
Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Conception d'archétypes d'habitat bioclimatique en briques de terre comprimée à Ouagadougou au Burkina Faso

Auteur : Hervier, Marie

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20430>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

—

Conception d'archétypes d'habitat bioclimatique en briques de terre comprimée à Ouagadougou au Burkina Faso

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du
grade de master Ingénieur Civil Architecte par
Marie Hervier

Promoteur: Prof. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury: Luc Courard, Adamah Messan,
Julie Neuwels

Année académique 2023-2024

Abstract

Ouagadougou is facing a high demand for housing, combined with significant urban expansion. The construction of multi-storey compressed earth brick (CEB) buildings offers a sustainable and resilient solution to these problems. Despite these advantages, CEB is often associated with low-quality construction. The local population prefers materials associated with Western-inspired architecture, unsuited to local climatic conditions. Promoting the use of CEB in high-standard bioclimatic architecture could improve living conditions while exploiting local resources.

Following an analysis of the local context, three bioclimatic habitat archetypes were designed in collaboration with experts in raw earth architecture from Burkina Faso. The structural and thermal performances of these habitats are evaluated using simulations.

Three archetypes of bioclimatic housing in CEB are designed: a five-storey apartment building, a three-storey apartment building and a two-storey villa. Recommendations are made for the construction of CEB in load-bearing walls on several levels. When it comes to thermal comfort, apartment buildings perform considerably better than villas. A degree-hour difference of almost 60% is observed between these two building types. The construction of a three-storey apartment building seems to be the solution best suited to the current problems of Ouagadougou, providing good thermal comfort while allowing the densification of the built environment with low environmental impact CEB.

The results of this study are improving the knowledge on the construction of multi-storey buildings using CEB and on thermal comfort in tropical climates. They will also serve as references for building industry professionals and local populations, encouraging the spread of this technology. This study demonstrates the advantages of multi-storey apartment buildings in CEB, encouraging owners, developers and public authorities to undertake and support such projects to develop sustainable housing.

Keywords

Terre crue, passive cooling, sustainable building, thermal comfort, design solution, simulation

Résumé

Tout comme de nombreux pays de l'Afrique de l'Ouest, le Burkina Faso connaît un fort accroissement de sa population urbaine. Aujourd'hui, 31% des burkinabé vivent en milieu urbain, mais les projections prévoient qu'ils dépassent 60% en 2050. A Ouagadougou, la capitale, cette urbanisation accélérée entraîne la construction d'habitats informels de bas standing accompagnée d'un étalement urbain important. La construction de bâtiments en briques de terre comprimée (BTC) sur plusieurs étages offre une solution durable et résiliente à ces problématiques. Malgré ces avantages, le BTC est peu apprécié et souvent associé à des constructions de faible qualité. La population locale préfère des matériaux associés à une architecture d'inspiration occidentale, inadaptés aux conditions climatiques locales. Promouvoir l'utilisation du BTC dans une architecture bioclimatique de haut standing pourrait améliorer les conditions de vie tout en exploitant les ressources locales.

Ouagadougou, située dans la zone soudano-sahélienne, connaît un climat tropical chaud. Il est marqué par une saison sèche avec des températures pouvant atteindre 41°C et une saison des pluies caractérisée par une humidité importante. L'intégration de stratégies bioclimatiques dans la conception des habitations permet d'adapter les constructions à cet environnement, améliorant ainsi le confort thermique. Des études ont déjà démontré l'efficacité de ces stratégies au Burkina Faso. Cependant, ces recherches, utilisant des cas d'étude simplifiées ou des stratégies de simplification, négligent les aspects structurels, urbains et socioculturels.

L'intégration de ces aspects est pourtant primordiale. En effet, l'architecture des habitations est un marqueur social important au Burkina Faso. Les logements inspirés de l'esthétisme occidental sont perçus comme un signe de réussite sociale. En conséquence, la brique de terre crue, jugée fragile et associée à une esthétique traditionnelle, est progressivement rejetée.

Cependant, grâce à l'amélioration des techniques de stabilisation, les briques de terre BTC sont désormais plus résistantes et durables. Elles permettent la réalisation de murs porteurs pour des bâtiments de plusieurs étages. Cependant, le manque de documentation sur le dimensionnement et la mise en œuvre de telles structures freine leur adoption.

Cette étude vise à combler ces lacunes en évaluant les performances thermiques et mécaniques des habitations en BTC, tout en intégrant les considérations architecturales et socioculturelles spécifiques de Ouagadougou.

La méthodologie s'articule en plusieurs étapes. Tout d'abord, une collecte et une analyse du contexte Ouagalais sont réalisées afin d'éclairer la conception. Par la suite, des prototypes d'habitats bioclimatiques sont développés avec l'aide d'experts en architecture de terre crue burkinabé. Une fois validés, les archétypes sont documentés aboutissant à la production de plans, de coupes, de perspectives et de maquettes numériques. Enfin, la validation structurelle est effectuée à l'aide de simulations par éléments finis, suivie d'une évaluation du confort thermique grâce à des simulations sur le logiciel EnergyPlus.

Ce travail fait état de la conception de trois archétypes d'habitat bioclimatique à Ouagadougou : un immeuble à appartements de cinq étages, un autre de trois étages et une villa sur deux niveaux. Les performances requises pour la résistance en compression des BTC varient selon les bâtiments : 11 MPa pour le bâtiment de cinq

étages, 5,4 MPa pour celui de trois étages, et 1,7 MPa pour la villa. A partir de 7MPa, les BTC nécessitent une stabilisation au ciment, augmentant ainsi leur impact environnemental. Les BTC doivent être associées à un mortier de terre ayant le même stabilisant et une résistance similaire.

Pour la mise en œuvre de murs porteurs en BTC sur plusieurs étages, l'intégration de chaînages horizontaux est essentielle pour limiter les phénomènes de flambement. Des chaînages verticaux et des raidisseurs reliés aux chaînages horizontaux sont également recommandés pour renforcer la stabilité structurelle. Afin de prévenir les fissurations dues à la dilatation thermique des BTC, il est nécessaire de prévoir un joint creux continu sur toute la hauteur du mur, avec des fentes de 1 à 2 millimètres tous les 5 mètres, généralement placées au nu des ouvertures.

En termes de confort thermique, les immeubles à appartements sont considérablement plus performants que la villa. Une différence de degrés-heures de presque 60% est observée entre ces deux types de bâtiment. Pour tous les archétypes, l'ajout d'un brasseur d'air augmente significativement le confort thermique. Une réduction moyenne de 69% des degrés-heures d'inconfort est observé. L'immeuble à appartements de trois étages est le plus confortable, avec seulement 636 degrés-heures d'inconfort lorsqu'un brasseur d'air est utilisé. Cette solution semble être la plus adaptée aux problématiques actuelles de Ouagadougou, garantissant un bon confort thermique tout en permettant de densifier le bâti avec des BTC à faible impact environnemental.

