche BTC du côté extérieure et la résistance thermique du côté intérieur.

L'évolution de *WEH* pour $\xi(\rho \cdot c)$ et $\xi(d)$ (respectivement figure 4.2 (a) et (c)) est similaire a celle précédemment décrite pour les parois mono couche. Dans les deux cas, les optimums sont égaux indépendamment de la position relative des couches : $\xi_{opt}(\rho \cdot c)$ = 1.92, $\xi_{opt}(d)$ = 1.92. En ce qui concerne l'ajustement de l'épaisseur cyclique par la conductivité thermique (figure 4.2 (b)), il est observé que l'augmentation de $\xi(\lambda)$ entraine une augmentation de *WEH* pour la paroi BTC_{ext} tandis que pour BTC_{in} l'évolution est similaire à celle de la paroi mono couche. Pour ces deux parois, l'état quasi stationnaire est très vite atteint et la valeur de $\xi(\lambda)$ = 1.92 peut être considérée.

La paroi BTC_{in} est celle qui présente le plus faible profil de *WEH* comparativement à la paroi BTC_{ext} indépendamment du mode d'ajustement de ξ.

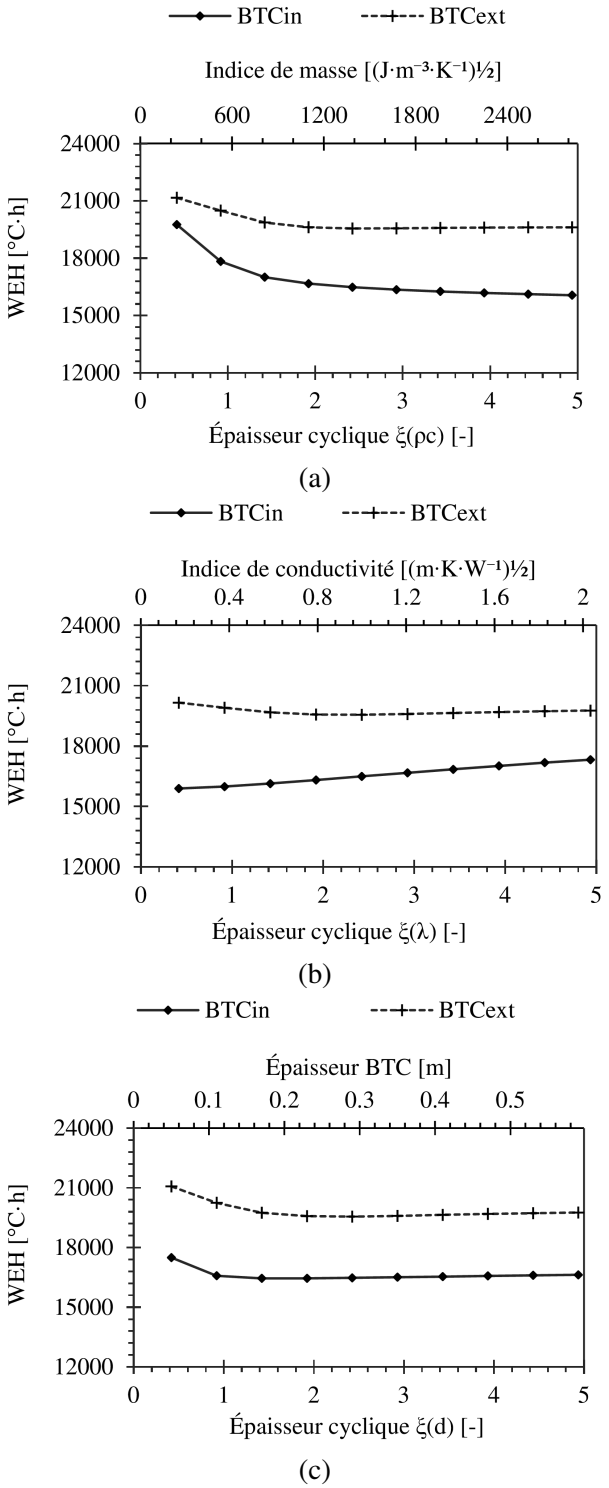


FIGURE 4.2: Évolution de *WEH* de l'habitat double couche en fonction de (a) l'indice de masse, (b) l'indice de conductivité thermique et (c) l'épaisseur

4.2.2 Influence de l'occupation

Les résultats de cette section concernent l'influence de l'interaction entre les potentiels habitants et le bâtiment sur le profil de *WEH* et donc sur ξ_{opt}. Des hypothèses modélisant le comportement des occupants (cf. section 4.1.3) sont appliquées au modèle thermique calibré. Il s'agit des profils d'occupation des espaces et des scénarios de ventilation.

Profils d'occupation

La figure 4.3 présente l'évolution de *WEH* de l'habitat mono couche pour le profil d'occupation de jour. Le scénario de ventilation est *ACH0*. Les profils de *WEH* sont similaires à ceux obtenus pour le bâtiment sans occupants et les optimums sont $\xi_{opt}(\rho \cdot c)$ = 2.43, $\xi_{opt}(\lambda)$ = 1.92 et $\xi_{opt}(d)$ = 2.43. Une valeur appropriée et commune aux trois modes d'ajustement est ξ_{opt} = 2.43.

La figure 4.4 quant à elle présente l'évolution de *WEH* de l'habitat mono couche pour le profil d'occupation de nuit. *WEH* augmente avec l'augmentation de ξ jusqu'à atteindre un maximum pour $\xi \approx 1.60$. Au-delà de cette valeur, *WEH* décroit.

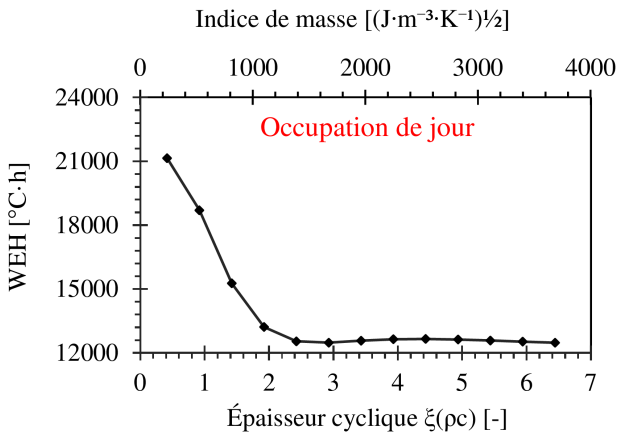
En ce qui $\xi(\rho \cdot c)$ et $\xi(d)$ (figure 4.4 (a) et (c) respectivement), l'optimum, tel que défini précédemment, correspond à deux valeurs : $\xi_{opt} \rightarrow 0$ (minimas de *WEH*) et ξ_{opt} = 3.93 (évolution quasi stationnaire de *WEH*). Or, ξ = 0 implique l'inexistence de parois au sens physique. En effet, $\xi(d)$ = 0 implique d = 0 donc pas de paroi. Il en est de même pour $\xi(\rho \cdot c)$ = 0 : densité ou chaleur spécifique nulle. Il est plus opportun de considérer l'optimum lorsque l'état quasi stationnaire de *WEH* est atteint. Par conséquent, l'optimum de chaque mode d'ajustement vaut ξ_{opt} = 3.93.

La figure 4.5 concerne l'évolution de *WEH* en fonction de ξ pour le profil d'occupation de jour de l'habitat double-couche. L'évolution est similaire à celle décrite lorsque l'ensemble des heures sont considérées pour l'évaluation de *WEH* (Cf. section 4.2.1) tant pour ξ_{opt} = 1.92 que pour la position relative des couches de la paroi. La figure 4.6 concerne l'occupation de nuit. À l'inverse du profil d'occupation de jour, la paroi BTC_{ext} est celle qui présente les profils les plus faibles de *WEH* . Indépendamment du mode d'ajustement, ξ_{opt} = 2.43.

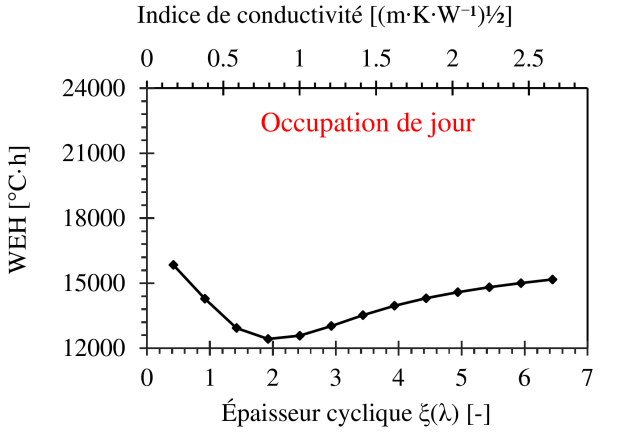
Stratégies de ventilation

L'influence des trois modes de renouvellement de l'air, à savoir ACH0 (infiltration d'air), ACH1 (ventilation nocturne) et ACH2 (ventilation en présence d'occupants) sur l'évolution de *WEH*, est illustrée par la figure 4.7.

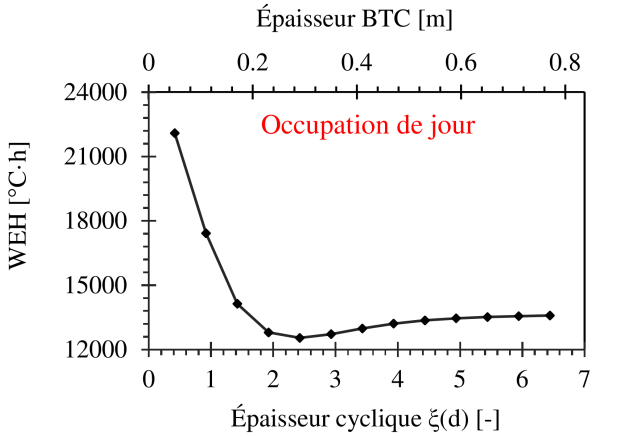
Les figures 4.7 (a,b) et (c,d) concernent respectivement l'habitat mono et double couche. Seules les configurations de paroi présentant un intérêt dans la réduction de *WEH* ont été représentées pour l'habitat double couche(c.-a.-d.



(a)

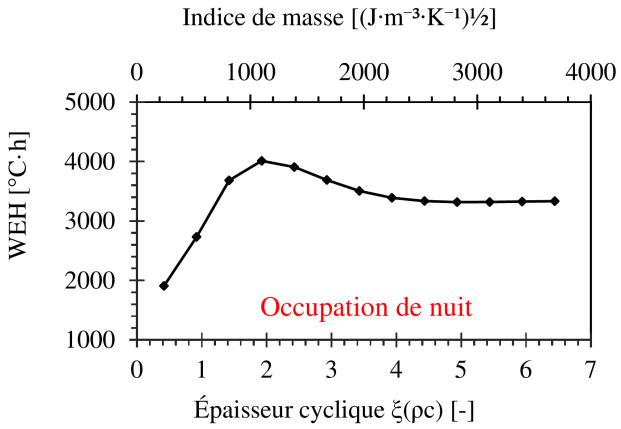


(b)

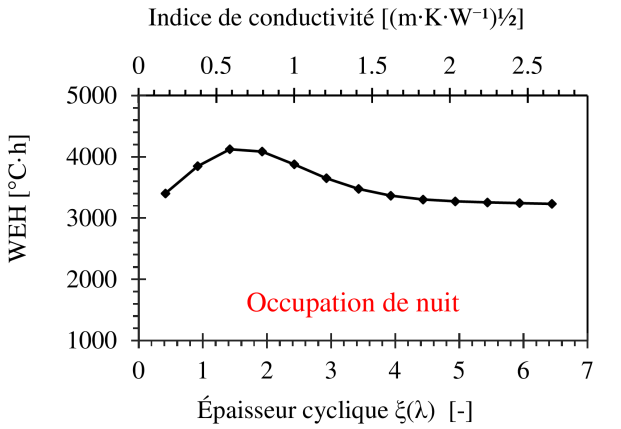


(c)

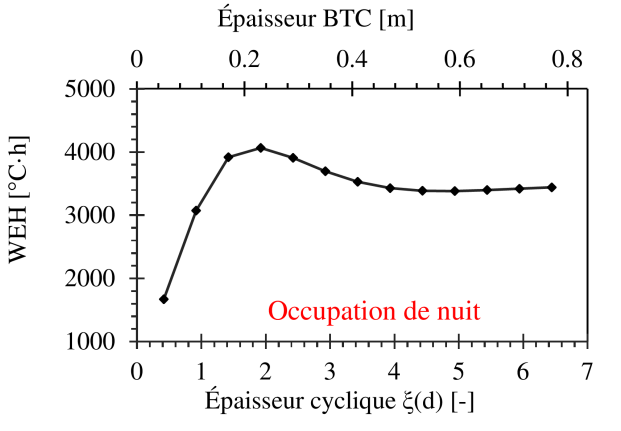
FIGURE 4.3: Évolution de *WEH* de l'habitat mono couche, profil d'occupation de jour en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi



(a)

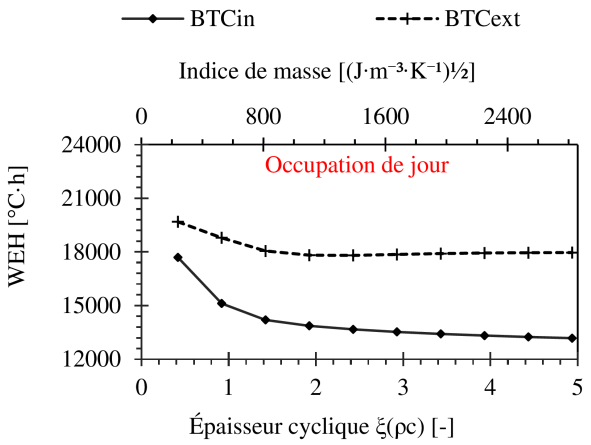


(b)

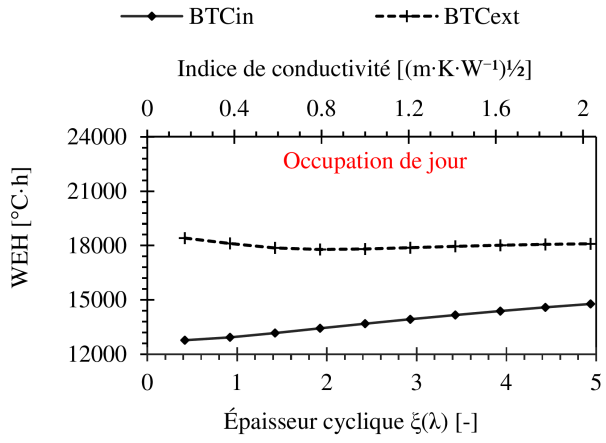


(c)

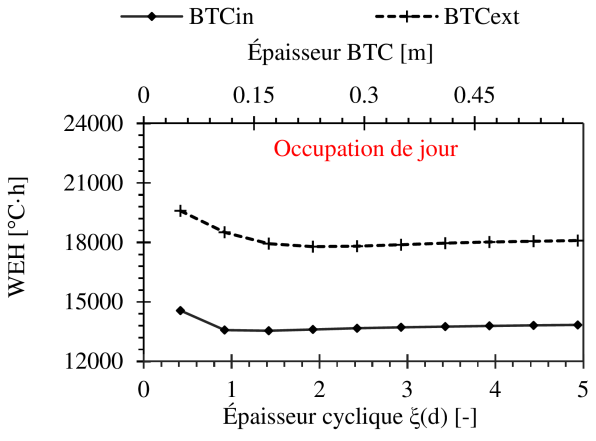
FIGURE 4.4: Évolution de *WEH* de l'habitat mono couche, profil d'occupation de nuit en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi



(a)



(b)



(c)

FIGURE 4.5: Évolution de *WEH* de l'habitat double couche, profil d'occupation de jour en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi

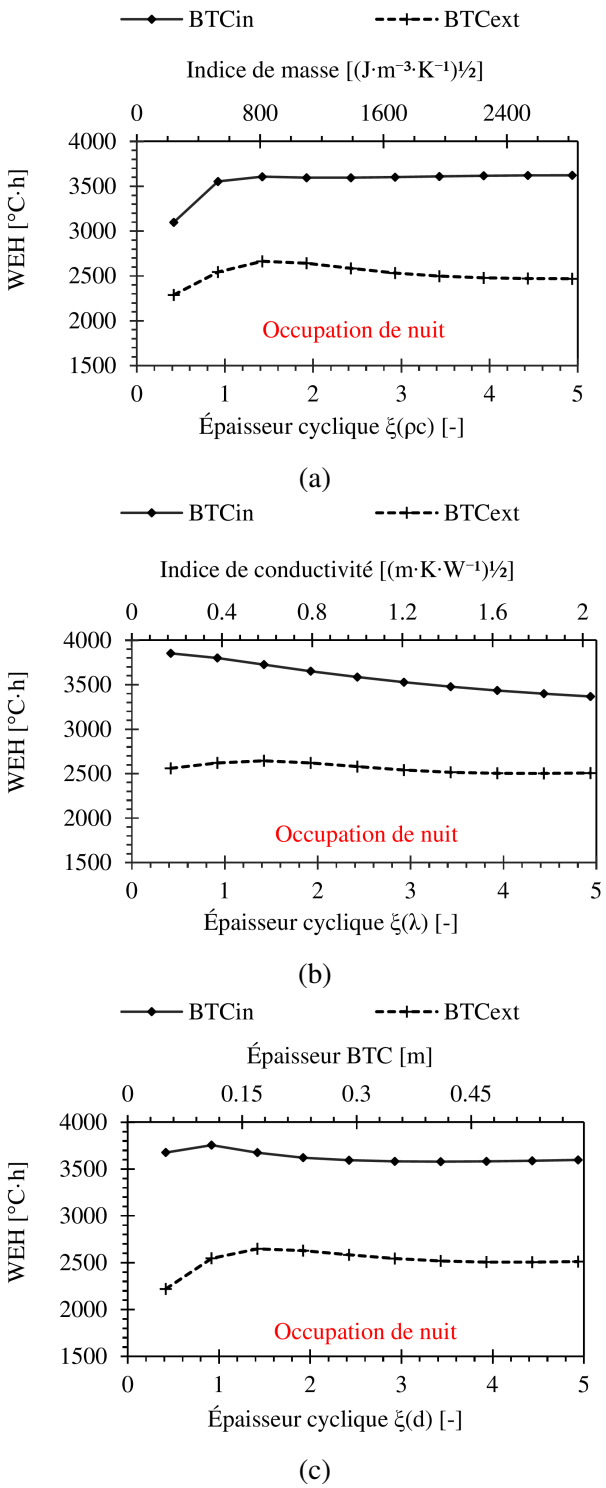


FIGURE 4.6: Évolution de *WEH* de l'habitat double couche, profil d'occupation de nuit en fonction de (a) l'indice de masse, (b) de l'indice de conductivité thermique et (c) de l'épaisseur de la paroi

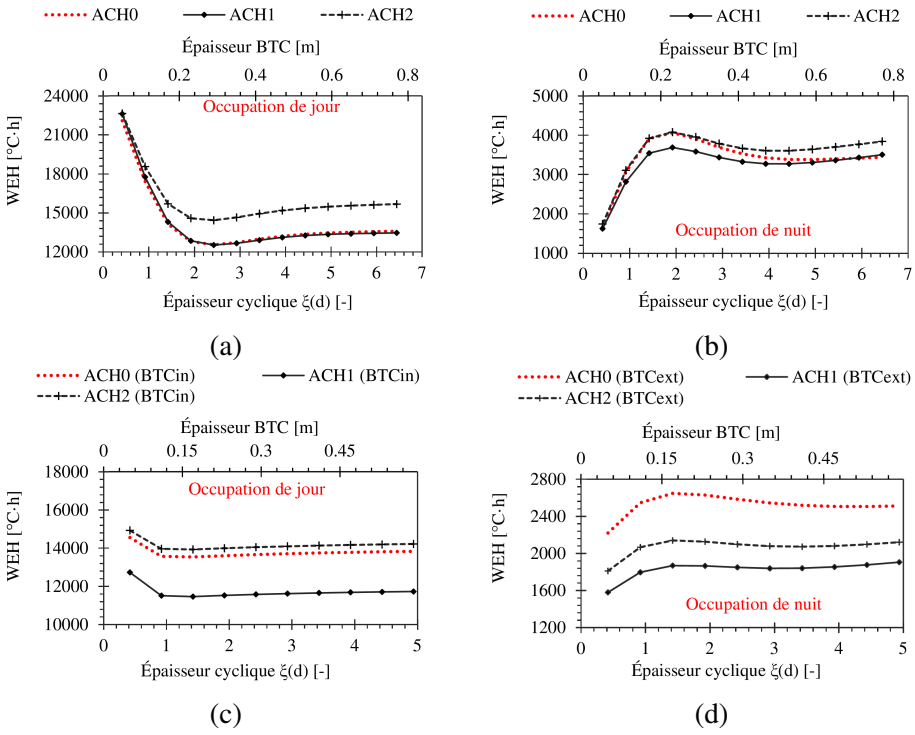


FIGURE 4.7: Impact de la stratégie de ventilation sur ξ_{opt} : (a) profil d'occupation de jour de l'habitat mono-couche, (b) profil d'occupation de nuit de l'habitat mono-couche, (c) profil d'occupation de jour de l'habitat double-couche et (d) profil d'occupation de nuit de l'habitat double-couche

BTC_{in} et BTC_{ext} respectivement pour le profil d'occupation de jour et de nuit). Dans tous les cas de figure le scénario ACH1 est celui qui minimise les valeurs de *WEH*. ACH2 présente le pire scénario pour le profil d'occupation de jour. Il est constaté que les optimums de ξ ne sont pas affectés par le mode de ventilation.

4.2.3 Conception thermique de la paroi

Outils de dimensionnement

Les valeurs de ξ_{opt} déterminées à la section 4.2.2 sont utilisées pour la conception thermique de la paroi. Elles sont résumées dans le tableau 4.5. Sur la base des valeurs de ξ_{opt}, la conception thermique a consisté à définir la diffusivité thermique du matériau en fonction de l'épaisseur de la couche BTC (Cf. équation 4.2).

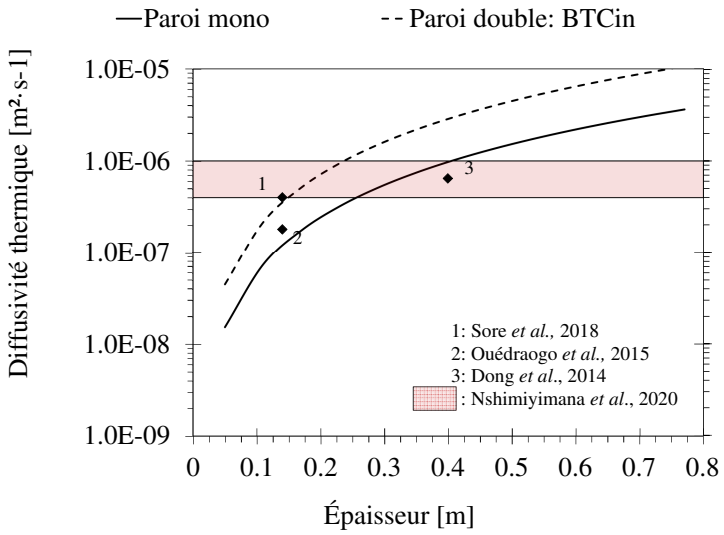
TABLE 4.5: Récapitulatif des valeurs optimales de ξ

	Profil d'occupation de jour	Profil d'occupation de nuit
Paroi mono couche	2.43	$\geq$ 3.93
Paroi double couche	1.92 (BTC_{in})	$\geq$ 2.43 (BTC_{ext})

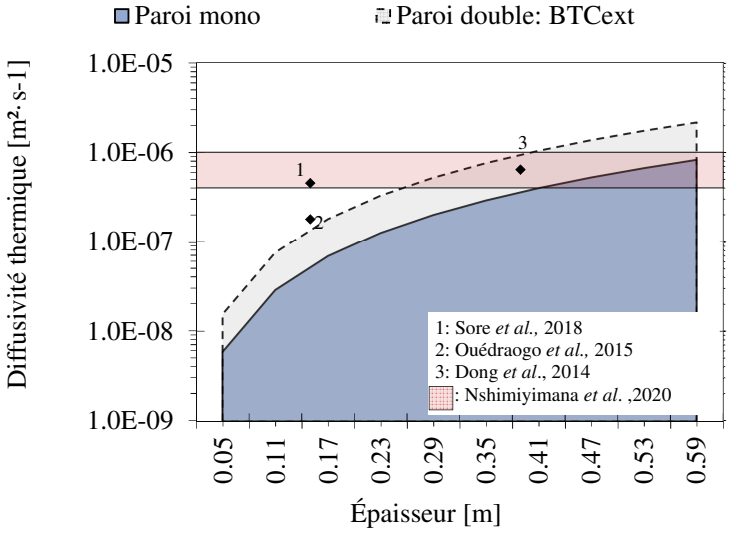
La figure 4.8 montre la diffusivité thermique que doit posséder la BTC en fonction de l'épaisseur afin de minimiser *WEH*. Une conception adaptée consiste à définir les propriétés de la masse thermique, en l'occurrence la BTC, de sorte à intercepter les courbes pour le profil d'occupation de jour (figure 4.8 (a)) et à être dans la zone colorée pour le profil d'occupation de nuit (figure 4.8 (b)).

Quatre parois en terre crue issues de la littérature scientifique sont également identifiées sur la figure 4.8. Il s'agit de mettre en avant l'adéquation des recherches visant à améliorer les propriétés thermiques du matériau et des parois. La paroi notée "1" est à base de BTC géopolymère dont la latérite est issue de la carrière de Kamboinsé, au Burkina Faso (Sore *et al.*, 2018). La paroi notée "2" est constituée de BTC consistant en un mélange de latérite (carrière de Loumbila, Burkina Faso) et de cellulose de papier (Ouédraogo, 2015). La paroi "3", en pisé, est celle définie par Dong *et al.* 2014a dans son étude d'optimisation du confort thermique des bâtiments en Australie. Il est également représenté sur la figure 4.8 l'intervalle des valeurs de diffusivité thermique des BTC issues des travaux de recherche de Nshimiyimana *et al.* 2020. En effet, suivant la nature des sous-produits incorporés à la production de la BTC et les différentes formulations réalisées, la diffusivité thermique varie entre $4 \cdot 10^{-7}$ et $6 \cdot 10^{-7}$.

Ainsi, la paroi "1" devrait être accompagnée d'une résistance thermique, placée du côté extérieur, afin de tirer le meilleur parti du confort thermique que



(a)



(b)

FIGURE 4.8: Propriétés thermiques appropriées de la BTC en vue d'améliorer le confort thermique pour les profils d'occupation (a) de jour et (b) de nuit

peut apporter la paroi aux pièces de l'habitat occupées de jour. De même, la paroi "3", mono couche, est adaptée aux pièces ayant un profil d'occupation de nuit. L'intervalle des valeurs de diffusivité thermique permet une plus grande flexibilité quant au choix de la BTC (type de sous-produit et formulation) ainsi que de son épaisseur. Cependant, il conviendrait de privilégier de faibles valeurs de diffusivité thermique afin de réduire l'épaisseur, et *in fine*, la quantité de matière à mettre en œuvre.

Application à deux types de terre

La régression qui lie la conductivité thermique à la densité apparente permet une application plus spécifique de la conception des parois. Ainsi, en lieu et place de la diffusivité thermique de la figure 4.8, il est possible de relier l'épaisseur de la couche massive à mettre en œuvre, en l'occurrence la BTC, en fonction de la densité apparente du matériau (cf. section 4.1.1).

Les figures 4.9 et 4.10 montrent la densité apparente que doit avoir le matériau en fonction de l'épaisseur de la couche de BTC pour minimiser *WEH* respectivement pour une terre de Ariana en Tunisie (Mansour *et al.*, 2016) et de Kamboinsé au Burkina Faso (Nshimiyimana, 2020). La valeur de chaleur spécifique est requise pour l'exploitation des figures.

Ces figures révèlent implicitement la priorité à donner entre stockage (augmentation de la densité) et résistance thermique (baisse de la conductivité thermique) lorsque l'optimum ξ est atteint. En effet, l'augmentation de la densité entraine une augmentation de la conductivité thermique qui doit être compensée par une augmentation de l'épaisseur de paroi. Il est donc plus opportun de réduire la capacité de stockage (densité apparente et épaisseur de paroi) au profit d'une baisse de conductivité thermique. Pour allier à la fois confort thermique et économie de ressource (c.-a.-d. quantité de terre à mettre en œuvre), la priorité doit être donnée à la baisse de la conductivité.

4.3 Discussion et Conclusion

Les résultats de ce chapitre sont également discutés à l'annexe C, rédigé en vue d'une publication. Cependant, il est souligné ici les principales conclusions.

L'augmentation de la capacité de stockage des parois, c'est à dire de $\xi(\rho \cdot c)$ et $\xi(d)$, offre l'opportunité d'améliorer le confort thermique global de l'habitat dans le climat de Ouagadougou (Cf. section 4.2.1). Ce résultat est conforme aux prescriptions de conception de l'enveloppe des habitats en climat chaud de l'approche bioclimatique (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015). Cependant, les résultats obtenus dans la présente recherche précisent davantage les valeurs des propriétés thermiques à mettre en œuvre.