Les résultats de cette étude participent à améliorer les connaissances liées à la construction de bâtiments en BTC sur plusieurs niveaux et à l'amélioration du confort thermique en climat tropical. Ils constituent des références pour les professionnels du secteur immobilier et les populations locales, favorisant ainsi la diffusion de cette technologie. Cette étude démontre les avantages de la construction d'immeubles à appartements en BTC, encourageant maîtres d'ouvrage, promoteurs et pouvoirs publics à entreprendre et à soutenir de tels projets.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers plusieurs personnes qui m'ont aidées dans la réalisation de mon mémoire.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon promoteur, **Shady Attia**, professeur à l'Université de Liège pour ses conseils éclairés et son suivi attentif tout au long de mon travail de recherche. Sa capacité à prendre du recul et à orienter judicieusement mes efforts a été d'une aide précieuse.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères aux doctorants **Claudia Malgoubri** et **Simon-Pierre Joy Salassi** pour leur précieuse aide dans la réalisation de cette étude. Leur disponibilité et le temps qu'ils ont généreusement consacré à répondre à mes questions et à partager leurs connaissances ont grandement enrichi mon travail.

Je tiens à remercier **Christian Belinga Nko'o** pour l'entretien qu'il m'a accordé, qui a contribué à éclairer ma recherche.

Je saisis également cette occasion pour exprimer ma reconnaissance envers **les membres du SBD Lab** pour leurs relectures attentives et leurs conseils pertinents lors de la rédaction de mon TFE.

Je remercie les membres de mon jury, **Luc Courard**, **Adamah Messan** et **Julie Newels**, pour l'attention portée à mes recherches.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers **ma famille** et **mon conjoint** pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de mon parcours académique.

Enfin, un grand merci à mes colocataires, **Loren et Thibault**, pour leur aide précieuse et leur présence constante.

Sommaire

Abstract	3
Résumé	4
Remerciements	7
Sommaire	9
Liste des figures	12
Liste des tableaux	13
Abréviations	14
1 Introduction	15
1.1 <i>Contexte</i>	15
1.2 <i>Problématique</i>	16
1.3 <i>Pertinence du sujet de recherche</i>	17
1.4 <i>Objectifs de la recherche</i>	18
1.5 <i>Questions de recherche</i>	19
1.6 <i>Structure de l'étude</i>	20
2 Etat de l'art	21
2.1 <i>Contexte de Ouagadougou</i>	21
2.1.1 <i>Climat</i>	21
2.1.2 <i>Contexte social et urbain</i>	23
2.1.3 <i>Contexte architectural</i>	24
2.2 <i>Concepts et définitions</i>	27
2.2.1 <i>Brique de terre comprimé</i>	27
2.2.2 <i>Confort thermique</i>	30
2.2.3 <i>Conception bioclimatique</i>	33
2.3 <i>Etudes similaires et gap scientifique</i>	36
3 Méthodologie	39
3.1 <i>Description des méthodes de recherche</i>	39
3.2 <i>Cadre de l'étude</i>	39
3.2.1 <i>Récolte de donnée</i>	39
3.2.2 <i>Traitement des données</i>	40
3.2.3 <i>Développement d'un instrument</i>	40
3.2.4 <i>Validation</i>	40
3.3 <i>Variables et indicateurs</i>	41
3.3.1 <i>Performance structurelle</i>	41
3.3.2 <i>Performance thermique</i>	43

3.4	<i>Collecte de données</i>	45
3.4.1	Caractéristiques des BTC	45
3.4.2	Climat.....	45
3.4.3	Contextes sociaux culturels et références architecturales	45
3.5	<i>Analyse de données</i>	46
3.6	<i>Hypothèses de l'étude</i>	47
3.7	<i>Critères de qualité</i>	49
4	Les archétypes	51
4.1	<i>Introduction</i>	51
4.2	<i>Archétype 1</i>	51
4.3	<i>Archétype 2</i>	58
4.4	<i>Archétype 3</i>	62
4.5	<i>Conclusion</i>	68
5	Evaluation de la structure	70
5.1	<i>Introduction</i>	70
5.2	<i>Les briques de terre comprimée</i>	70
5.3	<i>Résistance à la compression</i>	72
5.4	<i>Mortier</i>	77
5.5	<i>Flambement</i>	78
5.6	<i>Joint de dilatation</i>	79
5.7	<i>Conclusion</i>	83
6	Evaluation du confort thermique	84
6.1	<i>Introduction</i>	84
6.2	<i>Archétype 1</i>	84
6.3	<i>Archétype 2</i>	88
6.4	<i>Archétype 3</i>	91
6.5	<i>Conclusion</i>	94
7	Discussion	96
7.1	<i>Rappel des objectifs de l'étude</i>	96
7.2	<i>Découvertes clés</i>	96
7.3	<i>Recommandations</i>	99
7.4	<i>Forces et limitations</i>	101
7.5	<i>Impact sur les pratiques futures</i>	102
7.6	<i>Futurs travaux de recherche</i>	103

8	Conclusions	104
9	Références	106
	Annexe 1 – Focus group et entretien.....	111
	Annexe 2 – Analyse du climat par le diagramme de Givoni.....	115
	Annexe 3 - Simulation structurelle	116
	Annexe 4 – Simulation thermique	119
	Annexe 5 – Tableurs de traitement des données.....	122
	Annexe 6 – SBD Lab poster	123