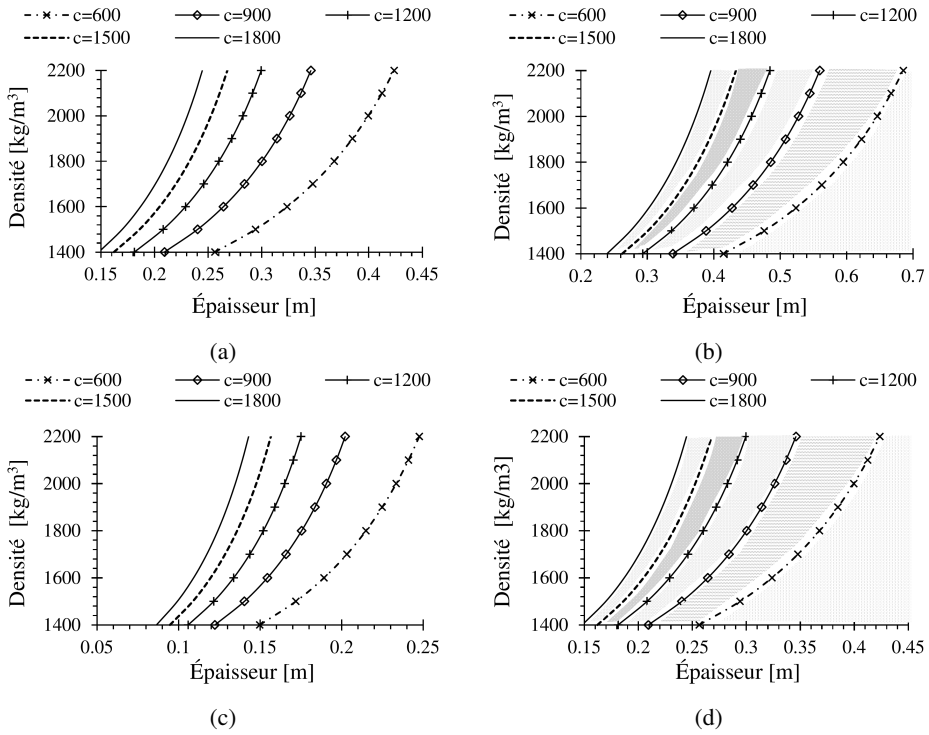


FIGURE 4.9: Conception thermique de la paroi, $\lambda(\rho)$ Mansour *et al.* 2016, pour l'habitat (a) simple couche et profil d'occupation de jour, (b) simple couche et profil d'occupation de nuit, (c) double couche avec profil d'occupation de jour et (d) double couche avec profil d'occupation de nuit

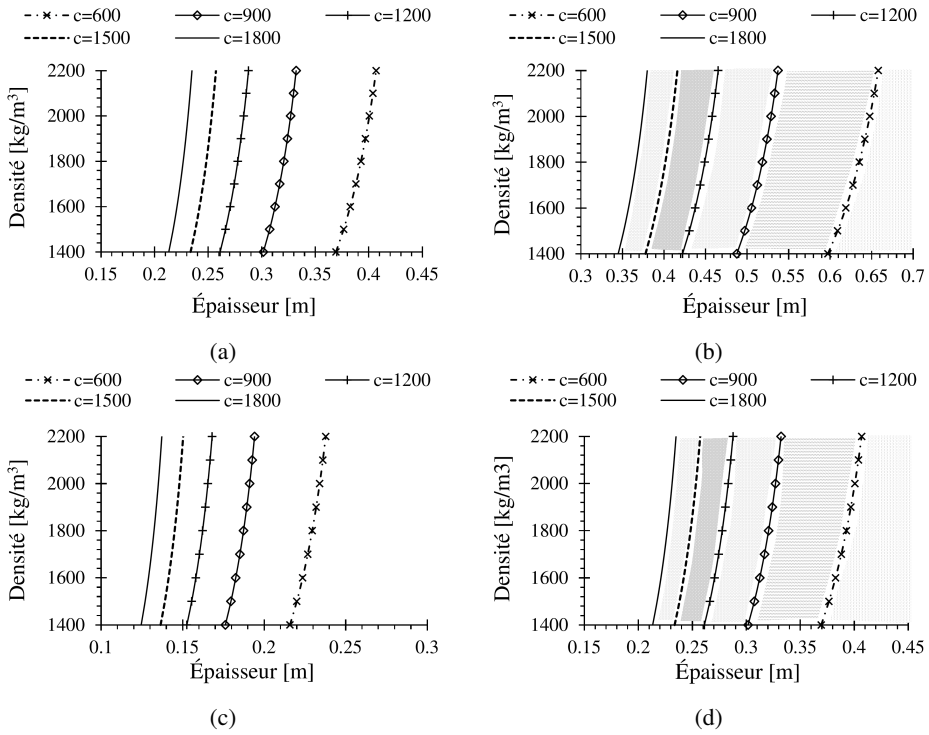


FIGURE 4.10: Conception thermique de la paroi, $\lambda(\rho)$ Nshimiyimana 2020, pour l'habitat (a) simple couche et profil d'occupation de jour, (b) simple couche et profil d'occupation de nuit, (c) double couche avec profil d'occupation de jour et (d) double couche avec profil d'occupation de nuit

L'intérêt d'associer une résistance thermique à la masse thermique que constitue la BTC se traduit par une baisse de l'épaisseur cyclique requise. Pour le confort thermique global de l'habitat, la BTC doit être placée du côté adjacent à l'environnement intérieur. La masse thermique à l'intérieur stocke le gain de chaleur issu de la radiation solaire, de la ventilation et de l'infiltration d'air. La résistance thermique à l'extérieur freine la pénétration de la chaleur au travers de la paroi et donc réduit la capacité du stockage requis pour assurer le confort. Ces résultats sont similaires à ceux obtenues par (Al-Sanea *et al.*, 2012; Eben Saleh, 1990; Ozel, 2014).

Les profils d'occupation des pièces de l'habitat ont une influence sur la conception de la paroi. À l'instar des conceptions de parois préconisées pour le confort global de l'habitat, celles des pièces d'occupation de jour, telles que le séjour, doivent privilégier la masse thermique (paroi mono couche) et la résistance thermique placée du côté extérieur (paroi double). Par contre, pour les pièces occupées principalement la nuit, telles que les chambres, la paroi mono couche idéale est difficilement concevable au sens physique (d =0, ρ =0, $\lambda \rightarrow \infty$). À défaut, les propriétés thermiques définies à la section 4.2.2 offrent l'opportunité d'améliorer le confort.

Sur la base de l'épaisseur cyclique ξ et des heures pondérées d'inconfort thermique *WEH*, un outil graphique de conception de la paroi est élaboré. Son utilisation permet soit de déterminer l'épaisseur de la masse thermique, en l'occurrence la couche en BTC, à mettre en œuvre connaissant la diffusivité thermique du matériau. Soit d'adapter la production des BTC (nature des terres, mélanges, taux de compaction, etc.) lorsque l'épaisseur de la paroi est imposée.

L'essai de caractérisation thermique de la paroi a établi le domaine d'application de l'épaisseur cyclique : $\xi < 3$ (Cf. section 3.2.4). Cependant, l'épaisseur cyclique optimum de la paroi mono couche du profil d'occupation de nuit est $\xi_{opt} = 3.93$. Par conséquent, il convient de préciser que, pour ce cas, il est possible d'atteindre le même niveau de confort par des propriétés thermiques autres que ceux qui définissent $\xi_{opt} = 3.93$.

Chapitre 5

Étude expérimentale de la performance thermique des parois en BTC

L'étude visant la conception thermique de la paroi extérieure, réalisée au chapitre 4, s'est basée sur de la modélisation thermique. Il y est souligné, entre autres résultats, l'importance de la position relative des couches de matériaux composant la paroi. Le présent chapitre vient, en sus, consolider les résultats théoriques grâce à une étude expérimentale. Ainsi, l'objectif visé par cette expérimentation est de (i) montrer l'intérêt d'associer une résistance thermique aux murs extérieurs des habitats en terre crue et naturellement ventilés ; (ii) définir la position relative de la masse thermique (la BTC) et de la résistance thermique (la laine de verre) en lien avec les périodes d'occupation ; (iii) d'étudier l'impact que peuvent avoir les scénarios de ventilation sur le climat intérieur. Les objectifs de ce présent chapitre ne diffèrent guère de ceux du chapitre 4 à la différence qu'il faille, ici, composer avec les limites liées à une étude expérimentale. La première partie est consacrée à la méthodologie adoptée tandis que la seconde partie présente les résultats. Une conclusion et discussion viennent clore ce chapitre.

Sommaire

5.1 Méthodologie expérimentale 112
5.2 Résultats 118
5.3 Discussion et conclusion 126

5.1 Méthodologie expérimentale

La première partie de cette section présente le bâtiment expérimental ainsi que les paramètres thermiques mesurés. La seconde partie est consacrée aux différentes conceptions de parois en lien avec ceux investiguées par simulation thermique. La troisième partie définie les scénarios de ventilation appliquées lors du monitoring. La quatrième partie définit les paramètres d'évaluation de la performance thermique des parois. La méthodologie est reprise de manière plus détaillée à l'annexe D.

5.1.1 Description du bâtiment expérimental

L'étude expérimentale est menée sur un bâtiment pilote situé dans l'enceinte de l'institut 2IE, sur son site de Kamboinsin (GPS : 12 ° 27' 49" Nord, 01 ° 33' 12.2" Ouest). Le bâtiment se compose d'une seule pièce d'une surface au sol d'environ 10 m^2. Les ouvertures consistent en deux fenêtres métalliques (châssis) et vitrées (vitrage de 3.00 mm) ouvrant à la française ainsi que d'une porte métallique vitrée. Le système de toiture est constitué(i) d'une tôle métallique en alliage aluminium-zinc de 35/100 mm d'épaisseur dans sa partie supérieure, (ii) d'un comble naturellement ventilé grâce à des orifices circulaires, (iii) et d'un faux plafond en contre-plaqué de 3.00 mm d'épaisseur dans sa partie inférieure. La paroi extérieure est constituée de BTC stabilisées à 8 % de ciment et jointées au mortier de ciment. Elles proviennent de l'entreprise "Zi-matériaux" et les propriétés thermiques de la brique ont été précédemment caractérisées par Moussa *et al.* 2019; Ouedraogo *et al.* 2015a; Sore *et al.* 2018. L'épaisseur de la paroi est de 14 cm. La figure 5.1 montre le plan du bâtiment expérimental.

Bien que le bâtiment pilote ne reflète pas le type d'habitat ciblé par la présente étude, il constitue un bon compromis entre investigation expérimentale et habitat à l'échelle réelle. L'expérimentation menée est axée sur la conception thermique de la paroi et, de ce fait, ne prétend pas décrire le comportement thermique des habitats en BTC au Burkina Faso. Des bâtiments de taille similaire ont précédemment servi de base aux études liées à l'amélioration du climat intérieure (Rincón *et al.*, 2019; Rojas *et al.*, 2016; Kuznik et Virgone, 2009).

Les caractéristiques des capteurs de température sont celles décrites à la section 3.1.1. Le capteur pour la mesure de la température extérieure est placé dans un boitier muni d'orifices de ventilation. Les mesures ainsi enregistrées sont celles de l'air extérieur affranchi de l'impact de la radiation solaire.

Les températures des surfaces extérieures et intérieures de la paroi sont mesurées par contact des capteurs. Ceux-ci sont protégés de l'influence de la radiation solaire et de la température de l'air grâce à de la laine de verre.

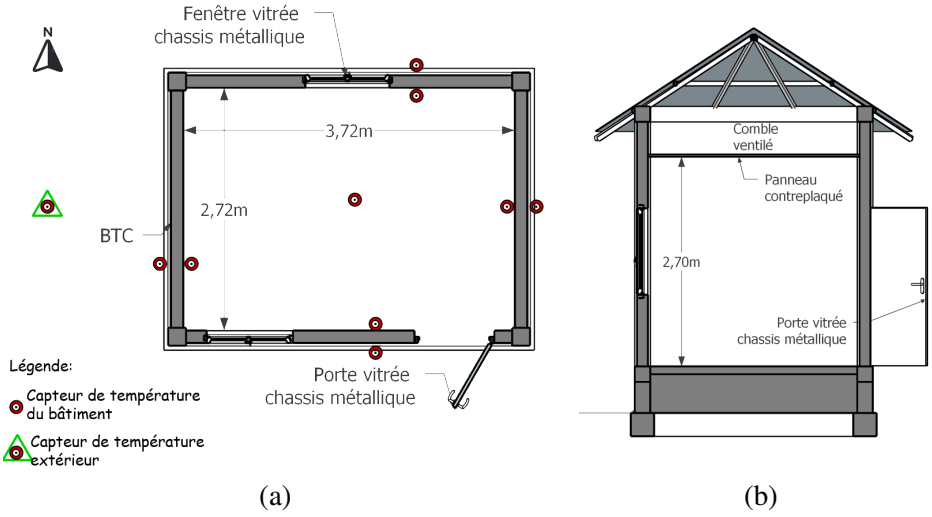


FIGURE 5.1: Plans du bâtiment expérimental et positions des capteurs de températures (a) vue en plan, (b) vue en élévation

Ce dernier fait office d'écran entre le climat extérieur et le capteur. Ainsi, de l'extérieur vers l'intérieur, le dispositif consiste en un scotch, de laine de verre ($10\ x\ 10\ x\ 5\ cm^3$ environ) puis le capteur accolé à la surface de la paroi. Les positions des capteurs sont illustrées sur la figure 5.1 (a).

5.1.2 Systèmes de parois étudiées

Les systèmes de parois implémentés sont calqués sur ceux considérés lors de la simulation thermique. Il ne fut pas possible d'étudier expérimentalement l'impact de l'ajustement de l'épaisseur cyclique ξ sur le climat intérieur. Il s'est agi donc d'étudier l'intérêt de la résistance thermique ainsi que sa position relative.

Des matériaux disponibles localement ont été utilisés pour mettre en place 3 types de parois. De la laine de verre de marque "ISOVER Saint-gobain" a été utilisée comme isolant thermique. Ces propriétés thermiques sont $\lambda = 0.042\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (à 24 ° C), $c = 1030\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $d = 0.05\ m$ et un poids surfacique de $0.5\ kg \cdot m^{-2}$, [1]. Des panneaux de contreplaqué d'épaisseurs 5 mm ainsi que des chevrons de bois ont servi d'ossature à la mise en place de la résistance thermique.

Les trois types de parois ayant fait l'objet du monitoring sont :

— La paroi double composée de la couche en BTC placée du côté intérieur et de la résistance thermique à l'extérieur. Cette configuration est

1. https ://www.isover-technical-insulation.com/products/tech-roll-30

nommée "BTC_{in}".
— La paroi double composée de la résistance thermique placée du côté intérieur et de la couche en BTC à l'extérieur. Cette configuration est nommée "BTC_{ext}".
— La paroi mono couche en BTC de 14 cm. Il s'agit de la configuration d'origine du bâtiment. Cette configuration est nommée "BTC".

D'une configuration à l'autres il s'est agi de changer la position de l'isolant thermique, les autres composants du bâtiment ne subissant aucune modification. La figure 5.2 illustre les 3 types de parois implémentées sur le bâtiment expérimental.

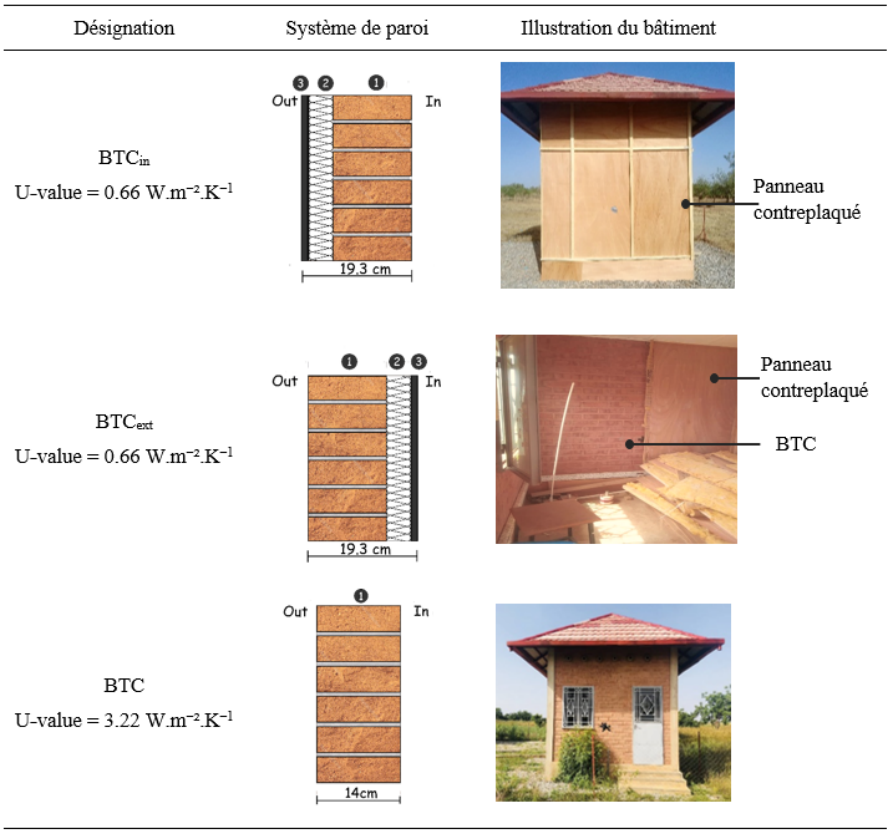


FIGURE 5.2: Illustration des systèmes de parois étudiés et du bâtiment pilote

Le tableau 5.1 indique les propriétés thermiques des matériaux composant la paroi du bâtiment pilote.

TABLE 5.1: Propriétés thermiques des matériaux composant la paroi du bâtiment expérimental, (Sore *et al.*, 2018; Moussa *et al.*, 2019; Denouwe *et al.*, 2015)

N°	Matériau	Densité $[kg \cdot m^{-3}]$	Chaleur spécifique $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Conductivité thermique $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Épaisseur $[m]$
1	BTC	1900	1089	1.00	0.14
2	Laine de verre	10	1030	0.042	0.05
3	Panneau de contreplaqué	560	1500	0.13	0.003

5.1.3 Scénarios de ventilation

Trois scénarios de ventilation sont appliqués. Le scénario de référence, nommé "SAC0", est celui pour lequel les fenêtres sont fermées durant le monitoring. Les échanges potentiels d'air entre l'environnement extérieur et intérieur sont donc uniquement dus à de l'infiltration. Le scénario, nommé "SAC1" consiste à de la ventilation nocturne. Les fenêtres sont fermées durant le jour et complètement ouvertes durant la nuit. Le scénario, nommé "SAC2" correspond à de la ventilation naturelle continue. Les fenêtres sont ouvertes durant le monitoring. Le tableau 5.2 résume les scénarios ainsi que leurs périodes d'application.

TABLE 5.2: Périodes d'application des scénarios de ventilation

	BTC	BTC_{ext}	BTC_{in}	Positions des fenêtres
SAC0	Du 22/01/20 au 02/02/20	Du 02/09/19 au 13/09/19	Du 08/04/19 au 15/04/19 and Du 01/05/19 au 03/05/19	Fermé toute la journée
SAC1	Du 04/02/20 au 16/02/20	Du 23/09/19 au 03/10/19	Du 18/05/19 au 27/05/19	Fermé de 06h00 à 18h00, ouvert de 18h00 à 06h00
SAC2	Du 21/02/20 au 02/03/20	Du 25/10/19 au 04/11/19	Du 23/04/19 au 28/04/19 and Du 09/05/19 au 12/05/19	Ouvert toute la journée

La défaillance de certains capteurs durant l'expérimentation a restreint la période de mesures à 11 jours pour chaque configuration de paroi et scénario de ventilation. Bien que pour certains cas, l'acquisition des données ai été complet, c'est-à-dire 21 jours comme initialement prévu, il était nécessaire d'uniformiser l'ensemble des périodes aux fins d'analyses comparatives.

5.1.4 Paramètres d'évaluation de la performance thermique des parois

Une étude comparative de la capacité des systèmes de paroi à impacter sur le climat intérieur nécessite d'effectuer des mesures simultanées sur des bâtiments en tous points identiques à l'exception des parois. En l'occurrence, pour la présente étude, 3 bâtiments (pour 3 types de paroi) auraient été nécessaire afin de s'affranchir de l'influence du climat extérieur. Or, un unique bâtiment pilote était à la disposition de l'étude. Les monitorings successifs se sont étalés dans le temps et il a fallu composer avec la contrainte liée à la variation du climat extérieur. Ainsi les paramètres pour la comparaison de la performance thermique des parois se sont limités au déphasage thermique, à l'amortissement thermique et à la surchauffe relative.

Déphasage thermique

Il est défini comme l'intervalle de temps entre le pic maximum de température de la surface extérieure ($t_{T_{max,surf,ext}}$) et celui de la surface intérieure ($t_{T_{max,surf,int}}$). Il est calculé pour chaque jour suivant l'équation 5.1.

$$t_{lag} = t_{T_{max,surf,ext}} - t_{T_{max,surf,int}} \tag{5.1}$$

Avec, $t_{T_{max,surf,ext}}$ et $t_{T_{max,surf,int}}$, respectivement la température journalière maximale de la surface extérieure et intérieure.

Amortissement thermique

Le facteur d'amortissement thermique (d_f) est défini comme le ratio entre l'amplitude de température de la surface extérieure sur celle intérieure. Il est usuellement appliqué aux surfaces de la paroi suivant l'équation 5.2.

$$d_f = \frac{(T_{surf,int,max} - T_{surf,int,min})}{(T_{surf,ext,max} - T_{surf,ext,min})} \tag{5.2}$$

Avec, $T_{surf,ext,max}$ et $T_{surf,int,max}$, respectivement la température journalière maximale de la surface extérieure et intérieure ; $T_{surf,ext,min}$ et $T_{surf,int,min}$ sont respectivement la température journalière minimale de la surface extérieure et intérieure.

À l'instar de l'amortissement thermique appliqué aux surfaces de parois, il est défini ici, l'amortissement thermique appliqué à l'environnement climatique ($d_{f,env}$). $d_{f,env}$ est la variation relative de température opérative et est calculé suivant l'équation 5.3.

$$d_{f,env} = \frac{(T_{op,max} - T_{op,min})}{(T_{ext,max} - T_{ext,min})} \tag{5.3}$$

Avec, $T_{op,max}$ et $T_{op,min}$, respectivement la température opérative journalière maximale et minimale. La température opérative est calculée suivant l'équation 5.4 (ASHRAE, 2013). $T_{ext,max}$ et $T_{ext,min}$, respectivement la température extérieure journalière maximale et minimale.

$$T_{op} = \frac{\bar{T}_{surf,int} + T_{int}}{2} \tag{5.4}$$

Avec, $\bar{T}_{surf,int}$ la température moyenne horaire des 4 surfaces intérieures ; T_{int} la température horaire de l'air intérieur.

De faibles valeurs de d_f et $d_{f,env}$ (≈ 0) indiquent une importante réduction de la fluctuation thermique intérieure comparativement à celle extérieure.

Surchauffe

Les normes et recommandations en ce qui concerne l'évaluation de la surchauffe des bâtiments sont basées sur le critère d'un seuil de température fixe ou adaptatif. Le seuil fixe (26 ou 28 $°C$ suivant le cas) est défini sur la base d'études en chambre climatique et est applicable aux bâtiments conditionnés. Le seuil adaptatif suggère que la réponse thermique des occupants dépend de la température extérieure. Son application requiert des mesures sur une période suffisante (pas moins de sept jours) afin de représenter le climat extérieur pour lequel les occupants adaptent leur comportement physiologique et psychologique (Pathan *et al.*, 2017; ASHRAE, 2013; CIBSE, 2006).

La durée limitée du monitoring n'a pas permis de considérer un seuil adaptatif, car l'analyse aurait porté sur quatre jours. En effet, sept jours sont requis pour définir le seuil du huitième jour et donc seule l'analyse des jours 8, 9, 10 et 11 aurait été possible. Ainsi, un seuil de surchauffe fixe est adopté. Il permet de considérer les données de toute la période de mesure. Cependant, pour s'adapter aux conditions de l'étude (bâtiment naturellement ventilé, climat chaud), ce seuil est défini comme la température moyenne extérieure sur la durée du monitoring ($\bar{T}_{ext}$). Lorsque la température opérative est supérieure à la température moyenne extérieure, alors l'environnement thermique est considéré en surchauffe.

Pour faciliter la lecture graphique des résultats, l'indice rT_{op} est défini (équation 5.5). Le numérateur est la température opérative (ASHRAE, 2013) tandis que le dénominateur est le seuil de surchauffe. $rT_{op} > 1$ indique une surchauffe de l'environnement intérieur.

$$rT_{op} = \frac{T_{op}}{\bar{T}_{out}} \tag{5.5}$$

5.2 Résultats

5.2.1 Déphasage thermique

La figure 5.3 montre l'évolution des températures des surfaces extérieure et intérieure des parois Sud pour les systèmes BTC_{in}, BTC_{ext} et BTC. L'annexe D donne les résultats des trois autres orientations de paroi. Le scénario de ventilation appliqué est SAC0.

Les résultats pour BTC_{in} (figure 5.3 (a)) montrent que les températures de surface extérieure oscillent entre 22.6 et 51.3 $°C$ tandis que celles de la surface intérieure se rangent entre 33.1 et 36.5 $°C$. La radiation solaire explique les températures maximales extérieures aussi élevées. Le déphasage moyen sur la période de mesure est t_{lag} = 2h48. En effet, les températures maximales sont atteintes en moyenne à 16h12 et 13h24, respectivement à la surface intérieure et extérieure.

Le bâtiment BTC_{ext} (figure 5.3 (b)) présente une fluctuation de température de surface extérieure moins prononcée que celle du bâtiment BTC_{in} en raison de climat qui prévalait durant la période de mesure. Les températures extérieures se situent entre 22.6 et 36.5 $°C$ tandis que celles intérieures oscillent entre 24.6 et 33.5 $°C$. Le déphasage moyen est t_{lag} = 1h. Les températures maximales extérieure et intérieure sont respectivement atteintes en moyenne à 14h32 et 15h32.

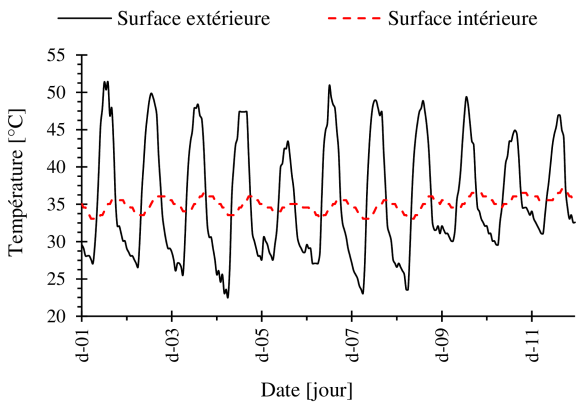
La figure 5.3 (b), relative au bâtiment BTC, montre que les températures de surface extérieure sont rangées entre 31.1 et 43.0 $°C$ tandis que celles de la surface intérieure oscillent entre 31.6 et 39.1 $°C$. Le déphasage moyen est t_{lag} = 2h.

5.2.2 Amortissement thermique

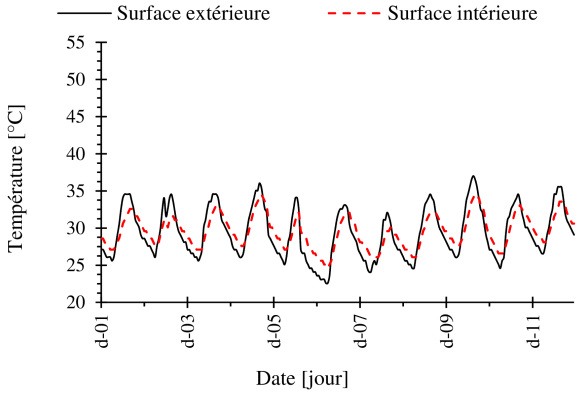
Les facteurs d'amortissement thermique des parois, d_f, sont illustrés à la figure 5.4. Le scénario SAC0 est appliqué. Le bâtiment BTC_{in} est celui qui présente les facteurs les plus faibles (0.07 à 0.13) tandis que le bâtiment BTC à ceux les plus élevés (0.67 à 0.87).

Le coefficient de transmission thermique en régime permanent de la paroi mono couche est supérieur a celui des parois doubles (3.22 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ contre 0.66 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Ceci explique les différences observées. En effet, du fait de la forte transmission thermique, les températures de surfaces intérieures des parois mono couche sont plus proches de celles extérieures. Étant donné que le coefficient de transmission thermique en régime permanent est identique pour les parois doubles, une explication se trouve dans les paramètres thermiques dynamiques.

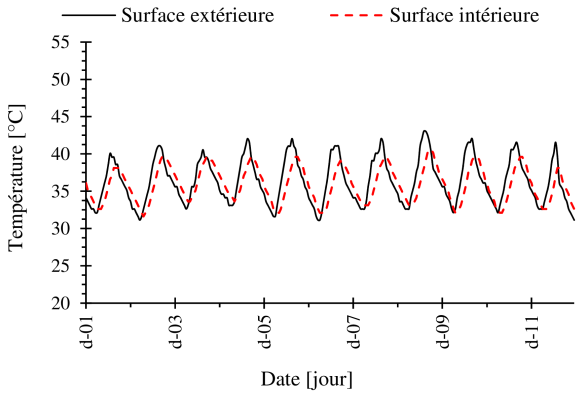
La capacité thermique dynamique interne, calculée suivant NF ISO 13786 2007 (méthode des admittances), de la paroi BTC_{ext} vaut 11.41 $kJ \cdot m^{-2} \cdot$



(a)



(b)



(c)

FIGURE 5.3: Évolution des températures de surface de la paroi Sud (a) BTC_{in}, (b) BTC_{ext} et (c) BTC

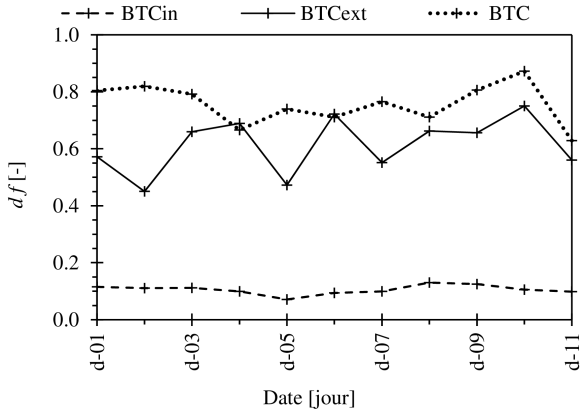


FIGURE 5.4: Amortissement thermique d_f des différents systèmes de parois

$K^{-1,\,2}$ contre 71.14 $kJ \cdot m^{-2} \cdot K^{-1,\,2}$ pour la paroi BTC_{in}. La capacité de stockage supérieure de la paroi BTC_{in} résulte en de faibles fluctuations de températures de surface intérieure, qui de fait, résulte en un facteur d'amortissement faible.

La figure 5.5 montre l'amortissement thermique $d_{f,env}$ en fonction des scénarios de ventilation. L'allure et la position relative des courbes sont similaires à ceux obtenus pour d_f. L'effet de la ventilation (SAC1 et SAC2) se traduit par une augmentation moyenne de $d_{f,env}$ pour chacun des bâtiments. Les différences entre BTC et BTC_{in} ne sont pas significatives. Des deux modes de renouvellement d'air (SAC1 et SAC2), la ventilation nocturne est celle qui fournit les plus faibles valeurs de $d_{f,env}$.

5.2.3 Surchauffe

Influence des scénarios de ventilation

La figure 5.6 montre la surchauffe thermique du bâtiment BTC_{in} sous l'influence des scénarios de ventilation (Cf. annexe D pour les autres types de bâtiments).

Lorsque le bâtiment est maintenu fermé (figure 5.6 (a)), rT_{op} est en moyenne supérieure à 1, indiquant ainsi que la température opérative est supérieure à celle de l'air extérieur. L'effet de serre est susceptible d'être la cause de la surchauffe. Cependant, elle reste limitée au maximum à rT_{op} = 1.10. Lorsque la ventilation nocturne est appliquée (figure 5.6 (b)), la surchauffe maximale atteint rT_{op} = 1.13. Cette valeur est ponctuelle et ne traduit pas la tendance réelle des valeurs maximales de rT_{op} qui sont dans l'ensemble inférieures à

2. Calcul effectué sans prise en compte de la feuille de contre plaquée qui sert de protection

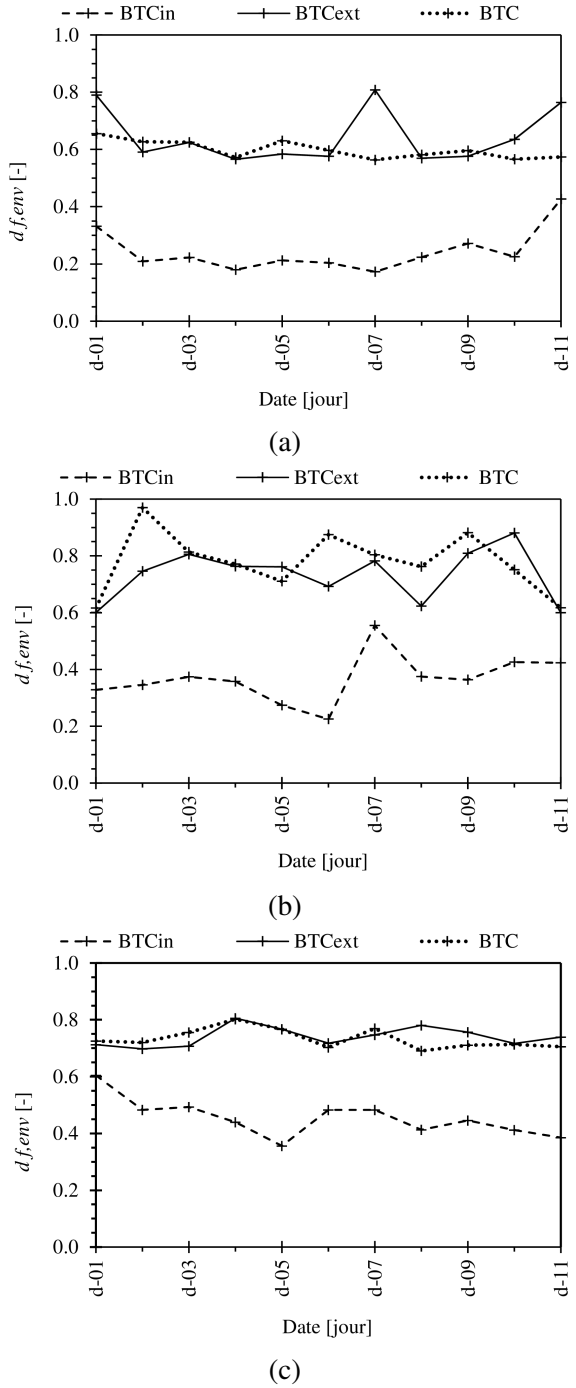


FIGURE 5.5: Amortissement thermique $d_{f,env}$ pour les scénarios de ventilation (a) SAC0 (b) SAC1 et (c) SAC2

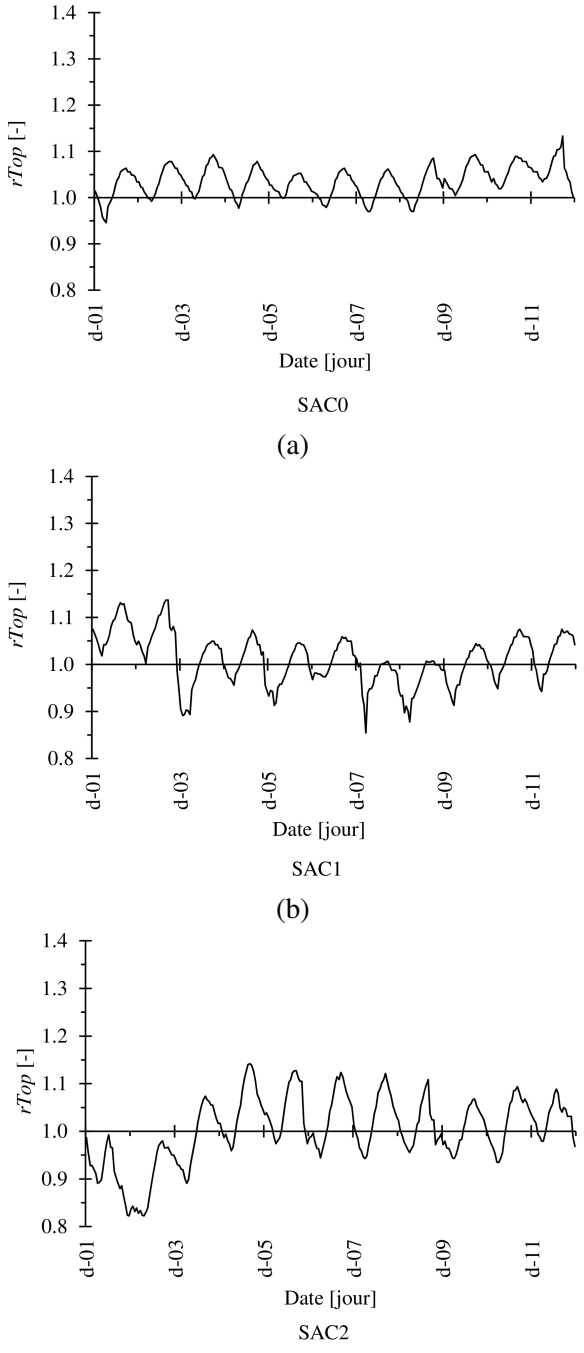


FIGURE 5.6: Surchauffe thermique du bâtiment BTC_{in} en fonction des scénarios de ventilation : (a) SAC0, (b) SAC1 et (c) SAC2

1.10. Les valeurs de rT_{op} < 1 sont plus fréquentes. Comparativement au scénario SAC0, une amélioration générale de l'ambiance thermique est constatée lorsque la ventilation nocturne est appliquée. La même tendance est observée pour les bâtiments BTC_{ext} et BTC (Cf. annexe D). Le scénario de ventilation continue (figure 5.6 (c)) présente également une amélioration du confort comparativement au scénario ou le bâtiment est maintenu fermé, car la fréquence de rT_{op} < 1 est plus élevée. Ce scénario ne présente pas d'amélioration notable comparativement à la ventilation nocturne.

Influence des systèmes de parois

L'impact du type de paroi sur la surchauffe est illustré sur la figure 5.7. Le scénario de ventilation commun est SAC0.

Le bâtiment BTC_{in} est celui qui présente la fluctuation de rT_{op} la plus stable (0.94 à 1.13) tandis que celle du bâtiment BTC se situe entre 0.87 et 1.38. En ce qui concerne le bâtiment BTC_{ext}, les valeurs de rT_{op} se situent entre ceux des deux autres configurations de paroi. Par conséquent, la surchauffe est davantage prononcée dans les bâtiments BTC et BTC_{ext} que dans le bâtiment BTC_{in}. La capacité thermique dynamique interne des parois, comme énoncé à la section 5.2.2, explique les différentes réponses thermiques des bâtiments.

Pour tenir compte des périodes d'occupation des espaces de l'habitat, la distribution de la surchauffe pour des périodes d'occupation spécifiques est étudiée.

Distribution de la surchauffe

La figure 5.8 présente la distribution de la surchauffe en fonction des scénarios de ventilation. Deux catégories en lien avec les périodes d'occupations sont définies. La catégorie "day time" quantifie la surchauffe se produisant entre 5h00 et 21h00. Il correspond à l'intégrale de la partie supérieure à 1 de rT_{op} (figure 5.6) sur la période considérée. De même, la catégorie "night time" fait la sommation de la surchauffe se produisant entre 21h00 et 5h00. Les deux catégories sont exprimées en pourcentage. La somme des catégories "day time" et "night time" est la surchauffe totale qui vaut 100%.

De manière générale, la surchauffe de jour contribue pour une part importante de la surchauffe totale, entre 80 et 100% suivant le type de bâtiment et la ventilation appliquée. Les températures de l'air plus élevées le jour ainsi que la radiation solaire expliquent cette tendance. Le scénario SAC0 (figure 5.8 (a)) enregistre les fractions de surchauffe nocturne les plus importantes comparativement à SAC1 et SAC2. L'impact de la ventilation est notable. En effet, la ventilation nocturne ainsi que continue réduisent la surchauffe pendant la nuit.

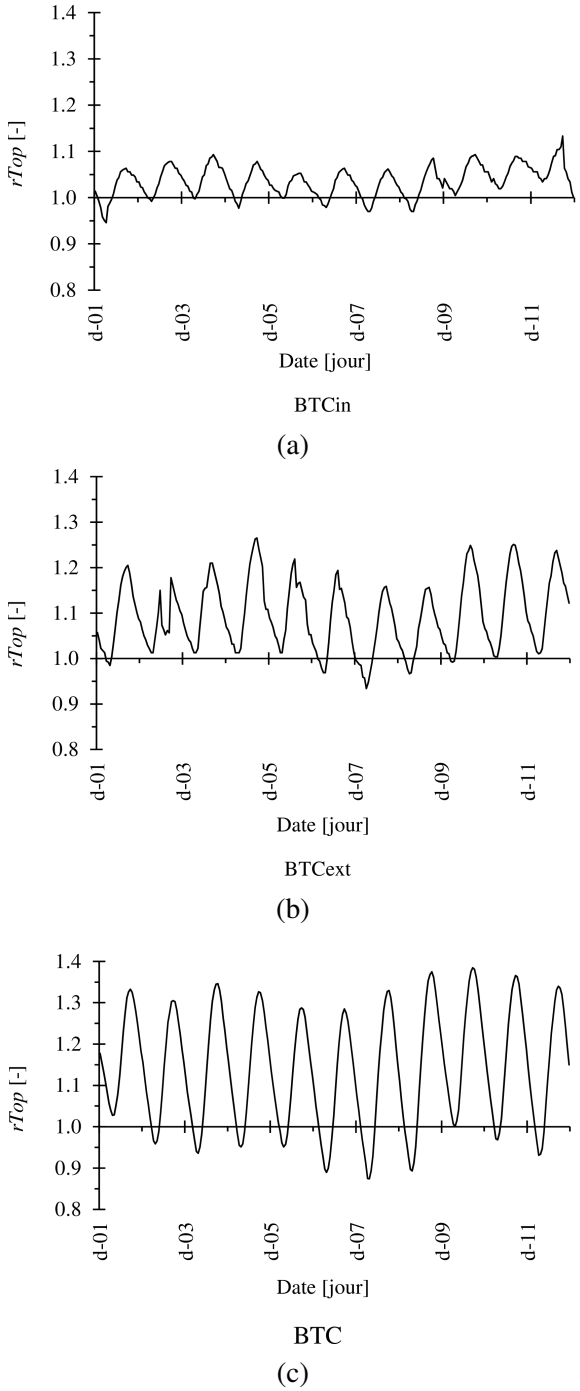


FIGURE 5.7: Surchauffe thermique du bâtiment en fonction des systèmes de parois : (a) BTC_{in}, (b) BTC_{ext} et (c) BTC

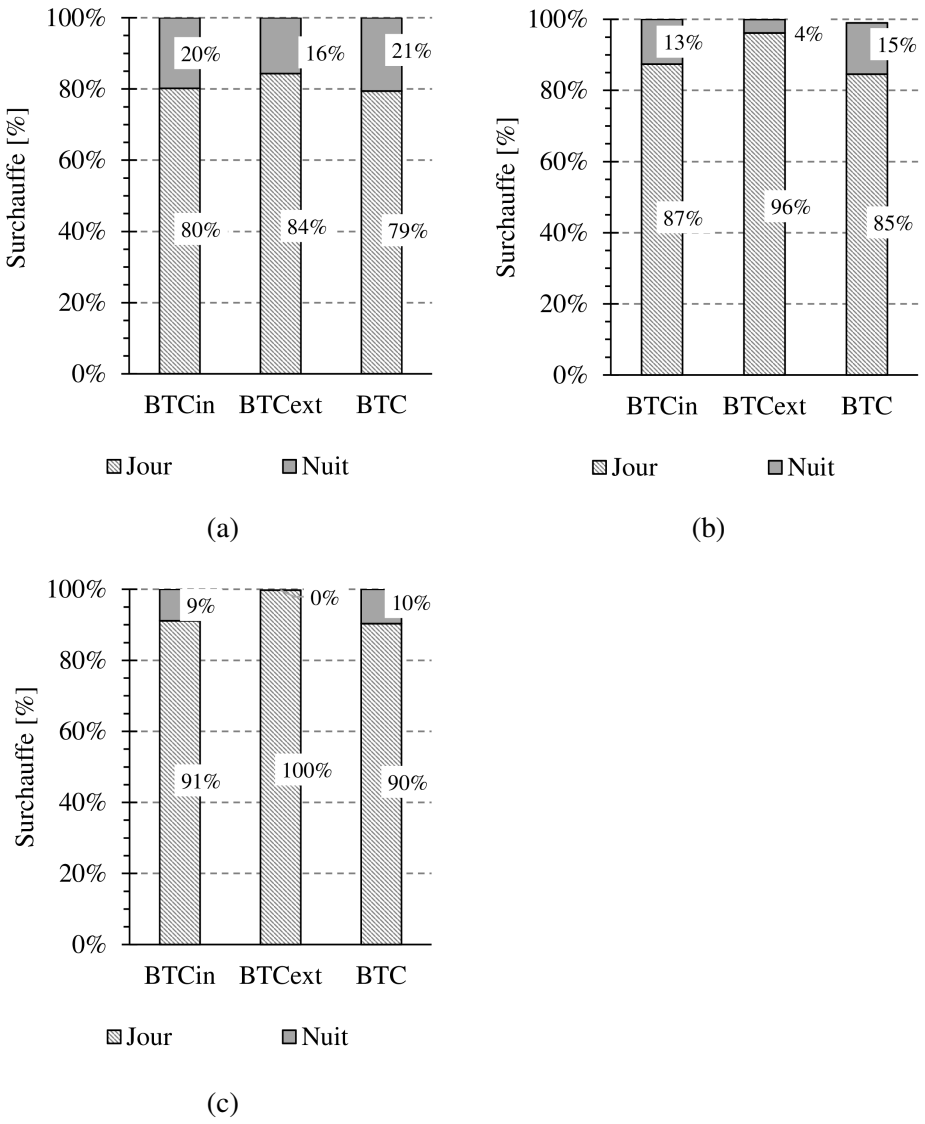


FIGURE 5.8: Distribution de la surchauffe en fonction des scénarios de ventilation (a) SAC0, (b) SAC1 et (c) SAC2

Il est intéressant de noter que bien que la performance globale du bâtiment BTC_{ext} soit inférieure à celui BTC_{in}, il est celui qui permet de minimiser la surchauffe durant la nuit. Pour SAC2, il permet une élimination complète de la surchauffe pendant la nuit contre 9% pour le bâtiment BTC_{in}. Par conséquent dans une démarche de minimisation de la surchauffe, le profil d'occupation des espaces de l'habitat est crucial.

5.3 Discussion et conclusion

L'objectif visé à travers cette étude expérimentale fut d'évaluer la capacité des parois à contribuer à l'atténuation et à prévention de la surchauffe de l'habitat au Burkina Faso. À cet effet, deux profils d'occupation ainsi que trois scénarios de ventilation ont été appliqué afin de refléter au mieux les habitudes locales. La paroi double qui consiste en une couche de BTC placée du côté intérieur et d'un isolant thermique extérieur est celle qui présente les meilleures opportunités d'amélioration du confort thermique à l'échelle globale. La couche BTC placée du côté intérieur résulte en un fort amortissement thermique et une surchauffe moins prononcée que les bâtiments ayant leurs parois en BTC ou consistant en une couche de BTC extérieure.

La ventilation nocturne ainsi que celle continue sont toutes deux des stratégies adaptées pour prévenir la surchauffe des pièces de l'habitat occupées pendant la nuit, et ce, indépendamment du type de paroi implémenté. Cependant, pour les pièces occupées pendant la journée, la ventilation nocturne est la plus adaptée.

Les résultats obtenus s'inscrivent dans ceux déjà mis en avant par la littérature scientifique. En effet, Brambilla et Jusselme 2017 et Al-Sanea *et al.* 2012 ont souligné que, pour tirer le meilleur parti du climat intérieur des bâtiments aux parois extérieures doubles, la masse thermique doit être placée du côté intérieur et la résistance thermique du côté extérieur. En ce qui concerne le mode de renouvellement de l'air intérieur des bâtiments, il doit être défini de sorte à favoriser un refroidissement passif de l'ambiance thermique (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015; Coch, 1998). À ce titre, la ventilation nocturne constitue la meilleure stratégie pour le climat de Ouagadougou.

Cependant, il est mit en avant l'impact des périodes durant lesquels la sensation thermique est évaluée sur la position relative des couches de la paroi. La paroi composée de la BTC, c'est à dire de la masse thermique, du côté intérieur est adapté aux pièces occupées pendant la journée. Par contre, la configuration inverse, c'est à dire la couche de BTC à l'extérieur, est la plus adaptée pour l'enveloppe des pièces occupées pendant la nuit. La capacité thermique dynamique interne plus importance de la paroi BTC intérieure permet un stockage plus conséquent du gain de chaleur du à la ventilation, à la radiation solaire

et éventuellement à l'occupation (métabolisme, appareillages,etc.) pendant la journée. La décharge thermique qui succède pendant la nuit résulte en un flux de chaleur orientée vers l'ambiance intérieure du fait de la présence de l'isolant du coté extérieur. D'ou un risque de surchauffe plus important pendant la nuit pour cette configuration de paroi. Ce résultat vient confirmer celui obtenu par simulation (Cf. chapitre 4) concernant la position relative des couches thermiques. Ils suggèrent une conception différenciée des parois extérieures suivant les pièces de l'habitat.

Conclusion

Ce qu'il faut retenir

L'architecture en Afrique subsaharienne, spécifiquement au Burkina Faso, fait face aujourd'hui à une crise où les choix responsables des acteurs du secteur peuvent être à l'origine de l'émergence de villes durables. L'attractivité des principales villes est telle que le déphasage entre l'offre et la demande de logements se traduit par une précarité de ces derniers. Les aspirations de modernités, le climat ainsi que les insuffisances technologiques locales sont à l'origine d'une architecture vernaculaire où le recourt à l'énergie pour le refroidissement est indispensable. Or, dans un pays où le pourcentage d'accès à l'électricité est de 40.4%, où l'indice de développement humain est l'un des plus faibles au monde, il y a lieu de s'interroger sur la pertinence des solutions architecturales locales.

La modernisation et l'amélioration des techniques de construction en terre crue, à travers des technologies telles que la brique de terre comprimée (BTC), peut contribuer à résoudre la problématique des logements décents, économiquement accessibles et soutenables au Burkina Faso. De plus, de par ces propriétés thermiques, la terre crue offre l'occasion d'améliorer le confort thermique des habitats. Ce dernier point fut l'objet de cette recherche.

L'étude de la réponse thermique d'un bâtiment, dans le contexte local, a permis de formuler des recommandations en ce qui concerne la conception des parois extérieures en terre crue. Dans un premier temps, la simulation thermique dynamique a permis de mener une étude paramétrique de l'influence des propriétés du matériau sur le confort d'un logement. L'étude paramétrique s'est structurée autour d'un modèle thermique calibré, d'un indice capable d'évaluer le climat intérieur (WEH) et d'un indicateur du comportement thermique de la paroi (ξ). Deux types de parois à base de terre crue sont analysés : celle formée d'une couche homogène de matériau (du point de vue thermique) et celle consistant en deux couches aux fonctions thermiques différentes. Une étude expérimentale est dans un second temps réalisée. Elle a consisté à analyser la

performance thermique des types de parois étudiés par simulation. Ainsi, le déphasage, l'amortissement thermique et la surchauffe sont évalués pour les parois mono couche et double.

Les résultats de cette recherche suggèrent de repenser la conception des parois extérieures des habitats au Burkina Faso. Elles doivent s'adapter aux occupants, à leur mode d'occupation des espaces. L'unique conception doit être proscrite au profit de diverses configurations de paroi en accord avec le type de local construit. En effet, la problématique de l'atteinte du confort thermique dans les habitats est un enjeu crucial aujourd'hui et le sera davantage dans les années à venir en raison du réchauffement climatique. Les solutions architecturales doivent être privilégiées et la conception de la paroi extérieure y contribue.

Réponses aux questions de recherche

Les différentes questions qui ont motivé cette recherche ont été explicitées aux sections 1.5 et 2.1. Il est résumé ici les réponses apportées.

Quelles sont les propriétés thermiques des parois en BTC qu'il convient d'avoir afin d'améliorer l'environnement climatique intérieur des habitats ?

L'évolution du niveau de confort thermique (WEH) en fonction des propriétés de la paroi extérieure, que sont la conductivité thermique, la capacité thermique volumique et l'épaisseur, a permis la conception de cette dernière. Les propriétés thermiques sont regroupées en un unique paramètre qui est l'épaisseur cyclique, ξ. En ce qui concerne le confort global de l'habitat modélisé, les résultats ont montré un optimum de $\xi_{opt} = 2.43$ et $\xi_{opt} = 1.92$ respectivement pour la paroi mono couche et la paroi double. Il a été montré que le mode de ventilation n'affecte pas les valeurs optimales d'épaisseur cyclique contrairement au mode d'occupation des espaces. En effet, pour la paroi mono couche, $\xi_{opt} = 2.43$ pour les pièces de l'habitat occupées le jour tandis que $\xi_{opt} = 3.93$ pour celles occupées la nuit.

Quelle position relative de la masse thermique, en l'occurrence de la BTC, dans la paroi double (c.-à-d. composée d'une masse et d'une résistance thermique) ?

Dans les parois composées de deux couches de matériau, la BTC doit être placée du côté adjacent à l'environnement intérieur pour les pièces occupées le jour tandis que pour celles occupées la nuit, elle doit être placée à l'extérieur. Un outil graphique d'aide à la conception thermique des parois est élaboré.

Au vu de la régression qui lie la densité à la conductivité thermique de la terre crue, est-il plus pertinent d'œuvrer à la baisse de la conductivité thermique ou à l'augmentation de la densité ?

La priorité à donner entre conductivité thermique et densité a été étudiée. Bien que la baisse de la conductivité thermique implique une baisse de la densité, l'augmentation de la résistance thermique de la paroi qui en découle s'avère plus intéressante du point de vue des quantités de matière à mettre en œuvre. En effet, à confort thermique équivalent, de faibles valeurs de conductivité thermique (et donc de faibles densités) induisent de faibles valeurs d'épaisseurs de paroi (et donc une minimisation des quantités de matière). Les recherches visant à baisser la conductivité thermique de la terre crue sont par conséquent pertinentes malgré la baisse de la densité que cela implique.

Quelle est la contribution de la chaleur latente à l'amélioration du confort thermique intérieur ?

Les résultats de simulation ont montré la contribution de la chaleur latente dans le processus de régulation de l'ambiance thermique intérieure. Dans l'essai mené, la chaleur latente impacte la température de surface au maximum de $0.016\ °C$. Bien que la terre crue soit un matériau hygroscopique, l'influence des échanges de chaleur liée à l'évaporation et à la condensation de l'eau dans ces pores sur les températures est faible.

Limites

Calibration du modèle thermique

La calibration du modèle de simulation thermique dynamique s'est appuyée sur les données d'une période spécifique et relativement courte (du 01er avril au 10 juin soit 71 jours). Une meilleure précision du modèle peut être obtenue en étendant la période de calibration. Idéalement, des données mesurées sur une année complète auraient permis d'établir un modèle capable de simuler le comportement thermique du bâtiment en toute saison.

Étude expérimentale

L'étude expérimentale menée avait pour objectif de comparer la performance thermique de trois systèmes de paroi. La température sèche ainsi que les radiations solaires sont nécessaires pour caractériser le climat extérieur. Cependant, des problèmes techniques n'ont pas permis d'effectuer une mesure continue de la radiation solaire de l'ensemble des scénarios étudiés. Par conséquent, le climat extérieur a été uniquement modélisé par la température sèche.

Aussi, un monitoring sur une période plus longue que celle adoptée aurait éventuellement permis de mettre en évidence des différences plus significatives entre les parois que celles obtenues.

Toiture

La toiture des habitats au Burkina Faso est l'élément de construction sur lequel agir prioritairement quand il s'agit de réduire le gain de chaleur. En effet, du fait de la contrainte climatique et du mode vernaculaire de réalisation, la toiture constitue la principale source de chaleur dans l'environnement thermique intérieur. C'est pour cette raison que les acteurs locaux du bioclimatisme (Francis Kéré, AVN, etc.) y accordent une grande importance. Cependant, la présente recherche a eu pour objectif d'étudier la contribution des parois extérieures à l'amélioration du confort thermique.

Perspectives

Au terme de cette thèse, voici les points sur lesquels les futures recherches devraient se pencher :

— Le développement des isolants à base de matériau vernaculaire et soutenable. Les résultats probants d'amélioration du confort obtenus avec les parois comportant du polystyrène (simulation) ou de la laine de verre (expérimentation) offrent l'occasion de développer un isolant plus soutenable.

— L'étude et l'optimisation la conception des toitures en lien avec la terre crue. Tant la forme des toitures, la masse thermique que le renouvellement d'air des combles doivent être étudiés pour véritablement améliorer le climat intérieur.

— L'étude de la contribution de la terre crue à l'économique d'énergie des habitats conditionnés. Étant donné qu'une part non négligeable et grandissante de la population Burkinabè a recours à de la climatisation pour assurer un niveau de confort, une optimisation de la conception des parois et de l'habitat en vue d'une économie mériterait d'être réalisée.

— La définition de critères de confort thermique dans le contexte du Burkina Faso. Aussi bien l'approche adaptative que l'approche PMV d'évaluation de l'ambiance thermique offrent la possibilité d'adapter leurs principes généraux au contexte local.

— L'étude de l'évolution du climat intérieur en fonction de paramètres thermiques dynamiques autres que l'épaisseur cyclique. Le comportement thermique de la paroi a été caractérisé, dans la présente thèse, par l'épaisseur cyclique (ξ). Cependant, ce paramètre donne une indication

du comportement thermique et ne permet pas une caractérisation complète de la paroi. Il peut être intéressant d'étudier le profil de surchauffe en fonction de paramètres tels que la transmittance, l'admittance ou le facteur d'amortissement en régime dynamique.