Liste des figures

Figure 1-1: Objectifs de développement durable des Nations Unies appliqués à l'étude (Nations Unies, 2023).....	18
Figure 1-2 : Quad Chart	19
Figure 2-1 : Classification climatique de Köppen-Geiger (Kotttek et al., 2006)	21
Figure 2-2 : Analyse des températures du fichier TMY (Kaboré, 2015).....	22
Figure 2-3 : Analyse de l'humidité relative du fichier TMY (Kaboré, 2015).....	23
Figure 2-4 : Rose des vents de Ouagadougou du fichier TMY (Kaboré, 2015)	23
Figure 2-5 : Adaptation de l'habitat à la parcelle urbaine (Folkers & van Buiten, 2019).....	24
Figure 2-6 : Photographies aérienne de Ouagadougou en 1931 et 2007(Folkers & van Buiten, 2019).....	25
Figure 2-7 : Habitat traditionnel (Africa vernacular architecture, 2024) et moderne	25
Figure 2-8: Logement de haut standing	27
Figure 2-9 : Logement de bon standing	27
Figure 2-10 : Logement de moyen standing	27
Figure 2-11 : Logement de bas standing	27
Figure 2-12 : Techniques de mise en œuvre de la terre crue : 1-le pisé, 2-la bauge, 3-l'adobe (Dejeant et al., 2021)....	28
Figure 2-13 : Etape de production des BTC.....	28
Figure 2-14 : Centre Diapalante, Saint Louis, Sénégal (Dejeant & Joffroy, 2021)	29
Figure 2-15 : Commission Justice et Paix, Ougadougou, Burkina Faso (Dejeant & Joffroy, 2021)	29
Figure 2-16 : Logements SIM, Mayotte (Dejeant & Joffroy, 2021)	29
Figure 2-17 : Echanges thermiques et facteurs du confort thermique.....	31
Figure 2-18 : PPD en fonction du PMV (ASHRAE, 2020)	32
Figure 2-19 : Température opérative de confort en fonction de la température moyenne extérieure (ASHRAE, 2020)	33
Figure 2-20 : Stratégies bioclimatiques de confort en zone tropicale (Joffroy et al., 2017)	34
Figure 2-21 : Projection stéréographique de la trajectoire du soleil à Ouagadougou	34
Figure 2-22 : Diagramme de Givoni adapté par (Manzano-Agugliaro et al., 2015).....	36
Figure 3-1 : Cadre de l'étude	41
Figure 4-1: Perspective de l'Archétype 1	51
Figure 4-2 : Plan du R0 de l'Archétype 1.....	53
Figure 4-3 : Plan des étages de l'Archétype 1.....	54
Figure 4-4 : Ombres portées en avril à 15h30 sans pare-soleil et à 17h avec des brise-soleil	55
Figure 4-5 : Coupe AA de l'Archétype 1.....	56
Figure 4-6: Perspective de l'Archétype 2	58
Figure 4-7 : Plan du R0 de l'Archétype 2.....	59
Figure 4-8 : Plan des étages de l'Archétype 2.....	60
Figure 4-9 : Coupe BB de l'Archétype 2	61
Figure 4-10: Perspective de l'Archétype 3	62
Figure 4-11 : Plan du R0 de l'Archétype 3.....	63
Figure 4-12 : Plan du R+1 de l'Archétype 3.....	64
Figure 4-13 : Volet pliant en persienne utilisé par Kéré (Kéré Architecture, 2024b)	65
Figure 4-14 : Coupe CC de l'Archétype 3.....	66
Figure 4-15 : Détail technique d'un mur porteur en BTC	67

Figure 5-1 : Type de parois en BTC (ART.TERRE Mayotte, 2018).....	71
Figure 5-2 : Contrainte en compression de l'Archétype 1.....	73
Figure 5-3 : Contrainte en compression dans les murs du R+1 de l'Archétype 1.....	74
Figure 5-4 : Contrainte en compression dans les murs du R+1 de l'Archétype 2.....	74
Figure 5-5 : Contrainte en compression de l'Archétype 3.....	75
Figure 5-6 : Contrainte en compression dans les murs du R+1 de l'Archétype 3.....	75
Figure 5-7 : Bâtiment en BTC réalisé par Kéré présentant un joint de dilatation (Kéré Architecture, 2024b).....	79
Figure 5-8 : Bâtiment réalisé par Kéré présentant des joints de dilatation (Kéré Architecture, 2024b).....	80
Figure 5-9 : Plan des étages avec joint de dilatation de l'Archétype 1 et 2.....	81
Figure 5-10 : Plan du R0 avec joint de dilatation de l'Archétype 3.....	82
Figure 5-11 : Plan du R+1 avec joint de dilatation de l'Archétype 3.....	82
Figure 6-1 : Seuils de confort adaptatif d'après la norme EN 16798 (2019) pour l'Archétype 1.....	85
Figure 6-2 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) pour l'Archétype 1.....	86
Figure 6-3 : Confort thermique adaptatif pour une vitesse d'air de 1,2 m/s EN 16798 (2019).....	86
Figure 6-4 : Degrés heures par scénario pour l'Archétype 1.....	87
Figure 6-5 : Seuils de confort adaptatif d'après la norme EN 16798 (2019) pour l'Archétype 2.....	88
Figure 6-6 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) pour l'Archétype 2.....	89
Figure 6-7 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) à une vitesse d'air de 1.2 m/s pour l'Archétype 2.....	89
Figure 6-8 : Degrés heures par scénario pour l'Archétype 2.....	90
Figure 6-9 : Seuils de confort adaptatif d'après la norme EN 16798 (2019) pour l'Archétype 3.....	91
Figure 6-10 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) pour l'Archétype 3.....	92
Figure 6-11 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) à une vitesse d'air de 1.2 m/s pour l'Archétype 3.....	92
Figure 6-12 : Degrés-heures par scénario pour l'Archétype 3.....	94
Figure 6-13 : Degrés-heures annuels pour les trois Archétypes.....	95
Figure 10-1: Diagramme de Givoni adapté par Lenoir et al (2012).....	115
Figure 10-1 : Modèle numérique des archétypes.....	119
Figure 10-2 : Caractéristiques des stores.....	120
Figure 10-3 : Plannings d'occupation et d'éclairage.....	121

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Synthèse des typologies de logement à Ouagadougou (Séré, 2020).....	26
Tableau 2-2 : Synthèse des études similaires.....	38
Tableau 3-1 : Température corrective.....	44
Tableau 3-2 : Tableau récapitulatif des variables et indicateurs.....	44
Tableau 4-1 : Propriétés des matériaux utilisés.....	57
Tableau 4-2 : Caractéristiques des archétypes.....	69
Tableau 5-1 : Caractéristiques principales des BTC.....	72
Tableau 5-2 : Résistance et contrainte en compression des BTC, mortiers et de la maçonnerie pour chacun des archétypes.....	76
Tableau 5-3 : Matrice de sélection des mélanges de conception (stabilisants ajoutés à la terre) sur la base des propriétés requises pour les BTC stabilisés (Nshimiyimana, 2020).....	76

Tableau 6-1 : Evaluation du confort thermique de l'Archétype 1	87
Tableau 6-2 : évaluation du confort thermique de l'Archétype 2	90
Tableau 6-3 : Evaluation du confort thermique de l'Archétype 3	93
Tableau 6-4 : synthèse de l'évaluation du confort thermique	94
Tableau 10-1 : Paramètres de la maçonnerie	117
Tableau 10-2: Paramètres du béton selon l'EC2	117
Tableau 10-3: Valeurs des charges considérées.....	118
Tableau 10-1 : Caractéristiques des vitrages	119
Tableau 10-2 : Caractéristiques de l'éclairage	121

Abréviations

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BTC	Brique de terre comprimée
CEB	Compressed earth brick
DH	Degrés-heures
UEMOA	Union économique et monétaire ouest-africaine

1 Introduction

1.1 Contexte

L'Afrique de l'Ouest, dont fait partie le Burkina Faso est l'une des régions du monde où le taux d'accroissement de la population, le rythme d'urbanisation et le niveau de pauvreté sont les plus élevés. D'après les prévisions, cette tendance ne fera qu'augmenter dans les prochaines années. Actuellement, la fraction de la population urbaine est de 31% au Burkina Faso, mais les projections prévoient qu'elle dépasse les 60% en 2050 (Wyss, 2005). La migration des populations rurales vers les grandes villes engendre la création précipitée d'habitat de faible qualité. En Afrique subsaharienne, 71,8% des habitants vivent dans des bidonvilles (Thys, 2019). Face au coût élevé des matériaux de construction, la population burkinabé peine à accéder à un logement durable. En effet, seulement 26.8% des habitations sont « en dur » (INSD, 2022).

La faible qualité de l'habitat au Burkina Faso est due à une inadéquation des constructions d'influence internationale réalisées avec des matériaux d'importation bon marché comme le parpaing et la tôle avec le climat local et les effets du changement climatique. En effet, le Burkina Faso fait face à des conditions climatiques extrêmes avec des épisodes d'orages violents et des périodes très chaudes qui provoquent d'importantes surchauffes dans ces bâtiments (Hema, 2020). De plus, l'utilisation d'appareils de climatisation n'est pas viable face à la fiabilité du réseau électrique et aggraverait le stress sur ce dernier, augmentant le risque de coupure de courant. Par conséquent, les populations sont exposées à des conditions de vie difficiles entraînant des effets sur la santé publique. Par ailleurs, l'importation de matériaux ne favorise pas la résilience et l'indépendance financière des filières de construction burkinabé.

Depuis les années 2000, la terre crue profite d'un regain d'intérêt. En effet, ce matériau cumule un certain nombre d'avantages. En plus d'être largement disponible localement, peu coûteux, écologique et d'avoir une très bonne inertie thermique, il permet d'encourager l'économie locale, de créer des emplois, de valoriser le savoir-faire ancestral et le patrimoine. Des évolutions récentes ont permis d'améliorer les techniques ancestrales et d'en faire un matériau résistant et durable. Les briques de terre compressée (BTC) en sont un bon exemple. Le compactage mécanique permet de réduire la porosité de la terre ce qui diminue ainsi sa sensibilité à l'eau et augmente sa résistance à la compression (P'Kla, 2002). Certains architectes burkinabés comme D. F. Kéré (Kéré Architecture, 2024b), reconnu mondialement pour son travail, ont utilisé le BTC dans plusieurs de leurs bâtiments. Mais des freins empêchent cette technique constructive de se répandre au Burkina Faso. Notamment, la BTC est perçue par la population comme un matériau de moindre qualité. De plus, les filières locales sont peu valorisées et souffrent d'un manque de main d'œuvre qualifiée.

Face à ces problématiques, le projet HABIMO (vers un habitat bioclimatique et modulable en terre crue améliorée à Ouagadougou) est lancé en septembre 2023 en collaboration avec le ministère de l'Habitat burkinabé, l'ONG Autre Terre et La Fabrique (incubateur), le guichet technologique du 2iE et les universités Thomas Sankara au Burkina Faso et de Liège en Belgique. Cette initiative vise à promouvoir la réappropriation de l'habitat traditionnel en terre par la population locale, en particulier les ménages à revenus moyens.

À la suite du Projet de recherche pour le développement “Amélioration de la qualité de l’habitat en briques de terre crue au Burkina Faso”, il a été montré que des freins socio-économiques empêchent la diffusion de mode constructif en terre crue, mais que ceux-ci pourraient être surpassés grâce à la conception d’habitats témoins et au développement de la filière. C’est pourquoi, le projet propose de travailler sur l’étude des conditions de réussite technique et socio-économique de la filière pour produire, commercialiser et construire ce type d’habitat au Burkina Faso.

1.2 Problématique

Ouagadougou est la capitale du Burkina Faso, mais également son principal centre économique, culturel et administratif. En 2019, la ville comptait plus de 2,4 millions d’habitants sur une superficie de 518 km², avec une densité de population de 4 385,5 habitants par km². Cette densité est relativement faible pour une capitale de l’Afrique de l’Ouest. A titre de comparaison, Kinshasa, la capitale de la République démocratique du Congo, atteint une densité de 28 387 habitants par km², soit environ sept fois plus. De fait, bien qu’elle soit la ville la plus densément peuplée du Burkina Faso, Ouagadougou fait face à un fort étalement urbain. Les habitations sont majoritairement construites de plain-pied et seulement 1.3% des habitations sont des immeubles à appartements (INSD, 2022). De plus, la spéculation foncière pousse les populations à faibles revenus à s’installer toujours plus en périphérie. Cet étalement provoque, en plus de l’artificialisation des terres, des problèmes d’accès aux équipements publics, et rend difficile la mobilité. Pour éviter d’engendrer ces problèmes, les politiques urbaines encouragent à construire plus en hauteur et ainsi à densifier le bâti.

Les briques de terre crue, traditionnellement utilisées par les populations locales pour la construction des habitations ne permettent pas de réaliser des bâtiments sur plusieurs étages. En effet, sans stabilisation, ses propriétés mécaniques comme la résistance à la compression, la sensibilité à l’eau et la durabilité sont faibles, ce qui lui vaut une mauvaise réputation auprès de la population burkinabé. Néanmoins, des avancées technologiques ont permis de résoudre les faiblesses de la terre crue. En particulier, les briques de terre comprimée (BTC) bénéficient d’une stabilisation mécanique favorisant une plus grande densité. Le pressage mécanique de la terre permet une réduction de la porosité du matériau ce qui diminue sa sensibilité à l’eau (P’Kla, 2002). De plus, de récentes découvertes scientifiques ont démontré que l’ajout de liants alternatifs améliore significativement le comportement mécanique des BTC (Nshimiyimana, 2020). Cela en fait un matériau fiable et durable pour la construction d’immeubles de plusieurs étages.

Cependant, la population burkinabé reste réticente à la construction en BTC. Souvent associée aux constructions de bas standing, la terre crue hérite d’une mauvaise image surtout chez les ménages de revenus moyens qui perçoivent le BTC comme « le matériau du pauvre ». Ces populations lui préfèrent des techniques constructives d’influence internationale utilisant des matériaux importés comme le béton et la tôle reflétant une architecture qualifiée de moderne (Zougrana, 2021).