Annexe A : État de l’art des propriétés thermiques du matériau terre crue

TABLE 5.3: Propriétés thermiques

Références	Type de terre	Composition de l'échantillon	$\lambda[W/m.K]$	$\rho[kg/m^3]$	$c_p[J/kg.K]$	$b[\%/\%HR]$
Sore *et al.* (2018)	BTC	92% de latérite ; 8% de ciment ; 16 à 22 % (masse) d'eau	≈ 1900	≈ 1106.87	N/A	
Meukam (2004)	BTC	92% de latérite ; 8% de ciment ; 18 à 25 % (masse) d'eau	0,75 à 1,15	1491 à 1966	900 à 1200	≈4.70
Meukam (2004)	BTC + byproduct	45 à 81% de latérite ; 0 à 45 % de pouzzolane ; 0 à 9 % de sciure de bois ; 10 % de ciment ; 18 à 25 % (masse) d'eau	0,50 à 0,71	1050 à 1643	820 à 1040	N/A
Ouédraogo (2015)	BTC	N/A	0,66 à 0,68	1932 à 1987	1473 à 1511	N/A
Ouédraogo (2015)	BTC + byproduct	0,78% de cellulose de papier	0,49 à 0,60	1719 à 1849	1547 à 1606	N/A
Adam et Jones (1995)	BTC creux	N/A	0,26 à 0,55	1130 à 1920	835 à 836	N/A
Mansour *et al.* (2016)	BTC	87 % de terre ; 13 % d'eau	0.62 à 1.50	1607 à 2194	520	N/A
Guillaud (1995)	BTC	N/A	0.81 à 1.04	1700 à 2200	N/A	N/A
Houben et Guillaud (1989)	Terre compactée	N/A	0,81 à 0,93	1700 à 2200	N/A	N/A
Moevus *et al.* (2013)	Terre compactée	N/A	0,50 à 1,70	1600 à 2200	960 à 2200 $(kJ/m^3.K)$	N/A
El Fgaier (2013)	Terre crue	Terre + eau	0,89 à 0,91	1788 à 2268	545 à 712	≈5,4 à 8,23

TABLE 5.3 – Propriétés thermiques *(suite)*

Références	Type de terre	Composition de l'échantillon	$\lambda[W/m.K]$	$\rho[kg/m^3]$	$c_p[J/kg.K]$	$b[\%/\%HR]$
Cagnon *et al.* (2014)	Terre extrudée	Argile : 23 à 30 % ; silt : 27 à 37 % ; sable : 33 à 42 % ; gravier :0 à 3 % ; D50 : 8 à 17 % ; eau jusqu'à limite de plasticité	0,40 à 0,69	1940 à 2070	910 à 1030	N/A (à revoir)
Allinson et Hall (2010)	Pisé	$2/3$ ironstone waste ; $1/3$ de sable ; 7% de ciment ;	0,64	1900	868	4,39
CSTB *et al.* (2011)	Pisé	Synthèse de plusieurs Pisé	0,46 à 0,81	1700 à 2200	N/A	N/A

Annexe B : Évaluation du confort thermique suivant l'approche adaptative et PMV

Description

L'évaluation du confort thermique est réalisé grâce aux modèles adaptatif et analytique PMV-PPD. Le modèle thermique utilisé est celui de l'habitat type dont le processus de calibration est présenté au chapitre 3.

Caractéristiques des occupants

Le métabolisme et le niveau d'isolation du vêtement des occupants sont des facteurs fondamentaux et importants dans l'évaluation de la prédiction du confort. Dans l'approche analytique PMV, ils constituent les deux facteurs liée à l'occupant. Le métabolisme est associé à la régulation physiologique du corps. Il est fonction de la variation de température, de l'activité, de la différence de sexe, etc. Orava *et al.* (2011); Luo *et al.* (2016b). L'isolation du vêtement est associé à l'ajustement comportemental. Il est essentiellement fonction de l'habillement et la vitesse de l'air HAVENITH *et al.* (1990); Havenith *et al.* (2002). Le domaine de validité simultané des deux modèles imposent un métabolisme compris entre 1.0 et 1.3 Met et un niveau d'isolation du vêtement compris entre 0.5 et 1.0 clo ASHRAE (2013). Dans cet évaluation du confort thermique, le taux métabolique est fixé à .0 Met (58 W/m^2) et le niveau d'isolement du vêtement à $I_{cl} = 0.7$. L'habitat est supposé occupé par deux adultes en permanence (un dans le séjour et un dans la chambre).

Renouvellement de l'air

La calibration à permit de déterminer un taux de renouvellement d'air de 0.2 Vol/h. Le manque de travaux sur la ventilation dans les bâtiments en Afrique et particulièrement au Burkina Faso à conduit à adopter une hypo-

thèse sur le taux de ventilation en phase d'exploitation. il est supposé égale à 4 Vol/h pour tenir compte de l'ouverture des fenêtres et portes.

Climat extérieur

Les données TMY2 de la ville de Ouagadougou sont utilisées pour modéliser le climat extérieur.

Calcul du confort

Modèle adaptatif

Les températures opérative (T_{op}) et extérieure (T_{out}) sont calculées suivant l'équation 5.6 et 5.7 (ASHRAE, 2013) :

$$T_{op} = \frac{T_{air} + T_{surf}}{2} \tag{5.6}$$

$$T_{out} = (1 - 0.7) * (T_{j-1} + 0.7T_{j-2} + 0.7^2T_{j-3} + ... + 0.7^7T_{j-7}) \tag{5.7}$$

Les deux régréssions, équation 5.8 et 5.9, définissent la zone de confort.

$$T_{op,upp} = 0.31T_{out} + 21.3 \tag{5.8}$$

$$T_{op,low} = 0.31T_{out} + 14.3 \tag{5.9}$$

Modèle PMV-PPD

L'indice PMV est calculé suivant l'équation 5.10 (ISO 7730, 2006).

$$PMV = 0.303 \cdot exp(-0.036 \cdot M) + 0.028 \cdot L \tag{5.10}$$

$$\begin{aligned}(M-W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M-W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M-W) - 58.15] \\ - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 \\ - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\end{aligned} \tag{5.11}$$

$$\begin{aligned}t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot [3.96 \cdot 10^{-8} \cdot fcl \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - \\ (t_r 273)^4] \cdot f_{cl} h_c \cdot (t_{cl} - t_a)]\end{aligned} \tag{5.12}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.88 \cdot \mid (t_{cl} - (t_a \mid^0 .25 & pour \quad 2.38 \cdot \mid (t_{cl} - (t_a \mid^0 .25 > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & pour \quad 2.38 \cdot \mid (t_{cl} - (t_a \mid^0 .25 < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \tag{5.13}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 l_{cl} & pour \quad l_{cl} \leq 0.078 m^2 \cdot K/W \\ 1.05 + 0.645 l_{cl} & pour \quad l_{cl} > 0.078 m^2 \cdot K/W \end{cases} \tag{5.14}$$

Avec, M le métabolisme énergétique (W/m^2), W la puissance mécanique utile (W/m^2),I_{cl} l'isolement thermique du vêtement $(m^2 \cdot K/W)]$, f_{cl} le facteur de surface du vêtement, t_a la température de l'air $(°C)$, t_r la température moyenne de rayonnement (C), v_{ar} la vitesse relative de l'air (m/s), p_a la pression partielle de vapeur d'eau (Pa), h_c le coefficient d'échange de chaleur par convection $(W/(m2?K))$, t_{cl} la température de la surface externe du vêtement (C).

Annexe C : Réduction du risque de surchauffe dans les maisons à ventilation naturelle grâce à la conception de murs en BTC

Reducing overheating risk in naturally ventilated houses through the design of compressed earth blocks walls in hot dry climate

Césaire Hema[a,b,*], Adamah Messan[b], Abdou Lawane[b], Geoffrey van Moeseke[a]

[a] *Architecture et Climat, Université catholique de Louvain (UCLouvain), Place du Levant 1, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium*

[b] *Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD), Institut 2iE, 01 BP 594 Ouagadougou, Burkina Faso*

Abstract

Appropriate thermal properties of external walls can lead to the improvement of buildings indoor environment and to reduce the risk of overheating in hot dry climates, especially in countries with low energy availability such as Burkina Faso. Nevertheless, to benefit from these advantages, thermal properties must be properly characterised, particularly with regard to walls made of compressed earth blocks (CEB) because of the variability of its properties. This paper reports on a study investigating the impact of the design of CEB walls on the indoor risk of overheating in a naturally ventilated house using thermal modelling based on real building monitoring data collected in Ouagadougou, Burkina Faso. The aim is to investigate the appropriate thermal properties of the CEB walls which include the thickness of the layer, the thermal diffusivity as well as the sequence of the layers to enhance opportunities for thermal comfort. Moreover, the sensitivity of these thermal properties to occupancy profiles and ventilation strategies is examined. The results indicate the arrangements of the thermal properties that can promote comfortable internal environments. Thermal diffusivity of $a = 1.20 \cdot 10^{-7}$ m²·s⁻¹ and wall thickness of $d = 14$ cm are one of the suitable thermal properties of single layer wall when considering the living room while $a = 4.61 \cdot 10^{-7}$ m²·s⁻¹ and $d = 14$ cm are appropriate thermal parameters of the CEB layer placed inside in double layer wall. Current thermal properties of the CEB are relevant to certain applications and can be further optimized to improve the thermal comfort. The findings indicate that occupation patterns at room scale should be systematically considered when dealing with wall design in order to improve thermal comfort since the CEB layer inside is only recommended for the room mainly occupied during the day.

Keywords: compressed earth block, cyclic thickness, dry hot climate, thermal comfort, wall design, weighted exceedance hour.

* Corresponding author.
Email: cesaire.hema@2ie-edu.org, cesaire.hema@gmail.com (Césaire Hema).

Nomenclature

a	thermal diffusivity	[$m^2 \cdot s^{-1}$]	δ	periodic penetration depth of the heat wave in the material	[m]
c	specific heat capacity	[$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	ε	emissivity of exterior surface	[-]
d	layer thickness	[m]	λ	thermal conductivity	[$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
EH	exceedance hours	[h]	ξ	cyclic thickness	[-]
P	periodic time	[s]	ρ	density	[$kg \cdot m^{-3}$]
T	temperature	[°C]	*Subscripts*		
t	current time	[s]	air	related to air	
WEH	weighted exceedance hour	[°C·h]	ext	related to exterior surface of wall	
w_f	weighted factor	[-]	int	related to interior surface of wall	
x	space coordinate	[m]	low	related to the lower limit of acceptability	
Z_{ij}	element of the heat transfer matrix	[-]	upp	related to the upper limit of acceptability	
Greek letters			op	related to operative temperature	
α	absorptivity of exterior surface	[-]	out	related to mean outdoor temperature	

1. Introduction

The selection of building materials has an impact on greenhouse gases emissions through the operating and embodied energy of the building. Indeed, one third of global greenhouse gases emissions is currently attributed to the building sector [1, 2]. Local building materials can have inherent benefits in terms of energy saving during manufacture and transportation processes, which account for 29 % to 40 % of the total embodied energy of the material at global scale [3, 4]. This explains why

earth-based materials, such as compressed earth blocks (CEB), have been gaining popularity in recent years around the world.

CEB are an interesting construction technique allowing to use earth-based materials as easily as other industrial products such as cement blocks, while only requiring a limited workforce. This technique allows off-site production, delocalized from the deposit of the raw material, and is also easy to combine with other building techniques [5]. Compared to other building products such as hollow concrete blocks or stone, CEB have been shown to require less energy throughout their life cycle [6]. For these reasons, in contexts such as Burkina Faso, CEB are promoted by the local policies as alternative to cementitious materials [7, 8] and improvement of its properties remain a topic of central interest [9-11]. In addition, when considering the bioclimatic design approach in hot dry regions, exterior walls must be designed to take advantage of the large temperature difference between day and night. This is explains why heavy materials and thick exterior walls are used in traditional architecture to mitigate temperature fluctuations to a level close to the average temperature of the exterior surface. Indeed, based on the graphical comfort method of ASHRAE 55 [12], the high thermal mass can lead to a 21.8 % improvement of the comfort time of buildings when considering the climate of Ouagadougou (See Appendix A). It is proved that significant high thermal capacity, such as that offered by the CEB walls, provides opportunity to improve the indoor climate of buildings [13-15].

Yet, although CEB as a building material might bring many benefits in hot dry climates, they also have some limitations. In fact, the high thermal capacity of CEB, which is able to delay the transmission of heat from the outside to the inside, could also increase thermal discomfort under certain conditions. According to a survey conducted by Taylor et al. [16], in fact, rammed-earth building do not necessarily provide a better indoor climate compared to conventional building materials. Their results showed that during summer, two out of the three offices monitored had operative temperatures outside the comfort zone for over 20 % of the time. Furthermore, a pilot study by the authors on two buildings, one made of CEB and the other made of hollow concrete blocks, was carried out in the campus of "Institut 2iE" in Ouagadougou, Burkina Faso to compare their thermal performances. Although the testing was limited to two consecutive days in September 17, the results did not reveal substantial changes in indoor air temperature as shown in Fig.1 (More details on this survey are given in appendix B).

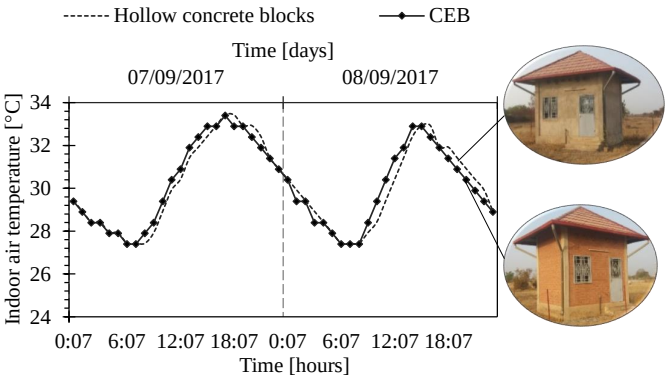


Fig.1. Variation of indoor air temperatures in two experimental buildings on the campus of Institut 2iE.

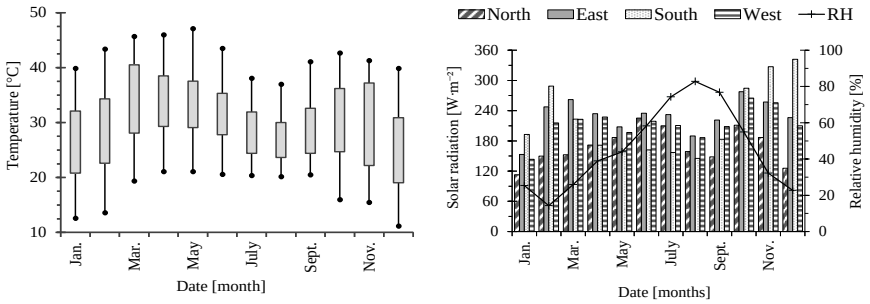
These results lead to question the suitable values of the thermal properties of the CEB wall – i.e., the thermal conductivity, the density, the specific heat and the thickness of the wall – that could enhance the opportunities to improve indoor temperatures in hot dry climates. With this respect, Dong et al. [17] performed simulations on several thicknesses of walls made of rammed earth to investigate their influence on indoor thermal comfort. The study showed that increasing the wall thickness from 200mm to 400mm led to a 5.8 % rise in indoor temperatures falling within the adaptive comfort zone. Other authors [9, 18] have worked on modifying the thermal conductivity of CEB and therefore adjusting the thermal performance of buildings. However, to deal with the combination of parameters that can be conducive to thermal comfort conditions, different thermal properties must be considered at once, especially since the value of the density directly affects the thermal conductivity [19]. Walls made of several layers, each characterized by different thermal properties, can provide a more versatile solution than single layer walls. In this context, some studies argue that earth-based walls should be provided with an external insulating layer in order to reduce energy consumption [20, 21]. Nevertheless, the effect of the relative location of the thermal mass and the insulating layer in naturally ventilated buildings is still a topic of research, especially when the behaviour of building occupants is also considered.

On these bases, this study aimed to investigate the thermal design characteristics of CEB walls and the sensitivity of the design to building occupancy profiles and to air change strategies in order to foster thermal comfort in naturally ventilated buildings.

For this purpose, the impacts of changes of the thermal conductivity, the heat capacity and the wall thickness on the indoor environment are investigated through thermal modelling based on real building monitoring data collected in Burkina Faso. Improvement of thermal comfort, in fact, requires consideration of the whole building design including the optical properties (i.e. absorptivity, emissivity of exterior surface) of the building components [22]. The specific focus of this study is centred on the analysis of the intrinsic thermal properties of the CEB blocks, and the combination of insulation and capacitive layers, to define the impact of different solutions on the indoor climate.

2. Climatic information

Burkina Faso is divided into three different climatic regions: the northern desert; the central sudano-sahelian region; and, the southern savannah. Monthly average temperatures range between 22.6 °C and 35.5 °C. The weather data used in this study, except for the calibration, are based on a typical meteorological year (TMY2) for the city of Ouagadougou, in sudano-sahelian region. The monthly average temperatures of Ouagadougou vary between 25 °C and 34 C, while the average relative humidity range between 14 % and 58 % except during the rainy season when it can reach 80 %. The incident solar radiation lays between 113W·m^{-2} and 342W·m^{-2} depending on the orientation of the wall. Fig. 2(a) and (b) show the evolution of the dry bulb temperature, the incident solar radiation and the external average relative humidity based on the TMY2 of Ouagadougou.



(a) (b)

Fig. 2. Weather data of Ouagadougou : (a) air temperature, (b) incident solar radiation and average relative humidity

3. Methodology

To deal with the thermal design of the CEB wall, it was important to fit and calibrate an accurate thermal model whose characteristics are presented in section 3.1. The model was used to investigate the impact on the indoor climate of the external wall's thermal properties variations, whose ranges of values are presented in section 3.2. A method to assess the indoor climate based on risk of overheating mitigation is defined in section 3.3. Finally, the adopted occupancy profiles and the modes of ventilation influencing the thermal design of the CEB walls are presented in section 3.4.

3.1. Calibration of the thermal model

A numerical model was calibrated to assess the thermal response of the building to the CEB walls' thermal properties variations. The validation criteria of the numerical model and the collected thermal parameters, during real time monitoring of a case study building, are respectively described in section 3.1.1 and 3.1.2. The setting of the numerical model is presented in section 3.1.3.

3.1.1. Validation criteria

Based on ASHRAE 2002 [23] and 2009 [24] , this study used the following statistical indices to represent the quality of the simulations results: the normal mean bias error (NMBE); the coefficient of variation of the root mean squared error (CVRMSE); and, the correlation coefficient R^2. These indices were calculated using equations (1), (2) and (3), respectively.

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

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

$$R^2 = \frac{\sum_1^n x_m^i x_s^i - n\bar{x}_m\bar{x}_s}{\sqrt{(\sum_1^n ((x_m^i)^2 - n\bar{x}_m)(\sum_1^n ((x_s^i)^2 - n\bar{x}_s)}} \quad (3)$$

With x_m: measured value; x_s: simulated value; $\bar{x}_m$: average measured value; $\bar{x}_s$: average simulated value.

The NMBE was used to evaluate the average difference between predictions and measurements, while the CVRMSE showed the ability of the model to represent reality. R^2 summarizes the relationship between the measured and the simulated variables. Reference values of each statistical index for validating the thermal model are summarized in Table 1.

Table 1. Crieteria used for validation

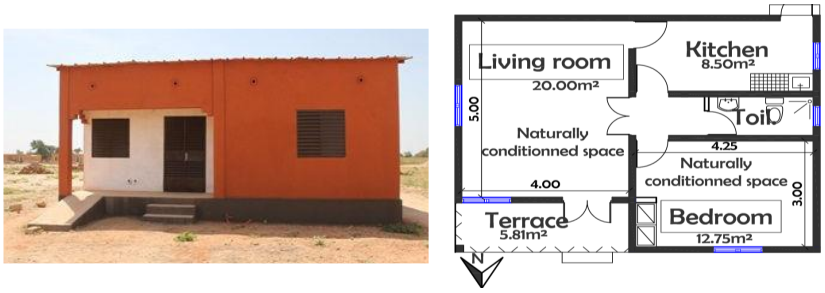
	Required values for validation	Standard
NMBE [1]	< 0.10	ASHRAE 2002
CVRMSE	< 0.30	
R^2	≥ 0.90	ASHRAE 2009

[1]: absolute value

3.1.2. Case study building

The study was conducted on a conventional one-story residential bungalow in Ouagadougou (12°21'N, 1°32'W), a commonly found building type in the urban areas of Burkina Faso as shown in Fig. 3. This represents the primary mode of access to modest housing for urban populations and is promoted by local policy. From the outside to the inside, the walls of the building are made of 2 cm of cement coating, 15 cm of hollow concrete blocks and 2 cm of cement coating. The roof and floor consist of 0.15 cm of metal sheet and 10 cm of concrete, respectively. The openings of the building consist of metal louvered doors and windows. The main façade of the building is North-oriented.

The experimental measurements of the building – including air temperatures, surface temperatures of walls and relative humidity – were performed from March 20, 2014 to June 10, 2014 by Kabore as a part of his thesis [25]. In the current study, the focus was placed on air temperature and relative humidity with the objective to define a model capable of assessing the thermal environment of the rooms.



(a) (b)

Fig. 3. Experimental building: (a) main façade, (b) floor plan

The building was monitored using temperature and humidity sensors type TH from "Waranet Solutions" with accuracies of 0.12°C and 2 % to 3 % RH, respectively. The air temperature was recorded each hour in the living room and in the bedroom, while the hourly relative humidity was only recorded in the living room because of limited number of sensors. The monitored building was part of a project to build more than 1,000 homes by a local real estate developer. At the time of monitoring, the building was at the end of the construction phase. Therefore, it was not occupied during the data collection and there was no internal heat source. The building was not naturally ventilated (doors and windows were kept closed) during the measurement periods. External measurements were also taken during the monitoring period, including: air temperature; relative humidity; wind speed and direction; global, direct and diffuse radiation.

The initial conditions of the modeled building components were temperature of 25 ° C and relative humidity of 35%. However, in order to avoid the influence of these initial conditions on the predicted results, the period from March 20 to 31 was not included in the calibration. It is believed that this 12-day period was sufficient for the thermal model to converge with the actual measurement parameters. Thus, the calibration used monitoring data from April 01, 2014 to June 10, 2014.

3.1.3. Setting of the model

The WUFI® Plus v2.5.1.0 modelling and simulation tool was used in this study. The WUFI software was developed at the Fraunhofer-Institut for Building Physics, Germany, to model the heat and moisture transfer and storage in building

components. In addition to modelling hygrothermal conditions, WUFI® Plus simulates the indoor thermal environment and is therefore suitable for addressing issues of thermal comfort and energy consumption in buildings. The mathematical modelling is based on the heat and moisture balance equations described in Künzel [26].

Building materials commonly used in the local context were used in the model, with the thermal properties provided in Table 2 [25]. Two parameters, based on iterations of the model, were assumed: the infiltration rate, due to the lack of experimental data on air infiltration and ventilation of building in Burkina Faso; and, the solar absorptivity of the roof, due to the impact of dust of the exterior surface. Values of $0.2 Vol \cdot h^{-1}$ and 0.39 were considered respectively.

Table 2. Thermal properties of building materials adopted for the modelling

System	Material	d [cm]	λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	α; ε [-]	U-value [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
Walls	Exterior cement coating	2.00	1.10	1700	1000	0.40; 0.95	2.54
	Hollow concrete blocks	15.00	0.80	1000	1000	-	
	Interior cement coating	2.00	1.10	1700	1000	-	
Roof	Paint metal sheet (colour between red and orange)	0.15	50	7800	450	0.39; 0.95	7.14
Doors, windows	Modelled as single glazing completely shaded	-	-	-	-	0,85 [1]	5.00 [2]

[1]: value for emissivity; [2]: thermal transmittance of the overall opening

3.2. Thermal design of external walls

The external wall of the building is subjected, on its outer surface, to temperature fluctuations and a heat flow due to changes in outside air temperature and solar radiation. Its inner surface can be considered under adiabatic conditions due to the

small temperature gap between the wall surface and the internal ambient air. Assuming that the external surface of the wall is under a sinusoidal variation of temperature, T_{ext}, and density of heat flow q_{ext}, and that the interior surface is under adiabatic conditions ,i.e. the heat flow, $q_{int} = 0$, then the matrix of the heat transfer for a single layer wall without surface resistance can be expressed by the following equations (4) to (9) [27]:

$$\begin{pmatrix} T_{ext} \\ q_{ext} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11}\, Z_{12} \\ Z_{21}\, Z_{22} \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} T_{int} \\ q_{int} \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi)\cos(\xi) + j\sinh(\xi)\sin(\xi) \tag{5}$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda}\{\sinh(\xi)\cos(\xi) + \cosh(\xi)\sin(\xi) + j[\cosh(\xi)\sin(\xi) - \sinh(\xi)\cos(\xi)]\} \tag{6}$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta}\{\sinh(\xi)\cos(\xi) - \cosh(\xi)\sin(\xi) + j[\sinh(\xi)\cos(\xi) + \cosh(\xi)\sin(\xi)]\} \tag{7}$$

$$\xi = \left[\frac{\pi\rho c}{P\lambda}\right]^{1/2} \cdot d \tag{8}$$

$$\delta = \left[\frac{\lambda P}{\pi\rho c}\right]^{1/2} \tag{9}$$

The heat transfer matrix can be seen as a function of only two parameters: the cyclic thickness ξ and the ratio $\delta/2\lambda$. The ratio $\delta/2\lambda$ includes the thermal properties of the material as $\lambda{\cdot}\rho{\cdot}c$ and is independent of the wall thickness. The cyclic thickness ξ, including material properties as $(\rho{\cdot}c){\cdot}\lambda^{-1}$, provides a direct and easily interpreted measure of how the heat transfer matrix and the heat storage capacity are affected by the wall thickness. It can therefore be used to carry out the entire thermal design of the external wall. A low value of the cyclic thickness ξ represents a "thin" wall in a sense that an excitation on the external surface has great effect on the internal surface [28].

The study aims to determine the most suitable thermal design (i.e. cyclic thickness ξ) of the CEB layer for the external walls providing the largest opportunities for indoor thermal comfort. Thus, equation (8) can allow to define either: the thickness of the wall, assuming that the thermal diffusivity of the constituent material is

constant as expressed in equation (10); or, the thermal diffusivity, assuming that the thickness of the wall is constant as expressed in equation (11).

$$d = \left[\frac{\xi a T}{\pi}\right]^{1/2} \tag{10}$$

$$a = \frac{d^2 \pi}{\xi^2 T} \tag{11}$$

As shown in equation (8), ξ can be regarded as a single function of the mass index $(\rho \cdot c)^{1/2}$, considering that the thermal conductivity (λ) and the wall thickness (d) are fixed: it will be labelled $\xi(\rho c)$. Likewise, $\xi(\lambda)$ and $\xi(d)$ represent the cyclic thickness of the wall as a single function of the thermal conductivity index $(\lambda^{-1})^{1/2}$ and the wall thickness (d), respectively. The impact of the variations of $(\rho \cdot c)^{1/2}$, $(\lambda^{-1})^{1/2}$ and d on thermal comfort are studied through the cyclic thickness. It is postulated that, depending on the thermal properties used to adjust the cyclic thickness of the wall, the indoor thermal response may be different.

On the basis of the thermal model of the case study building whose walls are made of hollow concrete blocks, the influence of having external walls in CEB is studied through the change of the thermal properties. Two types of walls are investigated: single and double layer walls. The cyclic thickness of the single layer wall made of CEB range from ξ = 0.42 to ξ = 6.44, while that of the double layer wall, made of CEB (thermal mass) and a resistive layer (thermal insulation), range from ξ = 0.42 to ξ = 4.94. Two cases were studied depending on whether the thermal mass layer was placed outside and the thermal insulation layer placed inside or vice versa. The configuration with CEB layer outside and resistive layer inside is noted as "CEB_{out}". The configuration with resistive layer outside and CEB layer inside is noted as "CEB_{in}". The thermal properties of the thermal insulation material are based on that of expanded polystyrene: λ = 0.04 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, ρ = 20 $kg \cdot m^{-3}$, c = 1500 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Table 3 shows the three modes of adjustment of the cyclic thickness for the single and double layer walls.

Table 3. Mode of ajustement of the cyclic thickness of CEB layer in walls

Type of wall	Symbol	$(\rho \cdot c)^{1/2}$ [$(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})^{1/2}$]	$(\lambda^{-1})^{1/2}$ [$(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})^{1/2}$]	d [m]	Cyclic thickness ξ
Single layer wall made of CEB	$\xi(\rho c)$	From 240 to 3685	1 [1]	0.29	From 0.42 to 6.44
	$\xi(\lambda)$	1387.95 [2]	From 0.17 to 2.65	0.29	
	$\xi(d)$	1387.95 [2]	1 [1]	From 0.05 to 0.77	
Double layer wall made of CEB and insulating layer	$\xi(d)$	1387.95 [2]	1 [1]	From 0.05 to 0.59	From 0.42 to 4.94

[1]: corresponds to λ = 1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; [2]: corresponds to ρ = 1921.60 $kg \cdot m^{-3}$ and c = 1002.50 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Since the internal walls have less impact on the building thermal behaviour than the external walls [29], their thermal properties are not studied and are fixed at d = 0.14 m, λ = 1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, ρ = 921.60 $kg \cdot m^{-3}$ and c = 1002.50 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. These thermal properties of CEB were based on research results specific to local earth-based materials [9, 30] and other values found in other literature [5, 19, 31].

3.3. Assessment of indoor thermal environment

The assessment of thermal comfort in the building's indoor environment, as reported in current standards (for example, EN15251[32] and ASHRAE 55 [12]), relies on two main approaches: Fanger's Predicted Mean Vote [33] and the adaptive thermal comfort theory [34, 35]. Although there is a vast literature on these thermal comfort models, these approaches are briefly summarised here to clarify how various metrics and equations have been used for the development of the thermal model used in this study. Fanger's PMV model, developed in climatic chamber, is meant to predict the thermal comfort vote of a large group of individuals in buildings that are mechanically heated or cooled. However, field studies in buildings without air-conditioning in warm climates have shown that the PMV index might predict a warmer thermal sensation than the actual feeling reported by occupants [36]. For

these reasons, the adaptive model of comfort has been proposed for non-air-conditioned and naturally ventilated buildings [37, 38]. In the PMV model, the driving forces of the thermal comfort are the metabolic rate, clothing, air temperature, radiant temperature of surrounding walls, relative humidity and air velocity. Conversely, the adaptive model postulates that occupants can adapt to their thermal environment through physiological, psychological and behavioural processes. This allows not to consider in the adaptive model some driving forces of the PMV model such as the metabolic rate and clothing, but only to express the thermal comfort as a function of the mean outdoor temperatures, T_{out}, and the operative temperature, T_{op}, expressed in equation (12) and (13), respectively (where $T_{e(d-1)}$ is the main daily outdoor temperature for the previous day and $T_{e(d-2)}$: the main daily outdoor temperature for the day before, and so on).