Or, ces constructions ne sont pas adaptées aux conditions climatiques burkinabés, caractérisées par des épisodes de pluies violentes et de fortes chaleurs. Ce qui occasionne d’importantes surchauffes dans les habitations et engendre des conditions de vie insalubre. De plus, les technologies de climatisation ne sont pas fiables,

notamment à cause des fréquentes coupures de courant. Cela ajouterait un stress supplémentaire sur le réseau électrique.

Grâce à ses qualités hygro thermiques, le BTC permet de réguler l'humidité intérieure et contribue au bon confort thermique des bâtiments. Sa forte inertie thermique permet d'atténuer les variations de température à l'intérieur des habitations. Il provoque également un déphasage du transfert de chaleur durant les périodes de surchauffe. Ces principes sont intégrés à l'architecture bioclimatique qui prône une conception des bâtiments adaptée au climat afin de garantir un confort thermique et une durabilité dans le temps. Une approche multicritère intégrant les principes bioclimatiques favorise la conception d'une architecture de qualité, résiliente et durable (Dejeant & Joffroy, 2021).

Bien que le BTC soit un matériau économique, local, avec une excellente qualité hygro thermique, la filière BTC peine à promouvoir un matériau dont il existe encore peu de représentation moderne. En effet, une grande partie des habitations au Burkina Faso se font en auto-construction et le manque de référence en BTC pénalise sa diffusion.

Ouagadougou, est marquée par une forte demande en logement accompagnée d'un étalement urbain important. La construction d'habitations en BTC sur plusieurs étages offre une solution durable et résiliente à ces problématiques. Malgré ces avantages, le BTC est perçu négativement par les foyers à revenus moyens. Associée aux constructions de bas standing, la population lui préfère des matériaux liés à une architecture d'inspiration occidentale qui n'est pas adaptée aux conditions climatiques locales. La diffusion d'une architecture bioclimatique associée à la mise en œuvre de BTC permettrait d'améliorer les conditions de vie des habitants tout en utilisant des ressources locales.

1.3 Pertinence du sujet de recherche

Cette étude est centrée sur la conception d'habitats de haut standing répondant aux problématiques actuelles rencontrées par Ouagadougou. Diversifier la recherche sur ce sujet est particulièrement pertinent pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la densification du bâti avec un matériau comme le BTC est essentielle. En plus de réduire l'étalement urbain, cette approche utilise des ressources locales largement disponibles. De plus, proposer des constructions en BTC permet de créer des logements plus confortables et durables, mieux adaptés aux conditions climatiques de la région. Enfin, rendre les logements en BTC plus attrayants contribue à l'acceptation et à la diffusion de ce matériau parmi la population, facilitant ainsi la transition vers des pratiques de construction plus écologiques et résilientes.

Ces sujets s'inscrivent dans les ambitions de l'agenda 2030 défini par les Nations Unies. Parmi les 17 objectifs pour le développement durable, la conception d'habitats bioclimatiques répond à quatre d'entre eux : promouvoir des solutions durables et encourager l'innovation (n°9), développer des villes durables et résilientes (n°11), mettre en place des modes de consommation durable (n°12), lutter contre les changements climatiques (n°13) (Nations Unies, 2023). Ils sont illustrés à la Figure 1-1.



Figure 1-1: Objectifs de développement durable des Nations Unies appliqués à l'étude (Nations Unies, 2023)

1.4 Objectifs de la recherche

Ce travail de recherche vise à encourager la population de Ouagadougou à construire en BTC. Afin d'améliorer l'image de ce matériau auprès de la population, trois archétypes d'habitat bioclimatique sont conçus. Ces bâtiments seront denses tout en intégrant des aspects esthétiques, socio-économiques, de durabilité, de performance énergétique et de confort thermique. Cette approche multicritère est validée par des simulations.

L'objectif de ce mémoire est de produire des plans, des coupes et des modèles informatiques permettant d'étudier le confort thermique. Ces documents serviront aussi bien de référence pour les architectes et les populations pratiquant l'auto-construction, que d'exemple pour la promotion immobilière de futurs projets en BTC.

L'une des intentions principales de ce mémoire est d'analyser les performances des murs porteurs en BTC sur plusieurs étages, afin de fournir des recommandations pour la mise en œuvre de telles structures.

Une autre finalité de cette étude est d'évaluer le confort thermique d'habitats bioclimatiques en BTC à Ouagadougou. Nous visons à identifier les meilleures pratiques et à proposer des solutions pour améliorer le confort thermique des logements construits avec ce matériau.

Ce travail de recherche s'adresse à une audience variée, comprenant aussi bien la communauté scientifique que les professionnels du bâtiment ou encore les pouvoirs publics. Les résultats les aideront à mieux comprendre les défis et les opportunités liés à la réalisation de bâtiments en BTC sur plusieurs niveaux, tout en assurant un confort thermique optimal.

Cette étude s'adresse notamment aux chercheurs travaillant sur les BTC et le confort thermique dans les habitats des pays chauds et humides, comme ceux impliqués dans le projet HABIMO. Les recommandations pourront guider les concepteurs dans l'amélioration des habitats en BTC, en particulier en les inspirant à concevoir des habitations de plusieurs étages. L'auto-construction étant très répandue au Burkina Faso, cette étude s'adresse également aux constructeurs individuels.

Cette étude peut par ailleurs encourager les maîtres d'ouvrage, les promoteurs et les pouvoirs publics à entreprendre des projets de construction d'immeubles à appartements en BTC. De plus, les conclusions de cette étude concernent également le gouvernement et les organisations ayant le pouvoir de mettre en place des actions propices au développement d'habitats en BTC.

La Figure 1-2 présente la Quad Chart illustrant les objectifs et cibles de l'étude.

Quad chart

But et objectif

- Encourager la population de Ouagadougou à construire en BTC
- ⇒ Concevoir 3 archétypes d'habitat bioclimatique
 - ⇒ Etudier la résistance de murs porteurs en BTC
 - ⇒ Evaluer le confort thermique d'habitat en BTC

Audience et cibles

- ⇒ Chercheurs : HABIMO, 2iE, Université de Liège, ...
- ⇒ Ordre des Architectes du Burkina
- ⇒ Ministère de l'Urbanisme, des Affaires Foncières et de l'Habitat
- ⇒ Population burkinabé

Innovation

- ⇒ Approche interdisciplinaire
- ⇒ Conception immeuble à appartement en BTC
- ⇒ Analyse par éléments finis de murs porteurs en BTC
- ⇒ Utilisation de simulation du confort thermique d'habitat BTC

Impact

- ⇒ Créer des références d'habitat BTC pour les architectes et le secteur immobilier
- ⇒ Accélérer la construction d'immeuble à appartement en BTC

Figure 1-2 : Quad Chart

1.5 Questions de recherche

L'objectif de ce travail de recherche est de concevoir des archétypes d'habitat bioclimatique en BTC. Ces exemples permettront de nourrir un imaginaire commun. Ils serviront de ressources aux métiers liés à la construction, mais également de référence aux utilisateurs.