It is considered that 80% of the building occupants will consider the indoor climate environment to be acceptable if the operative temperature, T_{op}, is within the range of an upper limit, $T_{op,upp}$ and lower limit, $T_{op,low}$ as defined by equations (14) and (15) [12].

$$T_{out} = (1-0.7)\left[T_{e(d-1)} + 0.7 \cdot T_{e(d-2)} + 0.7^2 \cdot T_{e(d-3)} + \ldots + 0.7^6 \cdot T_{e(d-7)}\right] \quad (12)$$

$$T_{op} = 0.5 \cdot T_{air} + 0.5 \cdot T_{int} \quad (13)$$

$$T_{op,upp} = 0.31\, T_{out} + 21.3 \quad (14)$$

$$T_{op,low} = 0.31\, T_{out} + 14.3 \quad (15)$$

The adaptive thermal model of ASHRAE 55, although most appropriate for dealing with the evaluation of the indoor comfort in the current case study, may not be sufficient when it comes to discern the impact of the design of walls on the indoor climate. In fact, given the hot, dry climate, it is more interesting to deal with the minimisation of the time and intensity outside the acceptable indoor temperature range. Therefore a method based on reducing the risk of overheating has been adopted.

Two types of information are considered [39]: (i) time information based on the number of hours during which the simulated operative temperature, T_{op}, is over the upper limit of the adaptive thermal comfort, $T_{op,upp}$. That is the exceedance hours of the overheating, $EH_{>upp}$ and is calculated using equation (16). (ii) Severity information based on a weighted factor, *wf*, defined by the required drop of operative

temperature to achieve thermal comfort and calculated using equation (17). Thus, the index adopted to evaluate the indoor thermal environment is defined as the weighted time during which the actual operative temperature is beyond the upper limit of acceptability for an entire year. This index, namely weighted exceedance hours (WEH) in the ASHRAE 55 Standard or degree-hour criterion, is calculated using equation (18). The lower the value of WEH, the better the indoor climate.

$$EH_{>upp} = 1\ if\ T_{op} > T_{op,upp}\ \ and\ 0\ otherwise \tag{16}$$

$$wf = T_{op} - T_{op,upp} \tag{17}$$

$$WEH = \Sigma(EH_{>upp} \cdot wf) \tag{18}$$

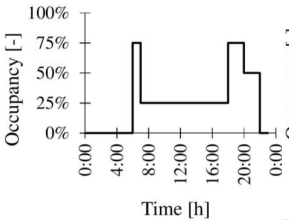
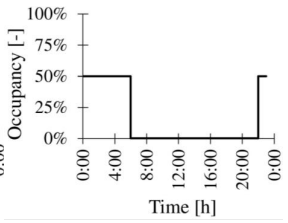
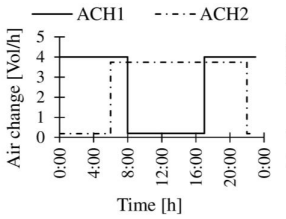
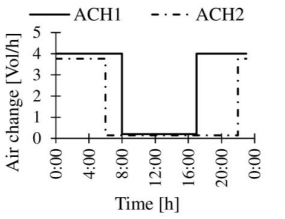
The design compliance of the current computational investigation meets all the required conditions of ASHRAE 55 standard except for the prevailing mean outdoor temperature, T_{out}, that should be less than 33.5°C, while T_{out} in Ouagadougou can reach 35.5°C. Nevertheless, given the lack of more reliable validated models for this temperature range, we refer to the adaptive model of the ASHRAE 55 standard.

3.4. Sensitivity of the design to occupant behaviour

Two factors due to occupant behaviour are expected to influence the suitable cyclic thickness that can provide conditions conducive to a comfortable indoor climate: the profile of occupancy; and, the mode of indoor air change. Therefore, two occupancy profiles were defined based on occupancy of the living room (day occupancy profile) and the bedroom (night occupancy profile). The WEH was assessed as a function of these profiles: the periods during which a room is unoccupied were not considered in the assessment of the risks of thermal discomfort.

Two strategies of air change, noted as “ACH1” and “ACH2” were also considered. In “ACH1”, it was assumed that the windows were closed during daytime to avoid the ingress of external hot air and completely open during the night to take advantage of external cool air. In “ACH2”, it was assumed that the occupants of the building opened windows when rooms are occupied and keep them closed when rooms are not occupied, without considering external temperature. In both strategies, a minimum air change per hour of 0.2Vol·h^{-1} was maintained to ensure air quality. Table 4 summarizes the occupancy profiles and strategies of ventilation.

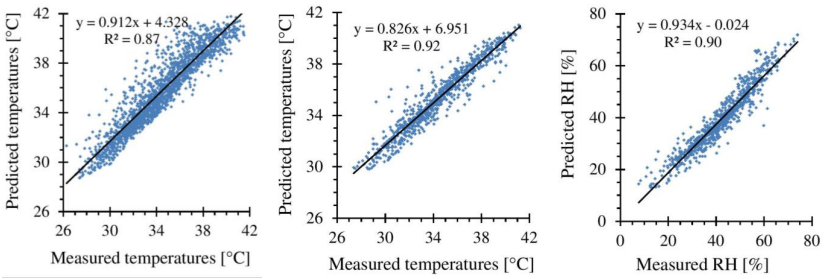
Table 4. Occupancy profiles and strategies of air renewal

Parameters	Day occupancy profile	Night occupancy profile
Schedules of occupancy ‣Occupancy rate: 100%=4 persons ‣Metabolic rate: 1 met/person ‣Clothing: 0.7 clo		
Air renewal of the interior space		

4. Results

4.1. Validation of the thermal model

Fig. 4 shows the correlation between the measured and predicted parameters of the building, while Table 5 shows the values of the statistical indices NMBE, CVRMSE and R^2. With the exception of R^2 for the living room, values of statistical indices fulfil the validation criteria. When measured data are submitted to closer scrutiny, inconsistencies are observed and can explain the low value of R^2 of the living room: the thermal amplitude between two successive hourly measurements can be greater than 10°C for the outdoor air and 4.75°C for the indoor air of the living room. Such amplitudes are too large to be realistic and we suspect the temperature sensors to be subject to direct radiations at some times. If suspicious values are modified to better fit the actual local climate tendencies, the thermal model fulfils the validation criteria. Furthermore the other indices satisfy the validation criteria and the value of $R^2 = 0.87$ is close to the 0.90 threshold. The authors consider this thermal model as relevant for the sensitivity studies conducted in this research.



(a) (b) (c)

Fig. 4. Comparison between hourly mesured and predicted parameters : (a) air temperature of the living room, (b) air temperature of the bedroom, (c) relative humidity of the living room

Table 5. Statistical indices from the calibration of the building

	NMBE	CVRMSE	R^2
Temperature of the living room	0.036	0.048	0.87
Temperature of the bedroom	0.025	0.035	0.92
Relative humidity of the living room	- 0.080	0.124	0.90

4.2. Impact of wall design on indoor climate

4.2.1. Empty building

The settings of the thermal model in this section was based on the experimental building one, i.e. no occupancy and an air infiltration of 0.2 $Vol \cdot h^{-1}$, with the exception of the thermal properties of the walls that have been changed according to the investigated range of values. Fig. 5 shows the evolution of the WEH as a function of the cyclic thickness in the bedroom, considering the two scenarios whereas the building is considered to be made of either a single or a double layer wall. The results obtained for the living room were similar and, for the purpose of synthesis, they are not presented here. For each cyclic thickness presented on the bottom horizontal axis, the corresponding thermal property is presented on the top axis.

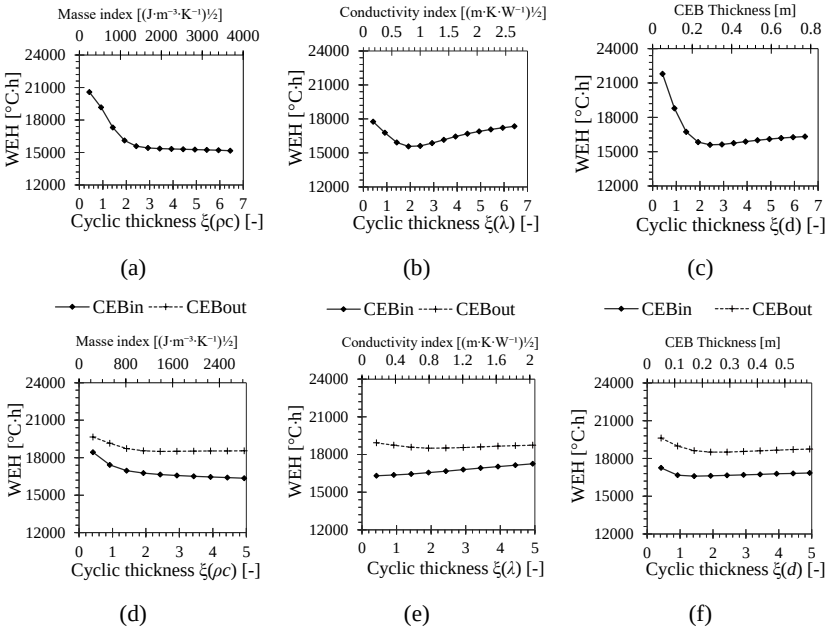


Fig. 5. WEH of the bedroom as a function of (a) the mass index in single layer wall, (b) the thermal conductivity index in single layer wall, (c) the CEB thickness in single layer wall, (d) the mass index in double layer wall, (e) the thermal conductivity index in double layer wall and (f) the CEB thickness in double layer wall.

For the single layer wall, illustrated in Fig. 5 (a), (b) and (c), it was found that the shapes of the curves were similar: the WEH decreases rapidly with the increase of the cyclic thickness before reaching a quasi-steady state. Regarding the adjustment of the cyclic thickness using the thermal conductivity (i.e. index $(\lambda^{-1})^{1/2}$) and the wall thickness d, in Fig. 5 (b) and (c), it can be noticed that the lowest level of WEH is reached for $\xi(\lambda) = 2.43$ and $\xi(d) = 2.93$ respectively. Beyond these values, the WEH increases slightly. Regarding the adjustment of the cyclic thickness using the thermal mass (i.e., index $(\rho \cdot c)^{1/2}$), in Fig. 5 (a), the WEH decreases without reaching a minimal value. Nevertheless, a single value of $\xi = 2.43$ can be considered, which gives a minimal value of WEH in all cases regardless of the indices, since the decrease in WEH is less than 3% beyond this value. The corresponding mass index,

thermal conductivity index and wall thickness for ξ = 2.43 are 1388 $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})^{1/2}$, 1.00 $(m \cdot K \cdot W^{-1})^{-1/2}$ and 0.29 m respectively.

For the double layer wall, when considering the cyclic thickness as a function of the thermal mass and of the thickness of the CEB layer as presented in Fig. 5 (d) and (f), the shape of the curves are similar to those obtained for the single layer in Fig. 5 (a) and (c). It can be considered that, beyond the value of ξ = 1.92, the variation of WEH is negligible. The mass index and thickness of the CEB layer correspond to ξ = 1.92 are 1100 $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-3})^{1/2}$ and 0.23 m, respectively. When considering the cyclic thickness as a function of the thermal conductivity index in Fig. 5 (e), it was found that the WEH decreases with the increases of the cyclic thickness for the constructive system "CEB_{out}", while for "CEB_{in}" the WEH increases with the cyclic thickness. The cyclic thickness ξ (λ) should be as low as possible for "CEB_{in}" to minimise the risks of discomfort, while for "CEB_{out}" beyond the value of ξ = 1.42, the variation of WEH is negligible. Moreover, the "CEB_{in}" constructive system provides lower values of the WEH than "CEB_{out}", regardless of the thermal property used to adjust the thermal capacity.

Comparing the single layer wall to "CEB_{in}", there is an advantage in adding a resistive layer for low values of ξ, but the benefit achieved becomes marginal beyond ξ = 1.42. It is also observed that the single layer wall basically provides lower WEH than "CEB_{out}".

4.2.2. Influence of occupancy

Fig. 6 shows the evolution of the WEH as a function of the cyclic thickness ξ of the single layer building for the two occupancy profiles. Unlike the above results where the WEH was evaluated without taking into account the period of occupancy (i.e. considering that each room was empty), in this section the assessments of discomfort risks are evaluated according to the periods of occupancy. As far as the day occupancy profile is concerned, as presented in Fig. 6 (a), (b) and (c), the curves are similar to those described in Fig. 5 (a), (b) and (c) and the minimum value of WEH is reached for ξ = 2.43. For night occupancy, the WEH increases with the increase of ξ up to the maximum values from 1.42 to 1.92. Then, the WEH decreases to reach a quasi-steady state. Beyond the cyclic thickness of ξ = 3.93, the variation of the WEH is negligible.

For the room under day occupancy profile with a double layer wall, illustrated in Fig. 7 (a), (b) and (c), the WEH evolves in a similar way as the room under a day

occupancy profile with the single layer wall. "CEB_{in}" provides lower values of the WEH than "CEB_{out}". For the night occupancy profile with a double layer wall, illustrated in Fig. 7 (b), (d) and (f), the WEH evolves like for the night occupancy profile with single layer wall. Contrary to the room with the day occupancy profile, "CEB_{out}" provides lower values of the WEH than "CEB_{in}" in the room having the night occupancy profile.

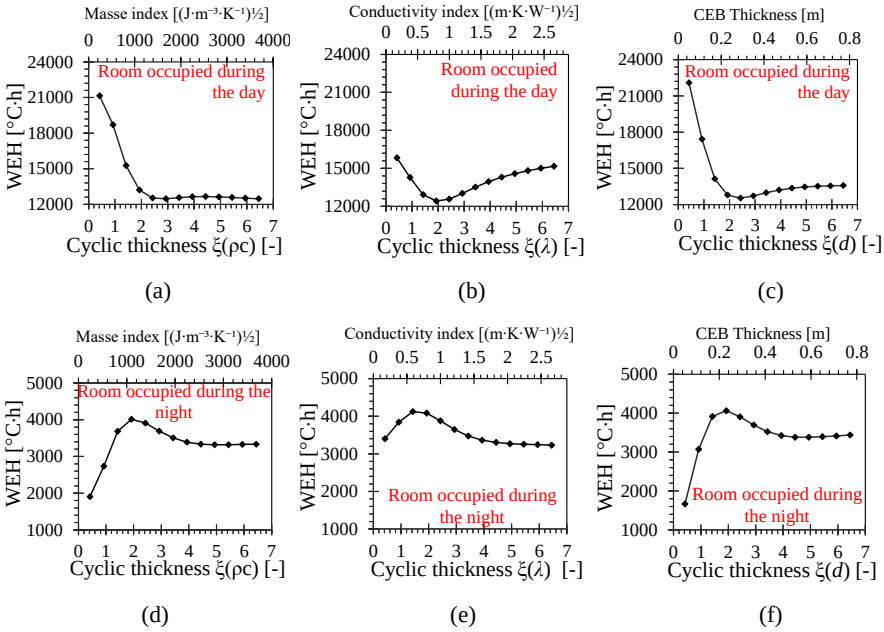


Fig. 6. Impact of occupancy profile of the single layer building as function of the: (a) mass index in day occupancy profile (b) thermal conductivity index in day occupancy profile, (c) wall thickness in day occupancy profile, (d) mass index in night occupancy profile, (e) thermal conductivity index in night occupancy profile and (f) wall thickness in night occupancy profile

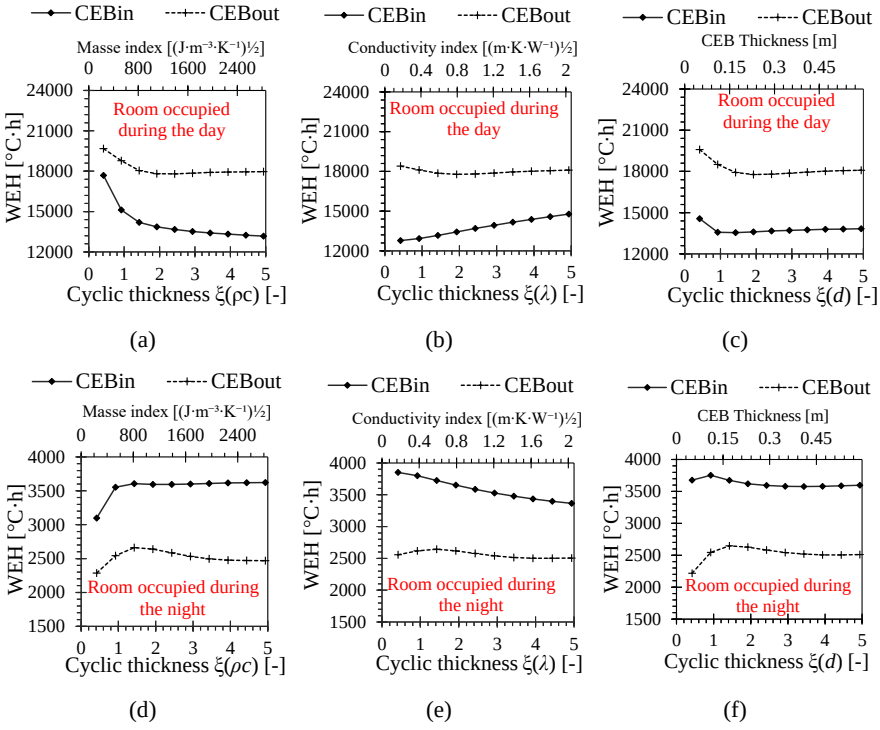


Fig. 7. Impact of occupancy profile of the double layer building as a function of the: (a) mass index in day occupancy profile, (b) thermal conductivity index in day occupancy profile, (c) wall thickness in day occupancy profile, (d) mass index in night occupancy profile, (e) thermal conductivity index in night occupancy profile and (f) wall thickness in night occupancy profile

4.2.3. Influence of air change strategies

Fig. 8 shows the evolution of the WEH for the different air change strategies depending on the cyclic thickness $\xi(d)$ of the single and double layer wall. For the double layer wall, specific attention was given to the construction systems offering the minimum risks of discomfort, i.e. "CEB_{in}" for the room having the day occupancy profile and "CEB_{out}" for the room under the night occupancy profile. The values of $\xi(d)$ minimizing the risk of overheating are not impacted by the air change strategies and it is believe that this statement remains applicable for $\xi(\rho c)$ and $\xi(\lambda)$.

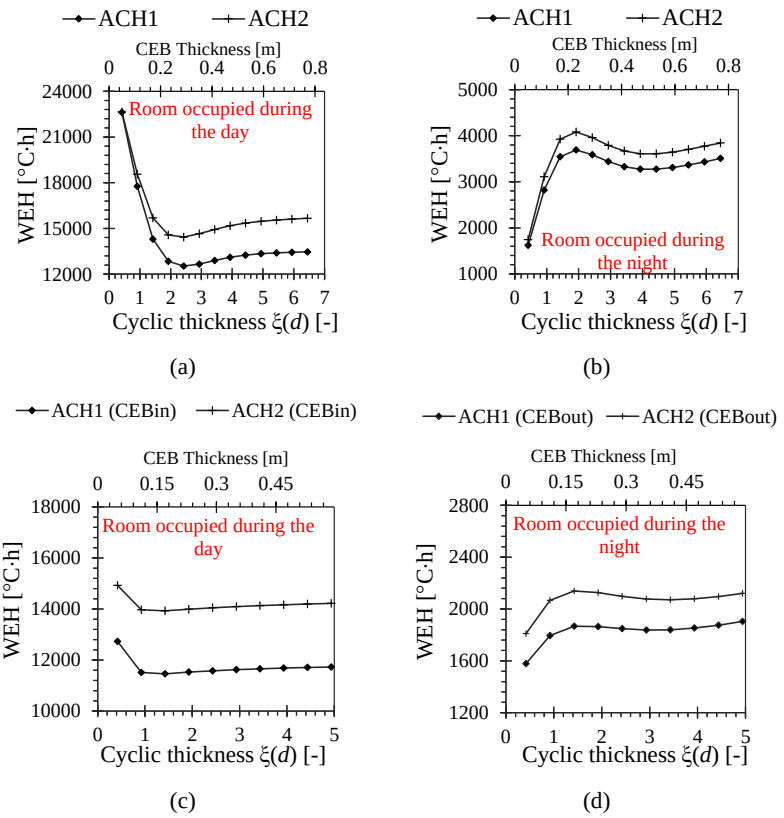
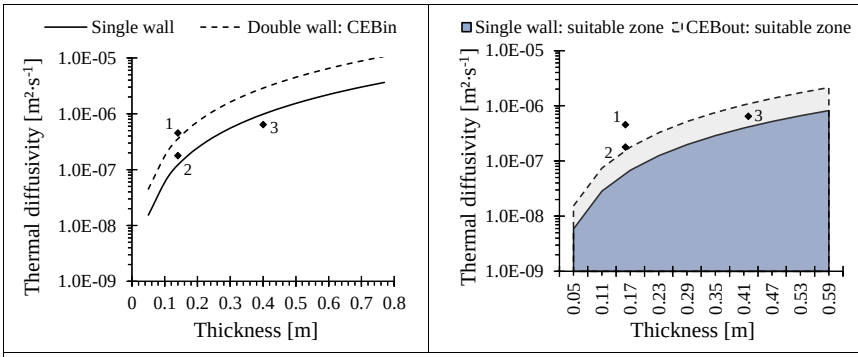


Fig. 8. Impact of air change strategies on the WEH: (a) day occupancy profile of the building made of single layer wall, (b) night occupancy profile of the building made of single layer wall, (c) day occupancy profile of the building made of double layer wall and (d) night occupancy profile of the building made of double layer wall

4.3. Thermal design of CEB walls

The thermal design of the CEB layer in walls consists in linking the thermal diffusivity of the material to the wall thickness based on the cyclic thickness. As previously highlighted, in single layer wall buildings, $\xi = 2.43$ and $\xi \geq 3.93$ are the most suitable values of the cyclic thicknesses to minimise risks of thermal discomfort for the room occupied during the day and night respectively. If a double

layer wall is used, $\xi = 1.42$ and "CEB_{in}" are the most suitable cyclic thicknesses and construction system in the room occupied during the day, while $\xi = 2.43$ and "CEB_{out}" should be preferred in the case of a room with night occupancy profile. Although, in the room with night occupancy profile, the lowest values of the cyclic thickness provides higher opportunities for comfort, this would imply having a very "thin" wall, which is hard to implement especially for exterior walls. Fig. 9 shows the thermal diffusivity that the earth-based material should have according to the thickness of the walls in order to minimize the risks of thermal discomfort during the occupancy period based on equation (10) and (11). The thermal properties of earth-based materials reported in the literature are also plotted along. The thermal diffusivity of the material and the thickness of the CEB layer must be adjusted to intercept or to be as close as possible to the curves of Fig. 9 (a) to provide higher opportunities for comfort in the living room. In the bedroom, the adjustment must be achieved in such a way that it intercepts the curves or falls into the colored zone as shown in Fig. 9 (b).



1: Geopolymer CEB [30], 2: CEB: mix of laterite and cellulose [9], 3: Rammed earth [17]

(a) (b)

Fig. 9. Suitable thermal properties of CEB-based walls for (a) room occupied during the day and (b) at night

5. Discussion

The heat storage capacity of the wall gradually increases with the thermal mass and the thickness of the CEB layer. Therefore, the incident heat flux from inside (e.g., presence of occupants, hot air infiltration) and from outside (e.g., solar radiation, air temperature) are gradually stored in the wall and are less and less able to influence the indoor thermal environment. Hence, opportunities for thermal comfort increase together with the thickness of the wall (ξ (d)) and the thermal mass (ξ (ρc)) for the building (Fig. 5 (a), (b) and (c)).These findings are consistent with the bioclimatic approach of the design of single wall in hot dry regions: high thermal capacity of walls can provide enriched opportunities for comfortable indoor environments [13, 14]. With regard to the double layer wall, placing the thermal mass on the inside provides more comfortable indoor climate than placing the thermal mass on the outside (Fig. 5 (d), (e) and (f)). Similar constructive system was also recommended by Kossecka et al. and Al-Sanea et al. [20, 21] for energy saving in air conditioned buildings. Moreover, the current study further specified the thermal properties required compared to the bioclimatic design of walls in hot dry regions. The study also point out that the position of the wall layers should not be unique for the whole building but rather should be adapted according to the occupancy schedules of the spaces (Fig. 6and Fig. 7).

The lowest risk of thermal discomfort, reached in the living room, indicate that the thermal properties of the wall are sufficient to store or curb the heat from the inside and the outside. The resulting optimum cyclic thickness allow easy and direct connection of the thermal diffusivity of the material to the CEB layer thickness (Fig. 9 (a)). For instance, the thickness of CEB layer in walls is often 14 cm in Burkina Faso's buildings. The thermal diffusivities of the earth-based material that should be implemented with this thickness are $a = 1.20 \cdot 10^{-7}$ m²·s⁻¹ and of $a = 4.61 \cdot 10^{-7}$ m²·s⁻¹ for single and double layer wall respectively. For instance, the CEB implemented by Sore et al. [30] is more relevant for an application in double layer wall given that the thermal diffusivity lays between $a = 4.00 \cdot 10^{-7}$ m²·s⁻¹ and $a = 4.55 \cdot 10^{-7}$ m²·s⁻¹. The same analysis is possible for the room with the night occupancy profile i.e. the bedroom through Fig. 9 (b).

The relative position of thermal mass and the insulating layer also depends on occupancy profiles. For the living room, the CEB layer inside allows to store the heat from the inside due to internal gains. Indeed, in the reverse configuration, i.e. when the resistive insulating layer is inside, the internal heat gains (e.g., presence of occupants, hot air infiltration) is not absorbed by the wall resulting in a higher risk

of thermal discomfort. For the bedroom, the heat stored during daytime in the thermal mass layer is dissipated during the night time. An insulating layer in contact with the indoor environment allows to avoid the thermal discharge effect of the CEB layer at night. Indeed, the heat stored during the day in the thermal mass would mainly be removed from the wall towards the outside because of the presence of the resistive layer inside. Moreover, the cool air that coming in by ventilation is mainly used to improve the indoor thermal sensation, rather than cooling the thermal mass of the wall.

This study brings new knowledge in both practical and academic aspects. Practically, it will allow for a better design of CEB based walls in dry hot climates. From a scientific point of view, it allows for a more comprehensive understanding of previous studies related to CEB design [9, 30]. This finding demonstrate that occupancy patterns and their impact on required temperature range should be considered in a systematic way when discussing the impact of wall design on thermal comfort and, presumably, on energy needs. Furthermore, it indicates that room scale design recommendations may be more relevant than building scale when dealing with thermal comfort, although design approaches such as bioclimatic architecture often focus on building scale.

However, this study suffers two main limitations. First, it doesn't rely on full scale measurement in an inhabited house, and therefore fails to consider the impact of occupant's interactions with the building, in particular regarding ventilation patterns. For the same reason, simulated indoor temperature had to be used as proxy for thermal comfort, although it is well known that thermal comfort and thermal satisfaction are not solely correlated to indoor temperature. Second, some limits of the cyclic thickness are observed: it does not allow to accurately correlate the properties of the wall to the level of risk of overheating because of the variability of WEH observed for the same value of ξ (Fig. 5 (a) vs. Fig. 5 (b) vs. Fig. 5 (c)). Nevertheless, ξ converges with regard to the minima of WEH and can therefore be used for the design of the wall minimizing the risk of thermal discomfort.

6. Conclusion

This study focused on the design of CEB based walls in order to determine the suitable thermal properties that can minimise the risks of thermal discomfort in the hot climate of Ouagadougou. The results provide important design guidance in

addition to the conventional bioclimatic approach in dry hot climate. The results obtained in this study are summarised below:

- Based on the suitable cyclic thickness, the thermal diffusivity of the earth-based materials was expressed as a function of the wall thickness in order to minimize the risks of thermal discomfort and thereby reduce the demand of cooling energy. This gives a practical tool for the wall design in hot dry climate.
- The sensitivity of the design of the wall showed that the occupancy period of the rooms is an important factor that should be considered in further studies. This leads to the finding that the design should not be unique for all rooms. On the other hand, the considered ventilation strategy does not affect the thermal properties of the wall in our case.
- Current thermal properties of the CEB are relevant to certain applications and can be further optimized to improve the thermal comfort.

Acknowledgements

The authors would like to express gratitude to the "Académie de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur" of the "Fédération Wallonie-Bruxelles (Belgium)-Commission de la Coopération au Développement" (ARES-CCD) for funding this study as part of an international research and development project "Amélioration de la qualité de l'habitat en terre crue au Burkina Faso-*Improving the quality of earth-based housing in Burkina Faso*". The authors would like to thank Madi Kabore for providing the raw data of the experimental study building. The first author acknowledges Philbert Nshimiyimana for the support for writing of the paper

References

[1] J. José Vinagre Díaz, M. Richard Wilby, A. Belén Rodríguez González, Setting up GHG-based energy efficiency targets in buildings: The Ecolabel, Energy Policy, 59 (2013) 633-642.

[2] M.K. Dixit, J.L. Fernández-Solís, S. Lavy, C.H. Culp, Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review, Energy and Buildings, 42 (8) (2010) 1238-1247.

[3] I.Z. Bribián, A.V. Capilla, A.A. Usón, Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, Building and environment, 46 (5) (2011) 1133-1140.

[4] G.A. Blengini, Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy, Building and Environment, 44 (2) (2009) 319-330.

[5] H. Guillaud, T. Joffroy, P. Odul, Compressed earth blocks: Manual of design and construction, Vieweg, Eschborn, Germany, (1995).