Au cours de ce projet de recherche, la principale question abordée est la suivante :

Comment concilier qualité architecturale et confort thermique en construction BTC ?

Pour répondre à ce questionnement, nous étudions les sous-questions suivantes :

1. *Comment intégrer les stratégies développées autour de la construction « dense » et bioclimatique dans des archétypes adaptés au contexte de Ouagadougou ?*
2. *Dans quelle mesure les BTC sont compatibles avec la construction d'habitations de plusieurs niveaux ?*
3. *Dans quelle mesure une habitation en BTC est performante thermiquement ?*

Pour répondre à ces questions, la méthodologie s'articule en plusieurs étapes. Tout d'abord, une collecte et une analyse de la documentation sur le climat, les modes d'habitat, les typologies d'architecture locales sont réalisées pour guider la conception. Par la suite, des prototypes des archétypes sont développés avec l'aide d'experts en architecture de terre crue burkinabé, aboutissant à la production de documents et de maquettes numériques. Enfin, la validation structurelle est effectuée à l'aide de simulations par éléments finis, suivie d'une évaluation du confort thermique grâce à des simulations sur le logiciel EnergyPlus.

En l'absence de normes spécifiques sur le confort thermique pour les climats chauds et humides de l'Afrique de l'Ouest, cette étude se base sur l'approche du confort adaptatif prescrite par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019). De plus, les standards existants pour le dimensionnement des murs porteurs

en BTC étant limités, nous nous appuyons sur les recherches de Sajanathan et al. (2019) pour évaluer la résistance de la structure.

1.6 Structure de l'étude

Ce travail est structuré en plusieurs Chapitres, chacun abordant un aspect essentiel de la recherche. Il débute par l'état de l'art (Chapitre 2) qui synthétise les concepts fondamentaux, le contexte de l'étude, ainsi que les méthodes d'évaluation du confort thermique. Il mentionne également des études similaires, offrant un cadre théorique solide et une base comparative pour cette recherche.

La méthodologie (Chapitre 3) présente ensuite le cadre et les frontières de l'étude. Il définit les variables et les indicateurs utilisés, ainsi que les méthodes de collecte et d'analyse des données. Ce Chapitre explique par ailleurs le processus de validation des résultats, garantissant la rigueur scientifique de l'étude.

Les résultats de la recherche sont présentés dans les Chapitres 4, 5 et 6, chacun détaillant les différents aspects et découvertes significatives de l'étude.

La discussion (Chapitre 7) interprète les résultats et les met en perspective avec le contexte scientifique et professionnel. Ce Chapitre inclut également les recommandations, et détaille les forces et les limites de l'étude, fournissant une perspective critique et constructive.

Enfin, la Conclusion (Chapitre 8) fait la synthèse des résultats, récapitulant les principaux résultats et implications de la recherche.

Les références utilisées tout au long de cette étude sont mentionnées dans le Chapitre 9, assurant la traçabilité des sources d'information.

Les informations et détails complémentaires sont fournis en annexe, offrant des ressources supplémentaires pour une compréhension approfondie.

2 Etat de l'art

2.1 Contexte de Ouagadougou

2.1.1 Climat

Le Burkina Faso, un pays enclavé en Afrique de l'Ouest, est bordé par le Mali, le Niger, le Bénin, le Togo, le Ghana et la Côte d'Ivoire. D'après la classification de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006) présenté à la Figure 2-1, il présente trois zones climatiques distinctes :

- Au nord, le climat est aride avec de faibles précipitations et des températures extrêmement élevées (BWh), connu sous le nom de zone sahélienne.
- Le centre, où se trouve Ouagadougou, est caractérisé par un climat de steppe chaude (BSh), désigné comme zone soudano-sahélienne ou sub-sahélienne.
- Au sud, le climat est qualifié de tropical avec un hiver sec (Aw), également appelé savane.

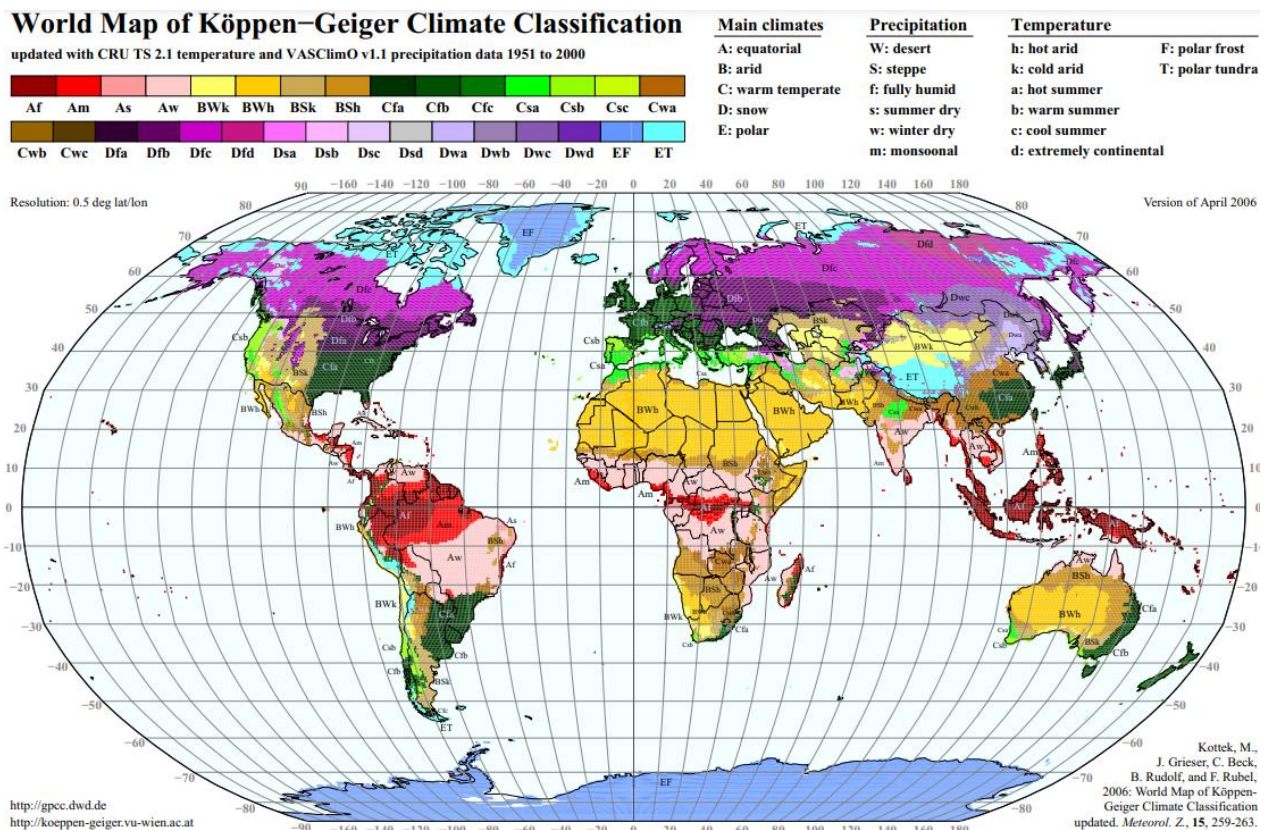


Figure 2-1 : Classification climatique de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006)

À Ouagadougou, les températures varient de 15°C à 41°C avec des précipitations allant de 0 à 182 mm selon les mois. Les conditions climatiques changent considérablement au fil des saisons, distinguées en trois principales périodes :

La **saison sèche** s'étend de mars à mai. Les températures sont extrêmement élevées, atteignant un pic en avril avec des maximales de 41°C en journée et ne descendant pas en dessous de 24°C la nuit. De mars à avril, les précipitations sont rares et

l'humidité relative oscille entre 10% et 40%. En mai, les précipitations augmentent ainsi que l'humidité relative. Durant cette période, un vent chaud et sec, l'Harmattan, souffle du nord-est, apportant de la poussière en provenance du désert.

La **saison des pluies** dure de juin à septembre. Les températures baissent, avec des extrêmes compris entre 23°C et 32°C. Les précipitations sont abondantes, atteignant un pic en août avec 182 mm de pluie. L'humidité relative est élevée, pouvant atteindre plus de 80% durant plus de 12h consécutives. Les alizés, des vents humides dus à la mousson, soufflent du sud-est. La vitesse du vent est généralement faible, environ 2 m/s.

La **saison froide** se manifeste d'octobre à février. Les températures peuvent descendre jusqu'à 15°C. Les précipitations diminuent progressivement, jusqu'à être absentes de décembre à février. L'humidité relative, qui peut encore atteindre 80% en octobre, chute à environ 40% en décembre.

Ces variations climatiques représentées aux Figure 2-3, Figure 2-4 et Figure 2-5 influencent fortement la conception architecturale, particulièrement en matière de confort thermique et d'efficacité énergétique.

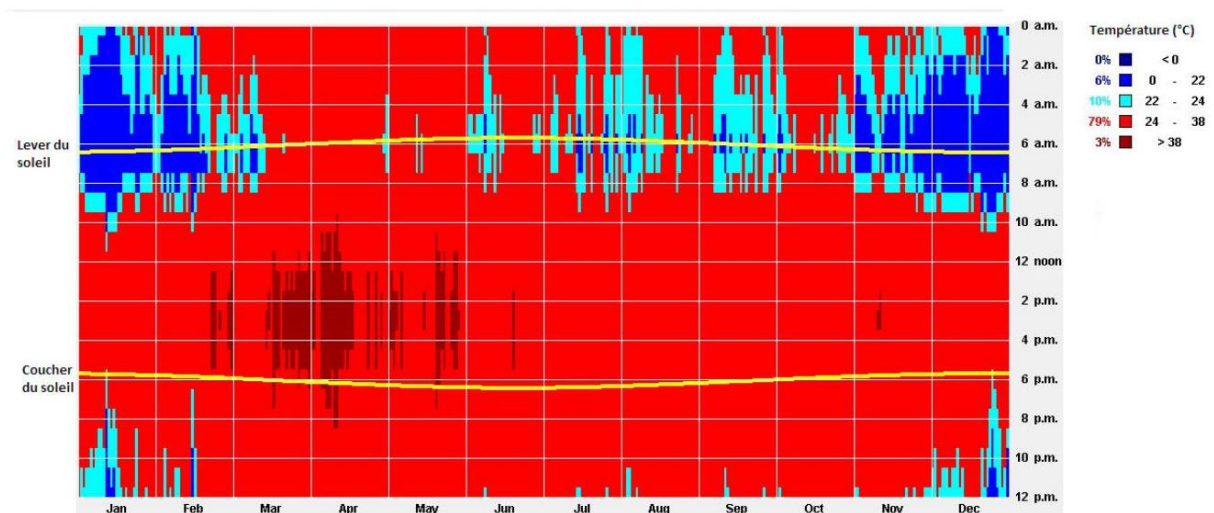


Figure 2-2 : Analyse des températures du fichier TMY (Kaboré, 2015)

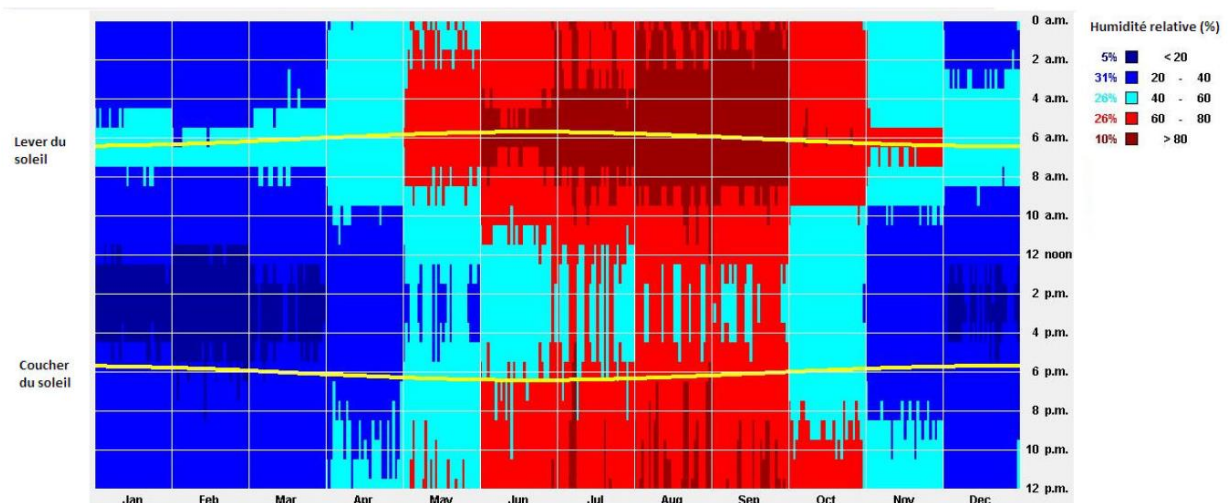


Figure 2-3 : Analyse de l'humidité relative du fichier TMY (Kaboré, 2015)