[6] N. Huberman, D. Pearlmutter, A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert, Energy and Buildings, 40 (5) (2008) 837-848.

[7] C.M. Hema, G. Van Moeseke, A. Evrad, L. Courard, A. Messan, Vernacular housing practices in Burkina Faso: representative models of construction in Ouagadougou and walls hygrothermal efficiency, Energy Procedia, 122 (2017) 535-540.

[8] U. Wyss, S.D.d.d.e.d.l. coopération, La construction en" matériaux locaux": état d'un secteur à potentiel multiple, 2005.

[9] E. Ouedraogo, O. Coulibaly, A. Ouedraogo, A. Messan, Mechanical and Thermophysical Properties of Cement and/or Paper (Cellulose) Stabilized Compressed Clay Bricks, Journal of Materials and Engineering Structures «JMES», 2 (2) (2015) 68-76.

[10] P. Nshimiyimana, A. Messan, Z. Zhao, L. Courard, Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash, Construction and Building Materials, 216 (2019) 622-631.

[11] F. El Fgaier, Z. Lafhaj, E. Antczak, C. Chapiseau, Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks, Applied Thermal Engineering, 93 (2016) 377-383.

[12] A.S. ASHRAE, Standard 55-2013, Thermal environmental conditions for human occupancy, (2013) 12.

[13] F. Manzano-Agugliaro, F.G. Montoya, A. Sabio-Ortega, A. García-Cruz, Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49 (2015) 736-755.

[14] Y. Coulibaly, G. Tiombiano, Y. TRAORE, Climat et confort thermique, Sud Sciences et Technologies, (1998).

[15] L. Rincón, A. Carrobé, I. Martorell, M. Medrano, Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design, Journal of Building Engineering, (2019) 100732.

[16] P. Taylor, R. Fuller, M. Luther, Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building, Energy and buildings, 40 (5) (2008) 793-800.

[17] X. Dong, V. Soebarto, M. Griffith, Achieving thermal comfort in naturally ventilated rammed earth houses, Building and Environment, 82 (2014) 588-598.

[18] P. Meukam, A. Noumowe, Y. Jannot, R. Duval, Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment, Materials and structures, 36 (7) (2003) 453-460.

[19] M.B. Mansour, A. Jelidi, A.S. Cherif, S.B. Jabrallah, Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB), Construction and Building Materials, 104 (2016) 44-51.

[20] E. Kossecka, J. Kosny, Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building, Energy and Buildings, 34 (4) (2002) 321-331.

[21] S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, S.N. Al-Hussain, Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential, Applied Energy, 89 (1) (2012) 430-442.

[22] A. Synnefa, M. Santamouris, H. Akbari, Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions, Energy and Buildings, 39 (11) (2007) 1167-1174.

[23] A. Guideline, Guideline 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (2002).

[24] A.F. Handbook, American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA, (2009).

[25] M. Kaboré, Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne, Université Grenoble Alpes, 2015.

[26] H.M. Künzel, Simultaneous heat and moisture transport in building components, One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart, (1995).

[27] E. ISO, 13786: 2007, Thermal performance of building components–Dynamic thermal characteristics–Calculation methods, (2007).

[28] M.G. Davies, The thermal response of an enclosure to periodic excitation: the CIBSE approach, Building and Environment, 29 (2) (1994) 217-235.

[29] L. Long, H. Ye, The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials: a simulation study, Scientific Reports, 6 (2016) 24181.

[30] S.O. Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, F. Tsobnang, Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso, Construction and Building Materials, 165 (2018) 333-345.

[31] P. Meukam, Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Université de Yaoundé I, 2004.

[32] B. EN, 15251: 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, (2007).

[33] P. Fanger, Fundamentals of thermal comfort, in: Advances In Solar Energy Technology, Elsevier, 1988, pp. 3056-3061.

[34] R.J. De Dear, G.S. Brager, J. Reardon, F. Nicol, others, Developing an adaptive model of thermal comfort and preference/Discussion, ASHRAE transactions, 104 (1998) 145.

[35] R.J. De Dear, G.S. Brager, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, Energy and buildings, 34 (6) (2002) 549-561.

[36] P.O. Fanger, J. Toftum, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, Energy and buildings, 34 (6) (2002) 533-536.

[37] R.F. Rupp, N.G. Vásquez, R. Lamberts, A review of human thermal comfort in the built environment, Energy and Buildings, 105 (2015) 178-205.

[38] T. Cheung, S. Schiavon, T. Parkinson, P. Li, G. Brager, Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II, Building and Environment, 153 (2019) 205-217.

[39] A.S. Silva, E. Ghisi, R. Lamberts, Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55, Building and Environment, 102 (2016) 95-115.

Annexe D : Étude expérimentale sur l'amélioration du confort thermique en région chaude grâce à la conception de murs en BTC

Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: an experimental investigation

Césaire Hema [a, b, *], Doma Soro [a], Philbert Nshimiyimana [a, c], Abdou Lawane [a], Adamah Messan [a], Geoffrey van Moeseke [b]

[a] *Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD), Institut 2iE, Rue de la science 01 BP 594 Ouagadougou, Burkina Faso*

[b] *Architecture et Climat, Université catholique de Louvain (UCLouvain), Place du Levant 1, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium*

[c] *Urban and Environmental Engineering (UEE), Université de Liège (ULiege), Allée de la Découverte, 9, 4000 Liège, Belgium*

Abstract

There is growing need for new buildings to support urbanization and demographic boom in developing countries. These buildings should be environmentally friendly, economically accessible and, most importantly, thermally efficient. The latter aspect is particularly important when dealing with naturally ventilated buildings in hot-dry regions. These aspects can be fulfilled through the thermal properties and environmental benefits of compressed earth blocks (CEBs) technique. The present study investigated the thermal design of CEBs-based external walls in order to improve the indoor climate of naturally ventilated building in Burkina Faso. The study experimentally analysed the indoor thermal response of a test building which has three different design of external wall: single layer wall of CEBs, double layer wall having the CEBs layer on the inside (glass wool layer on the outside) and that having the CEBs layer on the outside (glass wool layer on the inside). It focused on spatial location of the CEBs and insulation layer in walls as well as proper ventilation strategy. The results show that the location of wall layers influences the indoor climate. When CEBs layer is placed inside, it leads to the highest reduction of the indoor temperature fluctuations. When CEBs layer is placed outside, it presents the best opportunity to prevent overheating in building spaces mainly occupied at night. Regardless of the wall design, nocturnal ventilation is the most suitable strategy which leads to improving the indoor climate compared to continuous ventilation. The addition of the insulation layer to the CEBs walls, both inside and outside, is particularly interesting in naturally ventilated buildings in hot-dry regions when it comes to dealing with the mitigation of indoor climate. The occupancy pattern of the buildings' spaces is also an important factor to consider for the design of external walls.

Keywords: compressed earth block, hot-dry climate, nocturnal ventilation, thermal comfort, wall design.

* Corresponding author.
Email: cesaire.hema@2ie-edu.org, cesaire.hema@gmail.com (Césaire Hema)

1. Introduction

The thermal comfort of buildings is one of the most important requirements that building designers must address in order to ensure the quality of the indoor environment, given that it impacts the productivity as well as health of users [1, 2]. The achievement of thermal comfort of buildings in developing countries may be a tall order to fill due to limited access to required products, extreme environmental conditions and limited financial capacity. Although the residential buildings represents up to 60-70% of total energy consumption at global scale, in developing countries, especially in sub-Saharan Africa, the energy consumption related to the operation of buildings is very low [3]. Indeed, the energy in built environment, in this part of the world, is mainly used for primary needs such as lighting instead of controlling the indoor thermal environment. In sub-Saharan African countries, having hot dry climate, the mitigation of indoor climate is based on vernacular and local architectural techniques such as eaves, blinds, high thermal inertia of materials and nocturnal ventilation of the buildings. These techniques, known as bioclimatic design principles, allow to reduce the heat transfer from the outside to indoor environment [4, 5]. The bioclimatic architectural options combines at the same times the environmental protection using local materials and the appropriate design of the building by considering climatic constraints. Earlier in the 60's, Givoni [6] theorized the building design principles in hot regions, noting that traditional architecture used heavyweight materials and thick exteriors walls and roofs to damp the temperature fluctuations at a level close to the average external temperature. The use of high thermal mass of external walls is an effective method to prevent overheating, thanks to its capacity to store heat, especially in buildings with a recurrent use pattern [7]. It has been particularly shown that the high thermal mass of external wall is effective for improving the indoor climate of buildings in Burkina Faso [5, 8].

Moreover, providing the walls with a thermal insulation layer can allow to improve the thermal comfort of the occupants of the building and also reduce the energy demand for cooling [9]. In fact, in hot climate, the wall should not be homogeneous but made of several layers having different thermal properties [10]. Therefore it raises the question about the appropriate location of different layers in wall, i.e.

thermal mass layer and thermal insulation layer. Givoni [6] stated that if a heavyweight layer is provided with an external layer of an efficient insulating material, the heat flow during the day from external to internal environment is restricted by the insulation and only a small proportion of the potential heat is absorbed in the element. Al-Sanea *et al.*[11] reached the same conclusions. In climatic conditions where heat is transmitted to the interior space (heat gain) as well as outside the space (heat loss), placing high thermal mass layer inside and insulation layer outside provides more damping of load fluctuation and smaller peak load of the inner surface heat flow. Eben Saleh [12] investigated the effect of insulation material on the thermal performance of building in hot-dry climate and showed that better performance was achieved by locating the insulation layer on the outer side of the building envelope. Under the climatic condition of Turkey, Meral Ozel [13] investigated the effect of insulation location on the heat transfer characteristics of building and showed that wall with outside insulation gives the smallest fluctuation. Through a review of the literature on thermal inertia, Verbeke and Audenaert [14] concluded that in most buildings and climates, higher amounts of thermal mass at the inner side appears to be beneficial with regard to improving thermal comfort.

However, depending on parameters such as occupant behaviour or air conditioning mode, other studies showed that the reverse construction system, i.e. placing the thermal mass layer outside and insulation layer inside provides better thermal performance. Bojic and Loveday [15] studied the impact of wall layers location. The authors performed a thermal simulation on a box with fixed wall thickness and U-value of 0.142 $W.m^{-2}.K^{-1}$. They showed that a wall with thermal insulation at the inner side can reduce energy consumption by up to 40% in case of intermittent heating. On the basis of thermal simulation analysis, Kolaitis *et al.* [16] compared the impact of the location of thermal insulation, i.e. external or internal insulation, on the energy efficiency of residential buildings in warm climate. Two scenarios were considered: passive occupant behaviour (no movable shadings and closed window) and active occupant behaviour (movable shadings and night ventilation). They showed that the cooling energy demand of the building with internal thermal insulation is lower than that of the building with external thermal insulation in the

passive behaviour scenario. On the contrary, external thermal insulation performed better than internal thermal insulation in the active behaviour scenario. Tsilingiris [17] investigated the effect of spatial location of heat capacity and thermal resistance layers of walls exposed to harmonically time-varying conditions. The author showed that locating the thermal resistance inside leads to the suppression of room temperature swing. Al-Sanea et al. [18] recommended insulation layer inside for spaces with intermittent cooling system. In another study [19], the authors state that the energy consumption in building is practically unaltered with regard to the location of insulation layer. A particular attention should be given to the high thermal mass walls coupled with a thermal resistance in order to take advantage of the cool climate at night in naturally ventilated buildings.

In summary, it can be noticed that there is a growing interest of determining the appropriate locations of the thermal layers in walls. However, the previous studies were carried out on thermal simulations or theoretical investigations and essentially were concerned with conditioned buildings, with the particular interest of saving the operating energy. The dependence between various parameters, the dynamic interactions between external walls and the environmental context introduces gap between thermal simulation and real case [20, 21]. Therefore, there is a need for more experimental studies to investigate the relative position of thermal mass and insulation layers in building walls, especially in buildings without air conditioning systems in hot-dry regions. The present study aims at analysing and comparing, at real-scale, the thermal performance of external walls in order to improve thermal comfort and prevent overheating in residential buildings. A particular attention is given to the definition of design solutions for future affordable and low-carbon buildings in developing countries such as Burkina Faso.

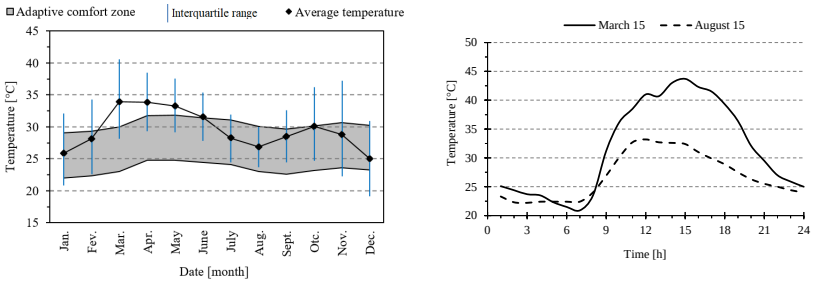
2. Methodology

Firstly, the climatic information of Burkina Faso is given. Secondly, the wall materials are determined based on the global and local context. Thirdly, the experimental building as well as measuring equipment and measured parameters are

described. Fourth, the investigated wall designs are presented. Then, the mode of indoor air change applied to the building are presented. Finally, parameters related to the assessment of overheating are introduced.

2.1. Climatic information

Burkina Faso is divided into three different climatic regions: the northern desert region, the central sudano-sahelian and the southern savannah region with monthly average temperature ranging between 22.6 °C and 35.5 °C [22]. Ouagadougou, the study area, is located in the central sudano-sahelian region. It has a monthly average temperature ranging between 25 °C and 34 °C and the average relative humidity which ranges between 14 % and 58 %, except during the rainy season where it can reach 80 %. Fig 1 (a) shows the evolution of the exterior air temperature. It also shows the thermal comfort zone according to the adaptive theory [23]. It is clear that the overheating in buildings is the most concerning given that there is almost no risk of discomfort due to the low temperature. The typical profile of daily temperature is shown in Fig. 1 (b) for two days, one in the hottest month of March and another during the rainy month of August. The high thermal amplitude between the day and night allows to consider nocturnal ventilation as strategy to improve the indoor climate.



(a) (b)

Fig. 1. Evolution of the exterior air temperature in Ouagadougou at (a) an annual scale and (b) a daily scale (TMY2)

2.2. Material of interest

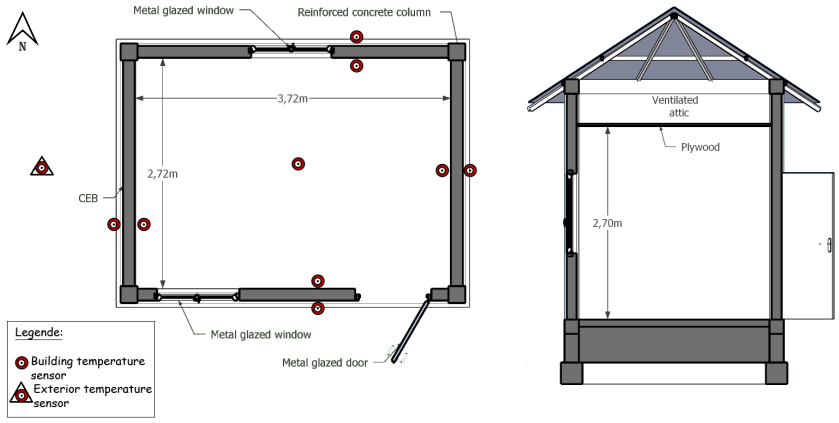
The building materials have an impact on greenhouse gases emissions through the operating and embodied energy of buildings. It is possible to reduce the CO_2 emissions up to 30% in the construction phase, through a careful selection of low environmental impact materials such as local material [24]. In regard to the local context, available materials used for wall construction in Burkina Faso are mainly hollow concrete blocks, laterite building stones and stabilized compressed earth blocks (CEBs) [25]. It is shown that the hollow concrete blocks and stone blocks have higher embodied energy than stabilized soil blocks [26]. CEBs are strong alternatives to the classical materials used in urban zone of Burkina Faso, in sense that they are cheaper, reduce the energy required for construction and the embodied impacts of earth building are almost half of Portland cement building [7, 27, 28]. Furthermore CEBs fulfil the thermal mass function of wall which leads to the reduction of the operating energy of buildings [29]. From these advantages, CEBs were considered for the thermal mass layer in the current study. The insulation material used is glass wool given the limited market. It is the only commercial and ready-to-use insulation material for construction in the local context.

2.3. Test building and measured parameters

The experimental study was conducted on a pilot building located at "Institut 2iE", Ouagadougou, Burkina Faso. The building consists of a single room of approximately 10 m². The openings of the building consist of two windows and one door, both made of metallic and glazed system. The two windows are on opposite façades oriented on S-N direction. From the outside to the inside of the building, the roofing system consist of aluminium metal sheet of 35/100 mm thick, a naturally ventilated attic and a ceiling made of plywood of 3 mm thick. The building does not have internal heat sources and was not occupied during the experimentation. Although the dimensions of the pilot building are not representative of urban constructions, it seems to be a good compromise between experimental investigation

and real-scale houses. Similar test cells were used by other authors to deal with indoor climate mitigation [5, 30, 31].

The climatic parameters were collected using thermal sensors placed inside the pilot building, on the walls and outside of the building. The measurements were recorded every hour. The values of the temperature of interior and exterior air were recorded using sensors type PT100 "TH of Waranet Solution". They have an error margin of 0.12 °C for measurement recorded at 30.12 °C. The sensor for the measurements of exterior conditions was placed in an aerated box in order to protect it from the solar radiations. The interior sensor was placed on a support in the middle of the building, 1.1 m high from the floor. The values of the temperature on the wall surfaces were recorded using sensors directly placed on the surface, and isolated from the influence of solar radiation or ambient air using glass wool. They are sensors type PT100 "TG of Waranet Solution", which have an error margin of 0.36 °C (measurement recorded at 30.12 °C). Fig. 2 presents the positions of the sensors of temperature in the pilot experimental building.



(a) (b)

Fig. 2. Experimental building : (a) floor plan and (b) section plan

2.4. Wall configurations

Taking into account the available local materials, three designs of walls were implemented. (i) The double layer wall which has a thermal mass layer (i.e. CEB layer) placed on the inner side of the wall and the insulation layer (i.e. glass wool) outside, namely "CEB_{in}". Throughout the present study, "CEB_{in}" was referred to as the wall or as the building related to this design. (ii) The double layer wall with the thermal layer placed on the outside and the insulation layer inside, namely "CEB_{out}". The steady state thermal resistance of the two double layer walls is $R = 0.45\ m^2.K.W^{-1}$. A plywood layer was used as assembly and protection system for the insulation layer. (iii) The single layer wall made of 14 cm thick CEBs, namely "CEB". This is the reference wall of the building. The steady state thermal resistance of the wall is $R = 0.31\ m^2.K.W^{-1}$. Table 1 shows the three designs of the wall. The designation "1" is related to the CEB layer, "2" to the insulation layer and "3" to the plywood used as protection of the insulation layer. Table 2 summarizes the thermal properties of the layers. Based on the building material and the colour (reddish brown, as it appears in table 1), it is assume that the solar absorptivity of the external surfaces of walls are quasi-similar and thus, the thermal response of the building is more controlled by the thermal properties of layers.

The three wall designs were implemented for all the facades of the building. To switch from one wall design to another (e.g. from CEB_{in} to CEB_{out}) the insulation layer is disassembled on the side on which it was initially placed (i.e. outside) and reassembled on the opposite side (i.e. inside). Except the walls, all the building components such as the roof and the floor were not insulated.

Table 1. Illustration of the investigated designs of wall.

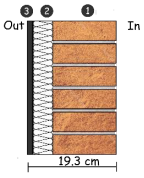
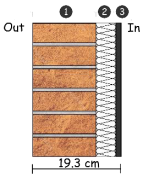
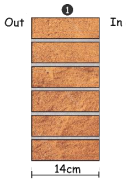
Designation	Wall designs	Illustration of the building
CEB_{in} U-value = 0.66 $W.m^{-2}.K^{-1}$		
CEB_{out} U-value = 0.66 $W.m^{-2}.K^{-1}$		
CEB U-value = 3.22 $W.m^{-2}.K^{-1}$		

Table 2. Thermal properties of layers [32-34].

N°	Materials	Density [kg.m^{-3}]	Specific heat [J.kg^{-1}.K^{-1}]	Thermal conductivity [W.m^{-1}.K^{-1}]	Thickness [m]
1	Compressed earth blocks	1900	1089	1.00	0.14
2	Glass wool	20	1030	0.042	0.05
3	Plywood	560	1500	0.13	0.003

2.5. Ventilation strategies

The passive design principles of the bioclimatic approach consider proper natural ventilation as an important parameter to improve the indoor thermal quality [3, 35, 36]. The nocturnal ventilation may improve the indoor climate of buildings in Ouagadougou given the high amplitude between day and night temperatures (see section 2.1.). In addition to nocturnal ventilation two other strategies of air change (SAC) were investigated. The scenario named SAC0 is the base case in which the windows of the building are closed all day long. The potential air exchange between indoor and outdoor environment are only due to infiltration. This strategy allow to overcome, at some extent, the impact of wind and then compare the thermal performances of walls. For SAC1 scenario, windows are closed during the day to avoid the exterior hot temperature and open during the night to take the advantage of mild temperature. For SAC2 scenario, windows are fully open all the day long. A continuous air exchange occur between outdoor and indoor environment. Table 3 summarizes adopted strategies of air change as well as the period during which they were applied for each wall designs of the building.

During the study, some sensors were damaged. The failure of a single sensor has an impact on the measurement period since simultaneous data from all sensors is

required. The time period of the application of each strategy of air change was 11 days instead of 21 days initially projected.

Table 3. Strategies of air change: periods of applications of each scenario for each wall design

	CEB	CEBout	CEBin	Positions of window
SAC0	22/01/20 - 02/02/20	02/09/19 - 13/09/19	08/04/19 - 15/04/19 ; 01/05/19 - 03/05/19	Closed all day long
SAC1	04/02/20 - 16/02/20	23/09/19 - 03/10/19	18/05/19 - 27/05/19	Closed from 06h00 to 18h00, then open from 18h00 to 06h00
SAC2	21/02/20 - 02/03/20	25/10/19 - 04/11/19	23/04/19 - 28/04/19 ; 09/05/19 - 12/05/19	Open all the day long

2.6. Definition of wall performance parameters

Existing recommendation for the assessment of overheating in buildings includes criteria based on fixed thresholds and that based on the adaptive thermal comfort approach. Fixed thresholds criteria is based on data from controlled climate chamber studies and is mainly applicable to particular combinations of indoor thermal conditions, occupant metabolic rate and clothing insulation levels [37]. The adaptive thermal comfort criteria is based on a movable thresholds and suggest that occupant's thermal responses depend on the outdoor ambient temperatures. Its application requires data over a certain period (no few than seven days) which represents the external climate to which building occupants have become physiologically, behaviourally, and psychologically adapted [23].

Taking the above into consideration, the assessment of overheating in the present study was based on a fixed threshold. The limited time period of each experiment

(i.e. 11 days) did not allow to consider the adaptive thermal comfort approach. However, taking into account the local hot climate and the free running ventilation of buildings, the threshold was assumed to be the average outdoor temperature. Indeed, the assessment of overheating based on the number of hours above the threshold of 26 or 28 °C is more appropriate for air-conditioned buildings [38].

The *relative operative temperature* (rT_{op}) was defined as ratio of the indoor operative temperature to the average outdoor temperature. It is calculated using equation 1. The first term of equation 1 is the operative temperature calculated as prescribed by ASHRAE [23]. The second term is the overheating threshold. Therefore, $rT_{op} > 1$ suggests that the indoor operative temperature is greater than the mean temperature of exterior air, i.e. it is hotter inside the building than outside. Thus, it is assumed that the overheating of the indoor thermal ambiance occurs when $rT_{op} > 1$. By contrary, $rT_{op} < 1$ indicates that the indoor operative temperature is lower than the mean temperature of exterior air.

$$rT_{op} = \left(\frac{\bar{T}_{surf,int} + T_{air,int}}{2}\right) \cdot \frac{1}{\bar{T}_{out}} \quad (1)$$

With, $\bar{T}_{surf,int}$ [°C]: the hourly average of surface temperature of the four walls surrounding the indoor space; $T_{air,int}$ [°C]: the hourly temperature of indoor air; $\bar{T}_{out}$ [°C]: the average outdoor temperature over the study period (i.e. 11 days).

Based on the principle of decrement factor applied to walls, the *relative decrease in the variation of the interior operative temperature* (rVT_{op}) is defined and applied to thermal environement. The decrement factor is defined as the ratio of the periodic diurnal variation of indoor surface temperature to the periodic variation of outdoor surface temperature [39]. Similarly, rVT_{op} is the ratio of the periodic diurnal variation of operative temperature to the periodic variation of outdoor air temperature. rVT_{op} was used to address the ability of walls to resist the temperature fluctuation. It is calculated using equation 2. A low value of rVT_{op} (i.e. ≈ 0) indicates

an important reduction of the fluctuation amplitude of indoor temperature, compared to the fluctuation of exterior temperature.

$$rVT_{op} = \frac{T_{op,max} - T_{op,min}}{T_{ext,max} - T_{ext,min}} \quad (6)$$

3. Results

3.1. Effect of wall design and strategy of ventilation on indoor temperatures

Fig. 3 shows the evolution of the indoor and outdoor air temperature for each design of wall and for each strategy of ventilation. The values of indoor temperature evolve similarly to the outdoor temperature, oscillating between a daily high and low peak. The results on building whose walls consist of CEB_{in} (Fig. 3 (a)) shows that the indoor temperature records more important fluctuations for scenarios SAC1 (12.5 °C) and SAC2 (14 °C) than SAC0 (8.5 °C). The latter records the most stable evolution of indoor temperature, also reaching lower fluctuations compared to the outdoor temperature. The peaks of indoor temperature remain lower than the outdoor peaks, regardless the strategy of air change. The evolutions of indoor temperature for scenarios SAC1 and SAC2 record similar minimum values as outdoor temperatures. Regarding the CEB_{out} building (Fig. 3 (b)), the fluctuations of indoor temperature remain lower for SAC0 (10.5 °C) than SAC1 (13.5 °C) and SAC2 (12.5 °C). However, the values of daily indoor temperature record quasi-similar maximum values (29.9-36.8 °C) as the outdoor temperature (28.4-38.4 °C), regardless the strategy of air change. The solar radiation effect was more noticeable when insulation layer was placed inside, as indicated by the maximum values of the indoor temperature which is higher than that recorded outside, for most days of SAC0. Regarding the CEB building (Fig. 3(c)), the results show that the maximum values of indoor temperature are similar or higher than the maximum values of outdoor temperature.

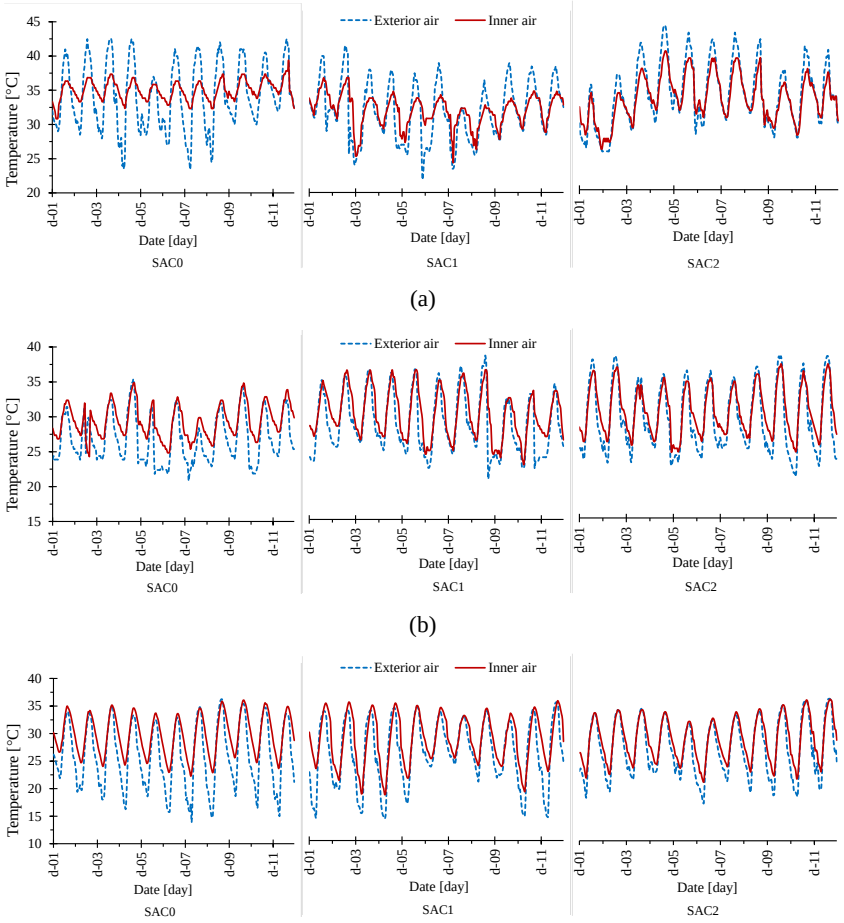


Fig. 3. Exterior and inner temperatures for the buildings made of (a) CEB_{in} (b) CEB_{out} and (c) CEB over the experimental time for different scenarios of air change.

3.2. Effect of wall design and strategy of ventilation on relative parameters

Fig. 4 presents the evolution of relative operative temperature (rT_{op}) over time for different wall designs and scenarios of air change. For all wall designs, the evolution of rT_{op} under air change scenario SAC0 (i.e. no ventilation) is mostly above the threshold of 1, representing the overheating. It can be explained by the permeability of windows to solar radiation in the visible range, and their opacity to the radiation emitted by the surfaces at room temperature (infrared range) which result in greenhouse effect. The scenarios SAC1 (i.e. nocturnal ventilation) and SAC2 (continuous ventilation) allows a global decrease of the evolution of rT_{op} compared to SAC0. The lowest swing of rT_{op} is provided by CEB_{in} building (0.19) as shown in Fig. 4 (a), while the highest is recorded for CEB building (0.32) in Fig. 4 (c). CEB building also records the highest and lowest peak of rT_{op} (1.36 and 0.74 respectively). The evolution of rT_{op} for CEB_{out} building (Fig. 4 (b)) always lays between both previous constructions systems.

Fig. 5 shows the evolution of the relative decrease in the variation of the interior operative temperature (rVT_{op}) of the three wall designs for different scenarios of air change. The values of rVT_{op} for a defined type of wall design and scenario of air change should be quasi-constant (see equation 6). The fluctuations of rVT_{op} can be explained by the effect of other climatic variables such as the solar radiation and wind. However, the results shows that the CEB_{in} building presents lower values of rVT_{op} comparatively to CEB_{out} and CEB buildings, regardless of the ventilation strategy. The values of rVT_{op} for CEB_{in}, CEB_{out} and CEB buildings respectively lay between 0.17 - 0.60, 0.57 - 0.88 and 0.56 – 0.97. There is not a noticeable difference between the evolution of rVT_{op} for both CEB_{out} and CEB building with scenarios SAC0 and SAC2. However, with scenario SAC1, the evolution of rVT_{op} for CEB_{out} building is generally lower than that of CEB building.

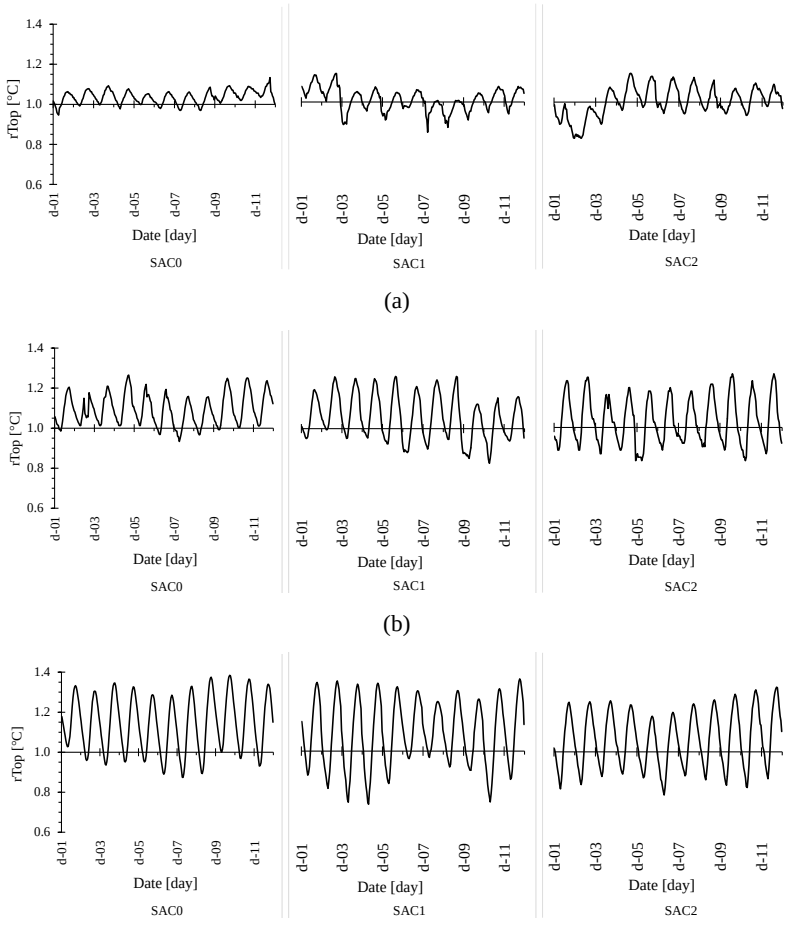
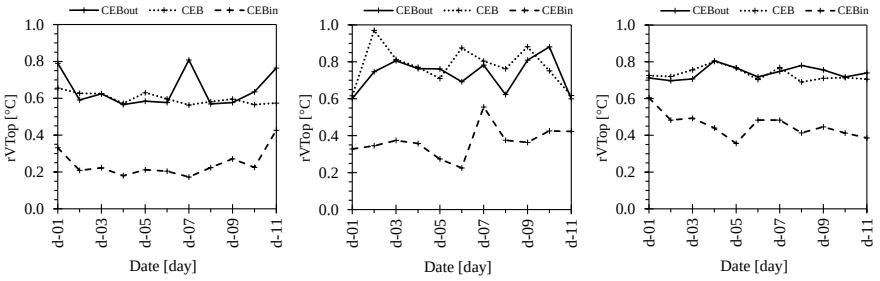


Fig. 4. Evolution of relative operative temperature under scenarios SAC0 SAC1 and SAC2 for (a) CEBin, (b) CEBout and (c) CEB building.



(a) (b) (c)

Fig. 5. Evolution of relative decrease in the variation of the interior operative temperature of CEB_{in}, CEB_{out} and CEB building for scenarios (a) SAC0, (b) SAC1 and (c) SAC2.

3.3. Distribution of overheating

Fig. 6 presents the distribution of indoor overheating as a function of the adopted ventilation strategy. For the record, it is assumed that the overheating occurs when the value of rVT_{op} is greater than 1, i.e. the indoor operative temperature is higher than the exterior air temperature. The values of $rVT_{op} > 1$ occurring in the time period of 5am to 9pm are considered as "day time" overheating, while the $rVT_{op} > 1$ in the period of 9pm to 5am are considered as "night time" overheating. Therefore, Fig. 6 presents the distribution of the overheating based on the previous results presented in Fig. 4, in the day or night time. The results generally show that overheating in the day time contribute the most important fraction of the total overheating, between 80 and 100 % depending on the wall design and ventilation strategy, towards the total overheating. The scenario SAC0 (Fig. 6(a)) records the most important fraction of overheating in the night time, up to 21 %, compared to SAC1 and SAC2 (Fig. 6(a) and (b)). The wall design CEB_{out} leads to the almost elimination of overheating in night time, while the CEB_{in} and CEB wall presents the lowest fraction of overheating in the day time.

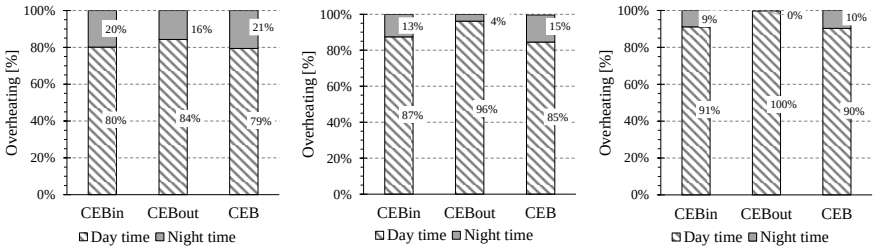


Fig. 6. Distribution of overheating as a function of the wall design for (a) SAC0, (b) SAC1 and (c) SAC2

3.4. Effect of wall design on surface temperatures

Fig. 7 presents the maximum and minimum values of temperature on the wall surfaces (external and internal) reached for each wall design oriented toward the East when applying SAC0 (see appendix A for the other orientations). It shows the gradients of temperature, between the internal and external surfaces, which are the driving force of the heat flow through the walls. The largest range of the variation of external temperature is observed for CEB_{in} (Fig. 7 (a)), related to the high fluctuation of outdoor temperature (Fig. 3 (a)) and solar radiation occurring during that period of measurement. These results also show that CEB_{in} has the highest ability to dampen the temperature. As far as the CEB_{out} and CEB walls are concerned (Fig. 7 (b and c)), the range of variation of external temperature is 12 °C while the internal variation is 6 °C. For the same thermal resistance R = 0.45 m².K/W, CEB_{in} provide a lowest swing of internal temperature compared to CEB_{out}. This obviously shows that the relative position of layers in the wall is crucial.

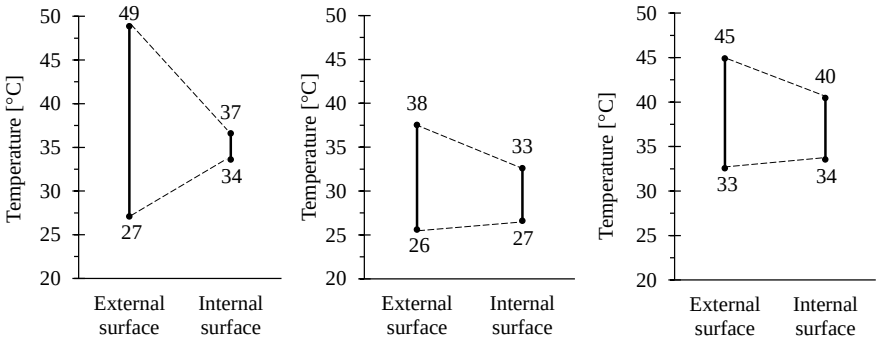


Fig. 7. Temperature range of the external and internal surface of Eastern walls under scenario SAC0 for (a) CEB_{in}, (b) CEB_{out} and (c) CEB

4. Discussion

The objective of the present study was to assess the potential of the design of wall based on compressed earth blocks to mitigate and prevent overheating in naturally ventilated building regarding different strategies of ventilation. The novelty of the study lies in the relative location of the CEBs layer in double layer wall of naturally ventilated building in hot-dry region especially in Burkina Faso. The study also investigated the effects of the adopted scenario of ventilation on the indoor climate. The evolutions of indoor temperature are strongly influenced by the design of the exterior walls as well as the strategy of ventilation as shown by Fig. 3. The CEB layer placed inside (CEB_{in}) leads to appreciable damp of the fluctuations of indoor temperatures comparatively to the inverse construction system, i.e. when the CEB layer is placed outside (CEB_{out}). The nocturnal and continuous ventilation (SAC1 and SAC2) are appropriate strategy at night for all the three wall design, leading to reducing the indoor temperature as low as the mild exterior temperature. This is more explicit on Fig. 4, where the curves frequently crossed the threshold of 1, indicating the reduction of overheating. However, the levels of overheating reached

for each design of wall are not evenly distributed between the day and night time. The night discomfort is almost non-existent in CEB_{out} building, while it occurs up to 21 % for the CEB_{in} and CEB building (Fig. 6). The best mitigation of the impact of outdoor climate on indoor temperatures is obtained when the CEBs layer is placed on the inside (Fig 5 and 7). This briefly shows that it is interesting to add an insulation layer to CEBs walls in naturally conditioned building in hot-dry regions and the relative positions of layers are crucial.

The present analysis compares three design of walls on their ability to improve the indoor environment and prevent overheating of residential buildings. The CEBs walls provided with additional thermal resistance layer act as thermal shield which results in less heat transmission compared to single layer CEBs wall. One of the concerns with the use of insulation material in non-conditioned building is the risk to increase the overheating. In fact, the increase of the wall thermal resistance may result in trapping the heat from the indoor environment and therefore leads to high temperatures. However, the results from the current study shows that double layer walls contribute to preventing the overheating if provided with proper ventilation and suitable location of the layer in walls. When the thermal mass layer is placed inside (CEB_{in}), it allows to absorb the heat of indoor air during the day, while the resistive layer outside curbs the heat flow (through the wall) from solar radiation and exterior air. The values of indoor temperature are generally similar to the mean exterior temperature. The result about the position of the thermal mass layer is similar to that reported by other authors [6, 7, 11-13]. However, it is highlighted herein that CEB_{in} is particularly suitable for rooms mainly occupied during the day time (5 a.m. to 9 p.m.), while CEB_{out} should be considered for the rooms occupied at night (9p.m. to 5a.m.) in order to deal with the thermal comfort. When the insulation layer is placed inside (CEB_{out}), it prevents the heat absorbed by the thermal mass during the day from being released into the indoor environment at night. Therefore, if provided with nocturnal or continuous ventilation, CEB_{out} allows the mild temperature of the air to be instantly available for the thermal sensation of occupants instead of cooling the thermal mass layer. Given the hot climate, the limited financial capacity of households and the cost of energy in Burkina Faso, the

occupants of modest homes will find acceptable the indoor climate at night when the indoor temperatures are similar to those outside. In a nutshell, the occupancy pattern of the buildings spaces is an important factor for thermal comfort and must be taken into account during the design of external walls.

The analysis of the local context of building sector established the CEBs as a promising material for the construction of affordable houses in urban zone of the country [25]. Various studies have also reported the suitability of local materials for the improvement of the physio-mechanical and hygro-thermal performances of CEBs for structural and efficient applications in contemporary construction [32, 40-43]. Regarding the capacity of earth-based houses to improve the indoor thermal environment, research studies have to be conducted to complete the characterization of the materials. One of the limitations of the present study was not to be able to control the discharge rate of natural ventilation and to measure the solar radiation. In fact, the wind speed and direction as well as the solar radiation are among the parameters that affect the indoor climate of naturally ventilated building. Therefore, the discussions were limited to the effects of ventilation for each type of wall design, and did not compare the effects among different wall designs. Another limitation of the study was the limited number of test buildings for parallel monitoring of the thermal parameters. The outdoor climate changed between successive monitoring. This had an impact on recorded parameters related to the indoor climate. However, it is believed that the parameters in section 2.6 allowed to mitigate the influence of the variations of outdoor climate. Future studies could also carry out the monitoring over the extended period of time; this would improve the completeness of data.

Nevertheless the present study highlights the interest of coupling the earthen material, which has a high thermal capacity, with an insulation layer in naturally ventilated buildings in hot-dry regions. The holistic approach, which take into account the real variability of the climate, allowed to go beyond theoretical and simulation studies which are limited to ideal climates.

This study presents important advances for the resiliency of future constructions towards climatic conditions and consumption of resources. Future investigations should focus on more environmentally friendly insulation materials than the glass

wool used in the present study. Alternatively, the studies can be oriented toward the usage of local and plant fibers or residue of paper cellulose. This are general perspectives to preserve the environment and depletion of non-renewable resources and integrate the local construction techniques. Research on building physics in Burkina Faso, and developing countries in general, should learn from past mistakes of the developed countries in order to develop more durable architecture.

5. Conclusion

The design of double layer walls based on compressed earth blocks (CEBs) have been investigated through an experimental study. The present study aims to improve the indoor comfort and prevent the overheating in naturally ventilated buildings in hot regions. The case study was carried out in Ouagadougou, Burkina Faso. Different scenarios of ventilation have been investigated. The emerging results are a step forward for building designers that deal with CEBs as wall materials:

- Adding an insulation layer to the CEBs wall helps to mitigate the indoor temperatures compared to a building made of a single layer of CEBs. The insulation layer reduces the heat transfer from the hot outdoor climate and is effective for naturally ventilated buildings.
- Building whose external walls are made of CEBs layer on the inside and insulation layer on the outside provides the best opportunity to reduce overheating during the day time. This design provides the lowest fluctuation of internal surface temperatures.
- Walls that consist of CEBs layer on the outside and the insulation layer on the inside are suitable for the building spaces mainly occupied during the night, when the building is provided with the free night ventilation.

Acknowledgements

The authors would like to express gratitude to the "Académie de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur" of the "Fédération Wallonie-Bruxelles (Belgium)-Commission de la Coopération au Développement" (ARES-CCD) for funding this

study as part of an international research and development project "Amélioration de la qualité de l'habitat en terre crue au Burkina Faso-*Improving the quality of earth-based housing in Burkina Faso*".

References

[1] P.K. Latha, Y. Darshana, V. Venugopal, Role of building material in thermal comfort in tropical climates – A review, Journal of Building Engineering, 3 (2015) 104-113.

[2] M. Frontczak, P. Wargocki, Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments, Building and Environment, 46 (4) (2011) 922-937.

[3] F. Manzano-Agugliaro, F.G. Montoya, A. Sabio-Ortega, A. García-Cruz, Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49 (2015) 736-755.

[4] Y. Coulibaly, G. Tiombiano, Y. TRAORE, Climat et confort thermique, Sud Sciences et Technologies, (1998).

[5] L. Rincón, A. Carrobé, I. Martorell, M. Medrano, Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design, Journal of Building Engineering, (2019) 100732.

[6] B. Givoni, Man, climate and architecture, Elsevier;(), (1969).

[7] A. Brambilla, T. Jusselme, Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype, Energy and Buildings, 156 (2017) 281-292.

[8] Y. COULIBALY, G. TIOMBIANO, Climat et confort thermique, (1998).

[9] L. Long, H. Ye, The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials: a simulation study, Scientific Reports, 6 (2016) 24181.

[10] C.V. Coffman, R.J. Duffin, G.P. Knowles, Are adobe walls optimal phase-shift filters?, Advances in Applied Mathematics, 1 (1) (1980) 50-66.

[11] S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, S.N. Al-Hussain, Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential, Applied Energy, 89 (1) (2012) 430-442.

[12] M. Eben Saleh, Thermal insulation of buildings in a newly built environment of a hot dry climate: the Saudi Arabian experience, International Journal of Ambient Energy, 11 (3) (1990) 157-168.

[13] M. Ozel, Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness, Energy and Buildings, 72 (2014) 288-295.

[14] S. Verbeke, A. Audenaert, Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 2300-2318.

[15] M.L. Bojić, D. Loveday, The influence on building thermal behavior of the insulation/masonry distribution in a three-layered construction, Energy and buildings, 26 (2) (1997) 153-157.

[16] D.I. Kolaitis, E. Malliotakis, D.A. Kontogeorgos, I. Mandilaras, D.I. Katsourinis, M.A. Founti, Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings, Energy and Buildings, 64 (2013) 123-131.

[17] P. Tsilingiris, Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures, Energy and Buildings, 38 (10) (2006) 1200-1211.

[18] S.A. Al-Sanea, M. Zedan, Effect of insulation location on initial transient thermal response of building walls, Journal of Thermal Envelope and Building Science, 24 (4) (2001) 275-300.

[19] S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass, Applied Energy, 88 (9) (2011) 3113-3124.

[20] T. Maile, V. Bazjanac, M. Fischer, A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance, Building and Environment, 56 (2012) 241-251.

[21] J. Karlsson, Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut power consumption peaks and increase the thermal comfort, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, 2012.

[22] M. Kaboré, Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne, Université Grenoble Alpes, 2015.

[23] A.S. ASHRAE, Standard 55-2013, Thermal environmental conditions for human occupancy, (2013) 12.

[24] M.J. González, J. García Navarro, Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact, Building and Environment, 41 (7) (2006) 902-909.

[25] C.M. Hema, G. Van Moeseke, A. Evrad, L. Courard, A. Messan, Vernacular housing practices in Burkina Faso: representative models of construction in Ouagadougou and walls hygrothermal efficiency, Energy Procedia, 122 (2017) 535-540.

[26] N. Huberman, D. Pearlmutter, A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert, Energy and Buildings, 40 (5) (2008) 837-848.

[27] M.S. Zami, A. Lee, Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – State-of-the-art review, Journal of Building Appraisal, 5 (3) (2010) 259-271.

[28] J. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, P. Walker, Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction, Building and Environment, 36 (10) (2001) 1119-1126.

[29] N. Aste, A. Angelotti, M. Buzzetti, The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, Energy and buildings, 41 (11) (2009) 1181-1187.

[30] J. Rojas, G. Barrios, G. Huelsz, R. Tovar, S. Jalife-Lozano, Thermal performance of two envelope systems: Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations, Journal of Building Physics, 39 (5) (2016) 452-460.

[31] F. Kuznik, J. Virgone, Experimental assessment of a phase change material for wall building use, Applied energy, 86 (10) (2009) 2038-2046.

[32] S.O. Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, F. Tsobnang, Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso, Construction and Building Materials, 165 (2018) 333-345.

[33] S.H. Moussa, P. Nshimiyimana, C. Hema, O. Zoungrana, A. Messan, L. Courard, Comparative Study of Thermal Comfort Induced from Masonry Made of Stabilized Compressed Earth Block vs Conventional Cementitious Material, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 7 (385-403) (2019) 385-403.

[34] D.D. Denouwe, A. Messan, E. Fournely, A. Bouchaïr, F. Tsobnang, Évaluation des caractéristiques mécaniques des connexions par entaille et barre d'acier HA filetée dans les poutres mixtes bois-béton, in: Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2015.

[35] L.C. Labaki, D.C. Kowaltowski, Bioclimatic and vernacular design in urban settlements of Brazil, Building and Environment, 33 (1) (1998) 63-77.

[36] H. Coch, —Bioclimatism in vernacular architecture, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2 (1998) 67–87.

[37] A. Pathan, A. Mavrogianni, A. Summerfield, T. Oreszczyn, M. Davies, Monitoring summer indoor overheating in the London housing stock, Energy and Buildings, 141 (2017) 361-378.

[38] Z.C. Hub, Next steps in defining overheating: A discussion paper, ZCH, London, (2016).

[39] P.K.S. Rathore, S.K. Shukla, N.K. Gupta, Yearly analysis of peak temperature, thermal amplitude, time lag and decrement factor of a building envelope in tropical climate, Journal of Building Engineering, 31 (2020) 101459.

[40] P. Nshimiyimana, A. Messan, Z. Zhao, L. Courard, Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash, Construction and Building Materials, 216 (2019) 622-631.

[41] P. Nshimiyimana, N. Fagel, A. Messan, D.O. Wetshondo, L. Courard, Physico-chemical and mineralogical characterization of clay materials suitable for production of stabilized compressed earth blocks, Construction and Building Materials, 241 (2020) 118097.

[42] P. Nshimiyimana, S.H. Moussa, A. Messan, L. Courard, Effects of production and curing conditions on performances of stabilized compressed earth blocks: Kaolinite vs quartz-rich materials, MRS Advances, (2020).

[43] S. Kabre, F. Ouedraogo, B. Naon, A. Messan, J.C. Benet, F. Zougmore, Évaluation des propriétés thermo-hydro-mécaniques des briques en terre compressée (BTC) issues de la carrière de Matourkou, au Burkina Faso, Afrique SCIENCE, 15 (3) (2019) 12-22.

Appendix A. Surface temperatures of external wall

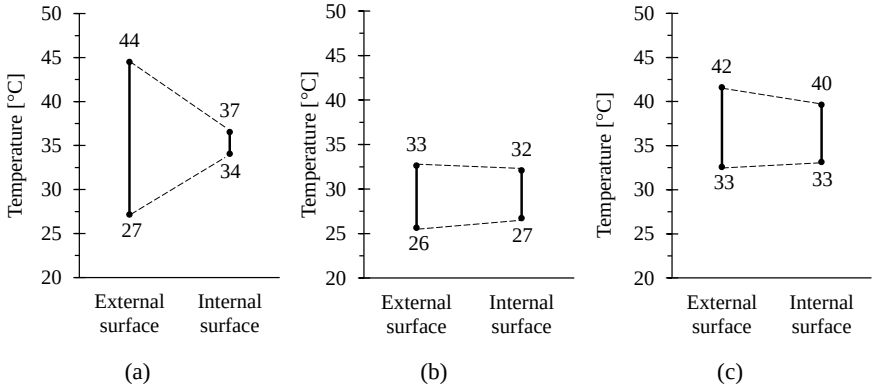


Fig. A1. Temperature range of the external and internal surface of North walls under SAC0 for (a) CEB_{in}, (b) CEB_{out} and (c) CEB

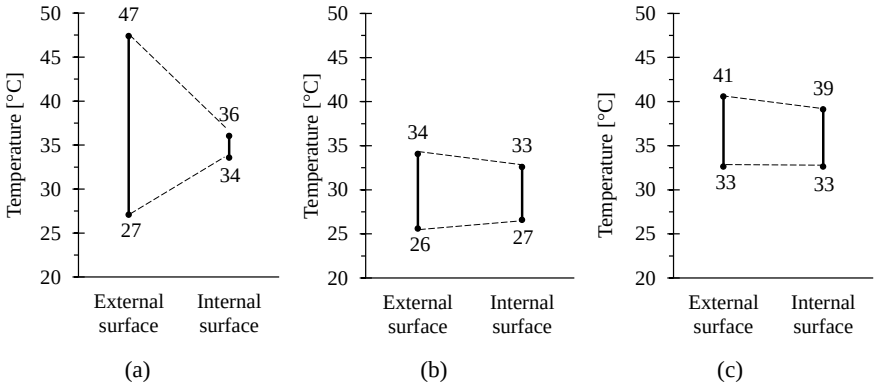


Fig. A2. Temperature range of the external and internal surface of South walls under SAC0 for (a) CEB_{in}, (b) CEB_{out} and (c) CEB

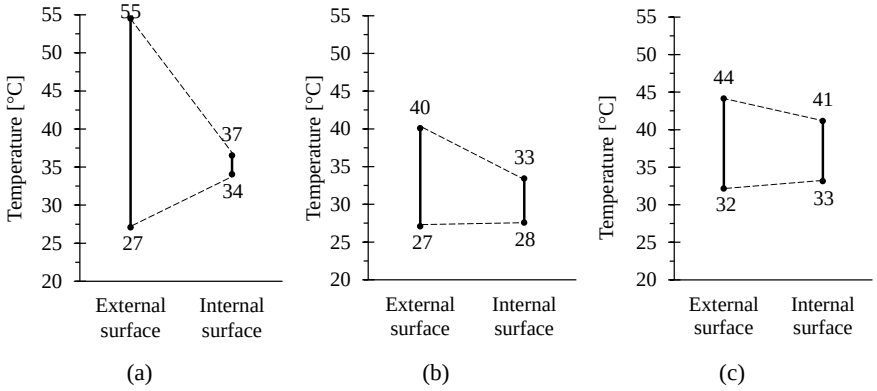


Fig. A3. Temperature range of the external and internal surface of West walls under SAC0 for (a) CEB_{in}, (b) CEB_{out} and (c) CEB

Bibliographie

ABHILASH, H. N., MCGREGOR, F., MILLOGO, Y., FABBRI, A., SÉRÉ, A. D., AUBERT, J. E. et MOREL, J. C. (2016). Physical, mechanical and hygrothermal properties of lateritic building stones (lbs) from burkina faso. *Construction and Building Materials*, 125:731–741.

ADAM, E. et AGIB, A. (2001). Compressed stabilised earth block manufacture in sudan. *France, Paris : Printed by Graphoprint for UNESCO*.

ADAM, E. et JONES, P. (1995). Thermophysical properties of stabilised soil building blocks. *Building and Environment*, 30(2):245–253.

ADEGUN, O. B. et ADEDEJI, Y. M. D. (2017). Review of economic and environmental benefits of earthen materials for housing in africa. *Frontiers of Architectural Research*, 6(4):519–528.

AL-OBAIDI, K. M., ISMAIL, M. et RAHMAN, A. M. A. (2014). A review of the potential of attic ventilation by passive and active turbine ventilators in tropical malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 10:232–240.

AL-SANEA, S. A., ZEDAN, M. F. et AL-HUSSAIN, S. N. (2012). Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Applied Energy*, 89(1):430–442.

ALLINSON, D. et HALL, M. (2010). Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the uk. *Energy and Buildings*, 42(6):845–852.

American Society of HEATING, R. et ENGINEERS, A.-C. (2009). *2009 ASHRAE Handbook : Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.

ANGER, R., FONTAINE, L., HOUBEN, H., DOAT, P. et VAN DAMME, H. (2009). Bâtir en terre. *Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin/Cité des sciences et de l'industrie*.

ANSD-SÉNÉGAL (2014). Recensement général de la population et de l'habitat, de l'agriculture et de l'elevage : Rapport définitif rgphae 2013. Report, Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (Sénégal).

ASHRAE (2002). Guideline 14-2002, measurement of energy and demand savings. *American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia*.

ASHRAE, A. S. (2013). Standard 55-2013. *Thermal environmental conditions for human occupancy*, page 12.

ASHRAE HANDBOOK, F. (2009). American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. *Inc. : Atlanta, GA, USA*.

AULICIEMS, A. (1981a). Psycho-physiological criteria for global thermal zones of building design. *Int J Biometeorol*, 26:69–86.

AULICIEMS, A. (1981b). Towards a psycho-physiological model of thermal perception. *International Journal of Biometeorology*, 25(2):109–122.

AVN, A. l. V. N. (2015). Une réponse adaptée et durable à la problématique de l'habitat en afrique. Report, Association la Voûte Nubienne.

BA, M. F. et BERTRAND, M. (2012). Mesures démographiques et politique du logement dans la capitale malienne : un programme social au regard des pratiques résidentielles bamakoises. *Archives-ouvertes*.

BECKETT, C. T. S., CARDELL-OLIVER, R., CIANCIO, D. et HUEBNER, C. (2017). Measured and simulated thermal behaviour in rammed earth houses in a hot-arid climate. part b : Comfort. *Journal of Building Engineering*, 13:146–158.

BOGAS, J. A., SILVA, M. et GOMES, M. d. G. (2018). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, pages 1–16.

BOJIC, M. L. et LOVEDAY, D. (1997). The influence on building thermal behavior of the insulation/masonry distribution in a three-layered construction. *Energy and buildings*, 26(2):153–157.

BORGESON, S. et BRAGER, G. (2011a). Comfort standards and variations in exceedance for mixed-mode buildings. *Building Research and Information*, 39(2):118–133.

BORGESON, S. et BRAGER, G. (2011b). Comfort standards and variations in exceedance for mixed-mode buildings. *Building Research and Information*, 39(2):118–133.

BOU-SAADA, T. E. et HABERL, J. S. (1995). An improved procedure for developing calibrated hourly simulation models. *Texas AM University*.

BOUDEN, C. et GHRAB, N. (2005). An adaptive thermal comfort model for the tunisian context : a field study results. *Energy and Buildings*, 37(9):952–963.

BRAMBILLA, A., HOXHA, E., JUSSELME, T., ANDERSEN, M. et REY, E. (2016). Lca as key factor for implementation of inertia in a low carbon performance driven design : The case of the smart living building in fribourg, switzerland. *Proceedings of the Sustainable Built Environment Regional Conference, Zurich, Switzerland*, pages 15–17.

BRAMBILLA, A. et JUSSELME, T. (2017). Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks : A study on a real scale prototype. *Energy and Buildings*, 156:281–292.

BRUNAUER, S., EMMETT, P. H. et TELLER, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American chemical society*, 60(2): 309–319.

BUTERA, F. M. (2010). *Climatic change and the built environment*, pages 55–86. Routledge.

CAGNON, H., AUBERT, J., COUTAND, M. et MAGNIONT, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80:208–217.

CARLUCCI, S. et PAGLIANO, L. (2012). A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53:194–205.

CEDEAO (2008). *Profil de pauvreté dans les pays de la CEDEAO*. CEDEAO.

CENGEL, Y. (2014). *Heat and mass transfer : fundamentals and applications*. McGraw-Hill Higher Education.

CHAHWANE, L. (2011). Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments. *PhD, Université Grenoble Alpes*.

CHAMOIN, J. (2013). Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. *INSA Rennes*.

CHENG, V., NG, E. et GIVONI, B. (2005). Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. *Solar Energy*, 78(4):528–534.

CIBSE (2006). Environmental design guide a. *Chartered Institution of Building Services Engineers*.

COAKLEY, D., RAFTERY, P. et KEANE, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37:123–141.

COCH, H. (1998). Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2:67–87.

COFFMAN, C. V., DUFFIN, R. J. et KNOWLES, G. P. (1980). Are adobe walls optimal phase-shift filters ? *Advances in Applied Mathematics*, 1(1):50–66.

COMITÉ NATIONAL, H. I. (2015). Elaboration du rapport national habitat iii du burkina faso. Report, ONU-Habitat.

CRIPPA, M., OREGGIONI, G., GUIZZARDI, D., MUNTEAN, M., SCHAAF, E., LO VULLO, E., SOLAZZO, E., MONFORTI-FERRARIO, F., OLIVIER, J. et VIGNATI, E. (2019). Fossil co2 and ghg emissionsof all world countries. Report, European Commission.

CSTB, CRATERRE, ENTPE-FORMEQUIP, CHANVRE, C. e., ECOBÂTIR, R. et CAPEB (2011). Analyse des caractéristiques des systèmes constructifs non industrialisés. Report, CSTB.

DAÏAN, J.-F. (2013). Equilibre et transferts en milieux poreux. *PhD, Université Joseph Fourier Grenoble*.

DAO, K., OUEDRAOGO, M., MILLOGO, Y., AUBERT, J.-E. et GOMINA, M. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials*, 158:84–96.

DAOUAS, N. (2016). Impact of external longwave radiation on optimum insulation thickness in tunisian building roofs based on a dynamic analytical model. *Applied Energy*, 177:136–148.

DAOUAS, N., HASSEN, Z. et AISSIA, H. B. (2010). Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in tunisia. *Applied thermal engineering*, 30(4):319–326.

DAVIES, M. G. (1994). The thermal response of an enclosure to periodic excitation : the cibse approach. *Building and Environment*, 29(2):217–235.

DE DEAR, R. J., BRAGER, G. S., REARDON, J., NICOL, F. *et al.* (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference/discussion. *ASHRAE transactions*, 104:145.

DEB, C. et RAMACHANDRAIAH, A. (2010). Evaluation of thermal comfort in a rail terminal location in india. *Building and Environment*, 45(11):2571–2580.

DELGADO, M. C. J. et GUERRERO, I. C. n. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building : A normative review. *Construction and building materials*, 21(2):237–251.

DEMOSTHENOUS, D., MICHAEL, A. et PHILOKYPROU, M. (2016). Natural ventilation strategies for cooling purposes in the rural vernacular architecture of cyprus. *Renew Energy Power Qual J*, 14:526–530.

DENOUWE, D. D., MESSAN, A., FOURNELY, E., BOUCHAÏR, A. et TSOBNANG, F. (2015). Évaluation des caractéristiques mécaniques des connexions par entaille et barre d'acier ha filetée dans les poutres mixtes bois-béton. *In Rencontres Universitaires de Génie Civil*.

DERAMAUX, C. (2017). La terre crue au burkina faso : matériau d'expression architecturale. *Faculté d'Architecture de l'Université de Liège, Belgique*.

DIRECTIVE UE, U. E. (2010). Directive 2010/31. *UE du Parlement Européen et du Conseil du*, 19.

DIXIT, M. K., FERNÁNDEZ-SOLÍS, J. L., LAVY, S. et CULP, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement : A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8):1238–1247.

DJONGYANG, N., TCHINDA, R. et NJOMO, D. (2010). Thermal comfort : A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9):2626–2640.

DOBSON, S. (2015). Rammed earth in the modern world. *Rammed Earth Construction Cutting-Edge Research on Traditional and Modern Rammed Earth. Western Australia : D. Ciancio and C. Beckett*, pages 3–10.

DOHERTY, T. et ARENS, E. A. (1988). Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models. *ASHRAE Transactions 1988, Vol 94, Part 1*.

DONG, X., SOEBARTO, V. et GRIFFITH, M. (2014a). Achieving thermal comfort in naturally ventilated rammed earth houses. *Building and Environment*, 82:588–598.

DONG, X., SOEBARTO, V. et GRIFFITH, M. (2014b). Strategies for reducing heating and cooling loads of uninsulated rammed earth wall houses. *Energy and Buildings*, 77:323–331.

EBEN SALEH, M. (1990). Thermal insulation of buildings in a newly built environment of a hot dry climate : the saudi arabian experience. *International Journal of Ambient Energy*, 11(3):157–168.

EL FGAIER, F. (2013). Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue. *PhD, Ecole Centrale de Lille*.

ELNOKALY, A., AYOUB, M. et ELSERAGY, A. (2019). Parametric investigation of traditional vaulted roofs in hot-arid climates. *Renewable Energy*, 138:250–262.

ELSERAGY, A. A. (2004). Architectural and solar potential of curved and flat roofs in hot arid regions (with reference to egypt). *PhD, University of Nottingham*.

EN, B. (2007). 15251 : 2007. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.

ENESCU, D. (2017). A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79: 1353–1379.

EVRARD, A. (2008). Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials. *PhD, Université Catholique De Louvain*.

FANGER, P. (1988). *Fundamentals of thermal comfort*, pages 3056–3061. Elsevier.

FANGER, P. O. (1970a). Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*

FANGER, P. O. (1970b). Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*

FANGER, P. O. et TOFTUM, J. (2002). Extension of the pmv model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and buildings*, 34(6): 533–536.

FERNANDES, J., MATEUS, R., GERVÁSIO, H., SILVA, S. M. et BRAGANÇA, L. (2019). Passive strategies used in southern portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance. *Renewable Energy*, 142:345–363.

FOLKERS, A. S. et van BUITEN, B. A. (2019). *Popular Housing in Ouagadougou*, pages 82–116. Springer.

FOURNET, F. et AUDE, M.-N. (2013). *Ouagadougou (1850-2004) : une urbanisation différenciée*. IRD éditions.

FRONTCZAK, M. et WARGOCKI, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46(4):922–937.

GAGGE, A. P., FOBELETS, A. P. et BERGLUND, L. G. (1986). Standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92:709–731.

GAGGE, A. P. et NISHI, Y. (2010). Heat exchange between human skin surface and thermal environment. *Comprehensive Physiology*, pages 69–92.

GIVONI, B. (1969). Man, climate and architecture. *Elsevier ;()*.

GIVONI, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1):11–23.

GIVONI, B. (1994). *Passive low energy cooling of buildings*. John Wiley and Sons.

GONZÁLEZ-EGUINO, M. (2015). Energy poverty : An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47:377–385.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, J. R., JUÁREZ-ALVARADO, C. A., AYUB-FRANCIS, B. et MENDOZA-RANGEL, J. M. (2018). Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 163:179–188.

GUETTALA, A., ABIBSI, A. et HOUARI, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20:119–127.

GUILLAUD, H. (1995). *Compressed earth blocks : : a publication of Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE, a division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH in coordination with the Building Advisory Service and Information Network - BASIN. 2 : Manual of design and construction*. Vieweg, Braunschweig.

HABITAT, O. (2014). L'état des villes africaines 2014. réinventer la transition urbaine. *Kenya : ONU Habitat*.

HADAVAND, M., YAGHOUBI, M. et EMDAD, H. (2008). Thermal analysis of vaulted roofs. *Energy and Buildings*, 40(3):265–275.

HALAWA, E. et van HOOF, J. (2012). The adaptive approach to thermal comfort : A critical overview. *Energy and Buildings*, 51:101–110.

HALL, M. et ALLINSON, D. (2009a). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44:1935–1942.

HALL, M. et ALLINSON, D. (2009b). Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, 29(4):740–747.

HAMDY, M., CARLUCCI, S., HOES, P.-J. et HENSEN, J. L. (2017). The impact of climate change on the overheating risk in dwellings - a dutch case study. *Building and Environment*, 122:307–323.

HAVENITH, G., HEUS, R. et LOTENS, W. A. (1990). Clothing ventilation, vapour resistance and permeability index : changes due to posture, movement and wind. *Ergonomics*, 33(8):989–1005.

HAVENITH, G., HOLMÉR, I. et PARSONS, K. (2002). Personal factors in thermal comfort assessment : clothing properties and metabolic heat production. *Energy and Buildings*, 34(6):581–591.

HEATHCOTE, K. (2011). The thermal performance of earth buildings. *Informes de la Construccion-Revista*, 63(523):117.

HEMA, C., MESSAN, A., LAWANE, A. et VAN MOESEKE, G. (2020). Impact of the design of walls made of compressed earth blocks on the thermal comfort of housing in hot climate. *Buildings*, 10(9):157.

HEMA, C. M., VAN MOESEKE, G., EVRAD, A., COURARD, L. et MESSAN, A. (2017). Vernacular housing practices in burkina faso : representative models of construction in ouagadougou and walls hygrothermal efficiency. *Energy Procedia*, 122:535–540.

HENSEN, J. L. M. (1991). *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system*. Technische Universiteitt Eindhoven.

HERACLEOUS, C. et MICHAEL, A. (2018). Assessment of overheating risk and the impact of natural ventilation in educational buildings of southern europe under current and future climatic conditions. *Energy*, 165:1228–1239.

HERACLEOUS, C. et MICHAEL, A. (2020). Thermal comfort models and perception of users in free-running school buildings of east-mediterranean region. *Energy and Buildings*, page 109912.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, I., ÁLVAREZ, G., XAMÁN, J., ZAVALA-GUILLÉN, I., ARCE, J. et SIMÁ, E. (2014). Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components ?a review. *Energy and Buildings*, 80:81–105.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, I., XAMÁN, J., MACÍAS-MELO, E., AGUILAR-CASTRO, K., ZAVALA-GUILLÉN, I., HERNÁNDEZ-LÓPEZ, I. et SIMÁ, E. (2018). Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy and Buildings*, 158:569–579.

HOLOPAINEN, R., TUOMAALA, P., HERNANDEZ, P., HÄKKINEN, T., PIIRA, K. et PIIPPO, J. (2014). Comfort assessment in the context of sustainable buildings : Comparison of simplified and detailed human thermal sensation methods. *Building and Environment*, 71:60–70.

HOUBEN, H. et GUILLAUD, H. (1989). *Traité de construction en terre*. Editions Parenthèses.

HUBERMAN, N. et PEARLMUTTER, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the negev desert. *Energy and Buildings*, 40(5):837–848.

HUMPHREYS, M. (1978). Outdoor temperatures and comfort indoors. *Batiment International, Building Research and Practice*, 6(2):92–92.

IBRAHIM, B. (2014). Recensement général de la population et de l'habitat 2014, rapport d'éxécution et présentation des principaux résultats. Report, Institut National de la Statistique, Côte d'Ivoire.

INGERSOLL, J. (1988). Analytical determination of soil thermal conductivity and diffusivity. *Journal of solar energy engineering*, 110(4):306–312.

INS-NIGER (2012). Rapport sur les caractéristiques de l'habitat et le cadre de vie. Report, Institut national de la statistique, Niger.

INSD-BUKINA (2017). Tableau de bord social du burkina faso 2017. Report, Institut national de la statistique et de la démographie, Burkina Faso.

INSD-BUKINA (2019). Annuaire statistique 2018. Report, Institut national de la statistique et de la démographie (Burkina Faso).

ISO 7730, E. (2006). Ergonomie des ambiances thermiques : Détermination analytique et interprétation du confort thermique à l'aide de calculs des indices pmv et ppd et du confort thermique local. afnor. *Institut belge de normalisation*.

JANSSENS, A. et DE PAEPE, M. (2005). Effect of moisture inertia models on the predicted indoor humidity in a room. *Proceedings of the 26th AIVC conference, Brussels*, pages 287–94.

JAYASINGHE, C. et KAMALADASA, N. (2007). Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. *Construction and Building Materials*, 21:1971–1976.

JAZIZADEH, F., MARIN, F. M. et BECERIK-GERBER, B. (2013). A thermal preference scale for personalized comfort profile identification via participatory sensing. *Building and Environment*, 68:140–149.

JOSÉ VINAGRE DÍAZ, J., RICHARD WILBY, M. et BELÉN RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, A. (2013). Setting up ghg-based energy efficiency targets in buildings : The ecolabel. *Energy Policy*, 59:633–642.

KABORÉ, M. (2015). Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en afrique sub-saharienne. *PhD, Université Grenoble Alpes*.

KABORÉ, S. R. (2012). Normalisation et certification qualité des matériaux locaux au burkina faso : cas des blocs latéritiques taillés. *PhD, Ecole supérieure des travaux publics de Ouagadougou*.

KABRE, S., OUEDRAOGO, F., NAON, B., MESSAN, A., BENET, J. C. et ZOUGMORE, F. (2019). Évaluation des propriétés thermo-hydro-mécaniques des briques en terre compressée (btc) issues de la carrière de matourkou, au burkina faso. *Afrique SCIENCE*, 15(3):12–22.

KAMAL, M. A. (2012). An overview of passive cooling techniques in buildings : design concepts and architectural interventions. *Acta Technica Napocensis : Civil Engineering and Architecture*, 55(1):84–97.

KAMPELIS, N., GOBAKIS, K., VAGIAS, V., KOLOKOTSA, D., STANDARDI, L., ISIDORI, D., CRISTALLI, C., MONTAGNINO, F., PAREDES, F. et MURATORE, P. (2017). Evaluation of the performance gap in industrial, residential and tertiary near-zero energy buildings. *Energy and Buildings*, 148:58–73.

KEEFE, L. (2012). *Earth building : methods and materials, repair and conservation*. Routledge.

KIRIMTAT, A., KOYUNBABA, B. K., CHATZIKONSTANTINOU, I. et SARIYILDIZ, S. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:23–49.

KOLAITIS, D. I., MALLIOTAKIS, E., KONTOGEORGOS, D. A., MANDILARAS, I., KATSOURINIS, D. I. et FOUNTI, M. A. (2013). Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, 64:123–131.

KORDJAMSHIDI, M. (2011). *Thermal Comfort*, pages 31–51. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

KOSNY, J., PETRIE, T., GAWIN, D., CHILDS, P., DESJARLAIS, A. et CHRISTIAN, J. (2001). Thermal mass-energy savings potential in residential buildings. *Report no., Buildings Technology Center, ORNL*.

KOWOMA, D. (2014). Burkina faso : Valérie sanou/goungounga - «environ 3 500 logements sociaux et économiques sont déjà réalisés ». *Sidwaya quotidien*.

KÉRÉ, B. (1995). *Architecture et cultures constructives du Burkina Faso*. CRATerre-EAG.

KUMAR, A. et P SINGH, O. (2013). Advances in the building materials for thermal comfort and energy saving. *Recent Patents on Engineering*, 7(3): 220–232.

KÜNZEL, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. *One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart*.

KUZNIK, F. et VIRGONE, J. (2009). Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied energy*, 86(10):2038–2046.

LABAKI, L. C. et KOWALTOWSKI, D. C. (1998). Bioclimatic and vernacular design in urban settlements of brazil. *Building and Environment*, 33(1): 63–77.

LATHA, P. K., DARSHANA, Y. et VENUGOPAL, V. (2015). Role of building material in thermal comfort in tropical climates - a review. *Journal of Building Engineering*, 3:104–113.

LATIF, S., HAMZAH, B., RAHIM, R., MULYADI, R. et IDRUS, I. (2019). Computational study of the heat ventilation on the attics of buginese houses. *In 1st International Conference on Science and Technology, ICOST 2019*. European Alliance for Innovation (EAI).

LAWANE GANA, A. (2014). Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l'habitat en afrique. *PhD, Université du Havre et Fondation 2iE*.

LE QUÉRÉ, C., ANDRES, R. J., BODEN, T., CONWAY, T., HOUGHTON, R. A., HOUSE, J. I., MARLAND, G., PETERS, G. P., Van der WERF, G. et AHLSTRÖM, A. (2012). The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data Discussions*, 5(2):1107–1157.

LEBSIR, A. (2016). Les cultures constructives traditionnelles, cas des aurès, l'oued mya et le souf. *PhD, Université Mohamed Khider-Biskra*.

LIPING, W. et HIEN, W. N. (2007). The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in singapore. *Building and Environment*, 42(12):4006–4015.

LONG, L. et YE, H. (2016). The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials : a simulation study. *Scientific Reports*, 6:24181.

LUO, M., ZHOU, X., ZHU, Y. et SUNDELL, J. (2016a). Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate. *Energy and Buildings*, 118:152–159.

LUO, M., ZHOU, X., ZHU, Y. et SUNDELL, J. (2016b). Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate. *Energy and Buildings*, 118:152–159.

MANSOUR, M. B., JELIDI, A., CHERIF, A. S. et JABRALLAH, S. B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (ceb). *Construction and Building Materials*, 104:44–51.

MANSOURI, O., BELARBI, R. et BOURBIA, F. (2017). Albedo effect of external surfaces on the energy loads and thermal comfort in buildings. *Energy Procedia*, 139:571–577.

MANZANO-AGUGLIARO, F., MONTOYA, F. G., SABIO-ORTEGA, A. et GARCÍA-CRUZ, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49:736–755.

MAYER, E. (1993). Objective criteria for thermal comfort. *Building and Environment*, 28(4):399–403.

MEUKAM, P. (2004). Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments. *PhD, Université de Yaoundé I*.

MILLOGO, Y. et MOREL, J.-C. (2012). Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilised adobes. *Materials and Structures*, 45(9):1311–1318.

MOEVUS, M., FONTAINE, L., ANGER, R. et DOAT, P. (2013). Projet : Béton d'argile environnemental (bae). Report, CRAterre-ENSAG MATEIS-INSA DGCB-ENTPE.

MOHSEN, M. S. et AKASH, B. A. (2001). Some prospects of energy savings in buildings. *Energy conversion and management*, 42(11):1307–1315.

MORIARTY, P. (1979). The case for traditional housing in tropical africa. *Habitat International*, 4(3):285–290.

MOUSSA, S. H., NSHIMIYIMANA, P., HEMA, C., ZOUNGRANA, O., MESSAN, A. et COURARD, L. (2019). Comparative study of thermal comfort induced from masonry made of stabilized compressed earth block vs conventional cementitious material. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7(385-403):385–403.

MUINDE, M. S. (2013). An investigation into the issues influencing the use of interlocking stabilised soil blocks in kenya, a case study of siaya county. *School of Built Environment, University of Nairobi*.

NEMATCHOUA, M. K., RAMINOSOA, C. R., MAMIHARIJAONA, R., RENÉ, T., OROSA, J. A., ELVIS, W. et MEUKAM, P. (2015). Study of the economical and optimum thermal insulation thickness for buildings in a wet and hot tropical climate : Case of cameroon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50:1192–1202.

NEMATCHOUA, M. K., RICCIARDI, P., REITER, S. et YVON, A. (2017). A comparative study on optimum insulation thickness of walls and energy savings in equatorial and tropical climate. *International Journal of Sustainable Built Environment*.

NF ISO 13786, E. (2007). Thermal performance of building components - dynamic thermal characteristics - calculation methods. *AFNOR*.

NICOL, F. (2013). *The Limits of Thermal Comfort : Avoiding Overheating in European Buildings : CIBSE TM52, 2013*. Cibse.

NICOL, J. F., HACKER, J., SPIRES, B. et DAVIES, H. (2009). Suggestion for new approach to overheating diagnostics. *Building Research and Information*, 37(4):348–357.

NICOL, J. F. et HUMPHREYS, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings*, 34(6): 563–572.

NORMES-RÉGIONALES-AFRICAINES (1996). blocs de terre comprimée : normes. technologie n 11. cdi et craterre-eag. *ARS*, 674:47–50.

NSHIMIYIMANA, P. (2020). Effect of the type of clay earthen materials and substitution materials on the physico-mechanical properties and durability of compressed earth blocks. *PhD, Université de Liège*.

NSHIMIYIMANA, P., MESSAN, A. et COURARD, L. (2020). Physico-mechanical and hygro-thermal properties of compressed earth blocks stabilized with industrial and agro by-product binders. *Materials*, 13(17): 3769.

NSHIMIYIMANA, P., MESSAN, A., ZHAO, Z. et COURARD, L. (2019). Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 216:622–631.

OCDE/CSAO (2020). *Dynamiques de l'urbanisation africaine 2020 : Africapolis, une nouvelle géographie urbaine*. Cahiers de l'Afrique de l'Ouest, Paris.

OJO, O. et LAWAL, A. (2011). Assessment of thermal performance of residential buildings in ibadan land, nigeria. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2(4):581–586.

OLGYAY, V. (1969). Design with climate princeton university press. *Princeton, new jersey*.

OLOTUAH, A. O. (2002). Recourse to earth for low-cost housing in nigeria. *Building and Environment*, 37(1):123–129.

ORAVA, J., NUUTILA, P., LIDELL, M. E., OIKONEN, V., NOPONEN, T., VILJANEN, T., SCHEININ, M., TAITTONEN, M., NIEMI, T. et ENERBÄCK, S. (2011). Different metabolic responses of human brown adipose tissue to activation by cold and insulin. *Cell metabolism*, 14(2):272–279.

OUATTARA, A. et SOMÉ, L. (2006). La croissance urbaine au burkina faso. *Rapport d'analyse des données du RGPH-2006*.

OUÉDRAOGO, E. (2015). Détermination des données climatiques de bases et caractérisation des blocs de terre comprimée pour l'étude du confort thermique dans le bâtiment en climat tropical sec. *PhD, Université de Ouagadougou*.

OUEDRAOGO, B., LEVERMORE, G. et PARKINSON, J. (2012). Future energy demand for public buildings in the context of climate change for burkina faso. *Building and Environment*, 49:270–282.

OUEDRAOGO, E., COULIBALY, O., OUEDRAOGO, A. et MESSAN, A. (2015a). Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2:68–76.

OUEDRAOGO, E., COULIBALY, O., OUEDRAOGO, A. et MESSAN, A. (2015b). Mechanical and thermophysical properties of cement and/or paper (cellulose) stabilized compressed clay bricks. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2(2):68–76.

OZEL, M. (2014). Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness. *Energy and Buildings*, 72:288–295.

PATHAN, A., MAVROGIANNI, A., SUMMERFIELD, A., ORESZCZYN, T. et DAVIES, M. (2017). Monitoring summer indoor overheating in the london housing stock. *Energy and Buildings*, 141:361–378.

PAULUS, J. (2015). Construction en terre crue : disposition qualitatives, constructives et architecturales - application à un cas pratique : Ouagadougou. *Master, Université de Liège*.

PERSSON, S. (2014). Indigenous materials in modern buildings : for low energy houses in west africa. *PhD, Uppsala Universitet*.

Premier ministère du BURKINA, F. (2016). Plan national de développement économique et social (pndes). Report, Premier ministère.

PÉREZ-LOMBARD, L., ORTIZ, J. et POUT, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3):394–398.

REAGAN, J. A. et ACKLAM, D. (1979). Solar reflectivity of common building materials and its influence on the roof heat gain of typical southwestern usa residences. *Energy and Buildings*, 2(3):237–248.

RÖHLEN, U., ZIEGERT, C. et MOCHEL, A. (2013). *Construire en terre crue : construction, rénovation, finitions*. Le Moniteur.

RINCÓN, L., CARROBÉ, A., MARTORELL, I. et MEDRANO, M. (2019). Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-saharan africa with passive design. *Journal of Building Engineering*, page 100732.

RODRIGUEZ, C. M. et D'ALESSANDRO, M. (2019). Indoor thermal comfort review : The tropics as the next frontier. *Urban Climate*, 29:100488.

ROJAS, J., BARRIOS, G., HUELSZ, G., TOVAR, R. et JALIFE-LOZANO, S. (2016). Thermal performance of two envelope systems : Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations. *Journal of Building Physics*, 39(5):452–460.

SADINENI, S. B., MADALA, S. et BOEHM, R. F. (2011a). Passive building energy savings : A review of building envelope components. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(8):3617–3631.

SADINENI, S. B., MADALA, S. et BOEHM, R. F. (2011b). Passive building energy savings : A review of building envelope components. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(8):3617–3631.

SAMBOU, V. (2008). Transferts thermiques instationnaires : vers une optimisation de parois de bâtiments. *PhD, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier*.

SAMUEL, D. L., NAGENDRA, S. S. et MAIYA, M. (2013). Passive alternatives to mechanical air conditioning of building : A review. *Building and Environment*, 66:54–64.

SANGAM, B. S. (2019). Impact des systèmes de parois multicouches masse et résistance thermique à base de brique de terre comprimée sur le confort thermique de l'habitat en climat chaud. *Master, Institut 2iE*.

SANJAY, M. et CHAND, P. (2008). Passive cooling techniques of buildings : past and present ?a review. *Ariser*, 4(1):37–46.

SARTORI, I. et HESTNES, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings : A review article. *Energy and buildings*, 39(3):249–257.

SAYIGH, A. et MARAFIA, A. H. (1998). -thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(1-2):3–24.

SCHROEDER, H. (2016). *Sustainable building with earth*. Springer.

SERRANO, S., de GRACIA, A. et CABEZA, L. F. (2016). Adaptation of rammed earth to modern construction systems : Comparative study of thermal behavior under summer conditions. *Applied Energy*, 175:180–188.

SILVA, A. S., GHISI, E. et LAMBERTS, R. (2016). Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ashrae standard 55. *Building and Environment*, 102:95–115.

SINGH, M. K., MAHAPATRA, S. et ATREYA, S. K. (2010). Thermal performance study and evaluation of comfort temperatures in vernacular buildings of north-east india. *Building and Environment*, 45(2):320–329.

SOARES, N., BASTOS, J., PEREIRA, L. D., SOARES, A., AMARAL, A. R., ASADI, E., RODRIGUES, E., LAMAS, F. B., MONTEIRO, H., LOPES, M. A. R. et GASPAR, A. R. (2017). A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77:845–860.

SORE, S. O., MESSAN, A., PRUD'HOMME, E., ESCADEILLAS, G. et TSOBNANG, F. (2018). Stabilization of compressed earth blocks (cebs) by geopolymer binder based on local materials from burkina faso. *Construction and Building Materials*, 165:333–345.

SOUDANI, L., FABBRI, A., MOREL, J.-C., WOLOSZYN, M., CHABRIAC, P.-A., WONG, H. et GRILLET, A.-C. (2016). Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials. *Energy and Buildings*, 116:498–511.

TAYLOR, P., FULLER, R. et LUTHER, M. (2008). Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and buildings*, 40(5): 793–800.

TOGUYENI, D. Y., COULIBALY, O., OUEDRAOGO, A., KOULIDIATI, J., DUTIL, Y. et ROUSSE, D. (2012). Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw. *Energy and Buildings*, 50:74–80.

TSILINGIRIS, P. (2006a). The influence of heat capacity and its spatial distribution on the transient wall thermal behavior under the effect of harmoni-

cally time-varying driving forces. *Building and environment*, 41(5):590–601.

TSILINGIRIS, P. (2006b). Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures. *Energy and Buildings*, 38(10):1200–1211.

UEMOA (2009). Décision n°06/2009/cm/uemoa portant adoption de la stratégie de l'uemoa dénommée "initiative régionale pour l'energie durable" (ired). *UEMOA*.

VALLÉE, J., FOURNET, F., MEYER, P.-E., HARANG, M., PIROT, F. et SALEM, G. (2006). Stratification de la ville de ouagadougou (burkina faso) à partir d'une image panchromatique spot 5 : Une première étape à la mise en place d'une enquête de santé. *Espace populations sociétés*, pages 393–401.

VERBEKE, S. et AUDENAERT, A. (2018). Thermal inertia in buildings : A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:2300–2318.

VINIMA, T. et TIÉBLÉ, D. (2012). 4ème recensement général de la population et de l'habitat au mali (rgph-2009), analyse des résultats définitifs. Report, Institut national de la statistique (Mali).

WILLIAMSON, T. et DANIEL, L. (2019). A new adaptive thermal comfort model for homes in temperate climates of australia. *Energy and Buildings*, page 109728.

WYSS, U. (2005). La construction en matériaux locaux : état d'un secteur à potentiel multiple. Report, Direction du développement et de la coopération Suisse.

YANG, L., YAN, H. et LAM, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - a review. *Applied Energy*, 115:164–173.

YANG, W. et MOON, H. J. (2019). Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Building and Environment*, 148:623–633.

YAO, R., LI, B. et LIU, J. (2009). A theoretical adaptive model of thermal comfort - adaptive predicted mean vote (apmv). *Building and Environment*, 44(10):2089–2096.

ZABALZA BRIBIÁN, I., VALERO CAPILLA, A. et ARANDA USÓN, A. (2011). Life cycle assessment of building materials : Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5):1133–1140.