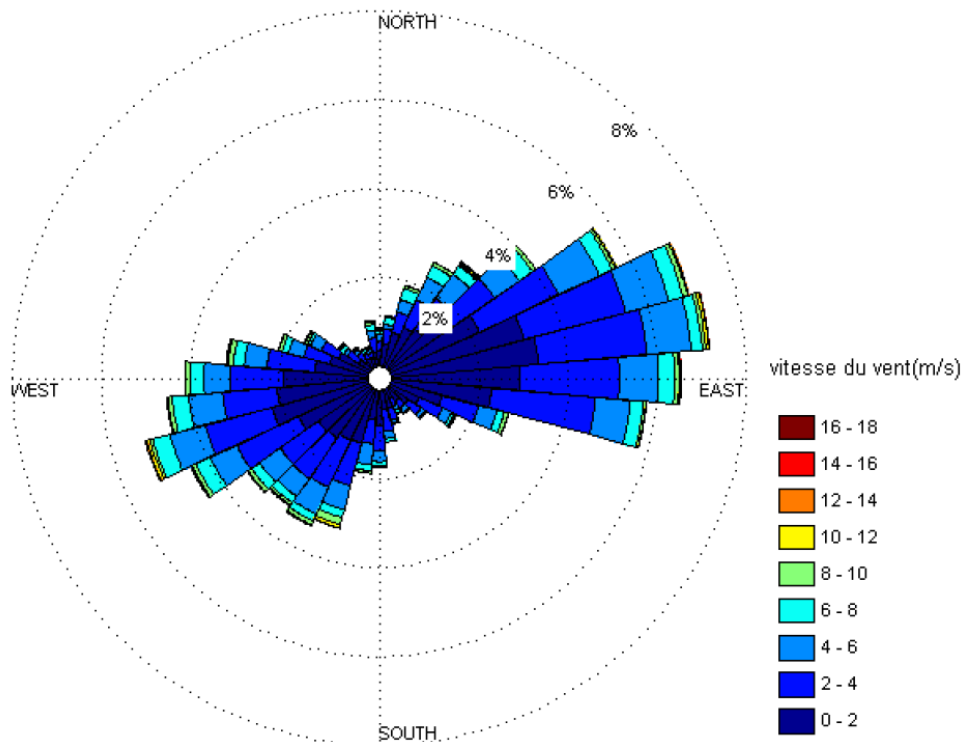


Figure 2-4 : Rose des vents de Ouagadougou du fichier TMY (Kaboré, 2015)

2.1.2 Contexte social et urbain

Le contexte urbain de Ouagadougou est caractérisé par une organisation radiocentrique s'élargissant du centre vers les périphéries. Le centre de Ouagadougou est organisé par des quartiers construits entre les années trente et soixante. Il s'agit de la ville à quadrillage. Elle est caractérisée par un maillage fait de grands axes de circulation délimitant des îlots d'habitations. Progressivement, la ville s'est élargie au fur et à mesure par les opérations de lotissement et par l'urbanisation informelle dans

les quartiers nommés « non-lotis ». Aujourd'hui, la majorité des quartiers sont lotis, mais pour autant, ils ne sont pas tous viabilisés. La majorité des zones loties sont desservies en eau potable et en électricité (Séré, 2020).

D'après l'interview réalisée avec M. Belinga Nko'o en avril 2024 (Annexe 1), en zone urbaine, les parcelles sont regroupées en îlots. Dans cette enceinte, plusieurs familles partagent des espaces communs pour y garer vélo, moto et voiture de manière sécurisée. Ces espaces communs souvent extérieurs sont également des lieux de sociabilisation. La structuration de ces îlots est très importante. Il y a une forte distinction entre les espaces privés, semi-privés et publics.

Les habitations sont généralement protégées par une clôture qui marque une séparation physique entre la rue et l'habitation. Cela traduit une mise en retrait de la vie familiale liée à des aspects sociaux et religieux. La présence d'une cour intérieure protégée et destinée à la vie en communauté est primordiale (Belinga Nko'o, 2006). Protégé des regards, de nombreuses activités y prennent place comme la cuisine, la lessive, les repas, la sieste.

Traditionnellement, les parcelles sont densifiées horizontalement, les habitations s'agrandissent avec la famille. Les enfants construisent leurs habitations dans la même parcelle (Deverin, 1999). Il est fréquent de trouver plusieurs unités résidentielles à l'intérieur de l'enceinte. Des impératifs économiques peuvent également inciter les habitants à mettre en location une partie de la maison ou une dépendance. Ainsi, sur la même parcelle, on peut aussi bien trouver des familles élargies qui sont des couples avec ou sans enfant vivant avec d'autres membres de la famille, que des couples avec enfants ou des personnes célibataires. L'adaptation de l'habitat traditionnel au mode de vie urbain est illustrée Figure 2-5.

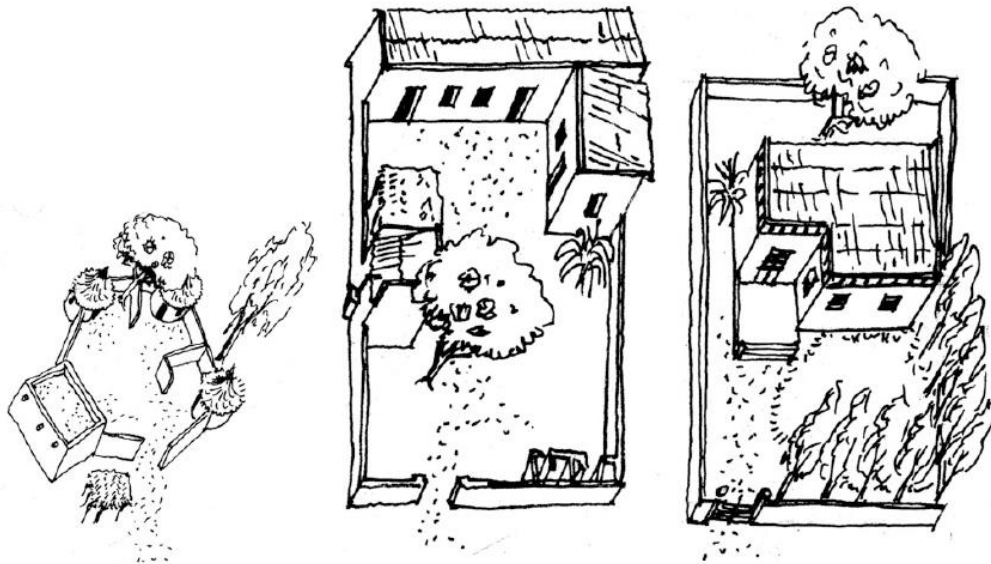


Figure 2-5 : Adaptation de l'habitat à la parcelle urbaine (Folkers & van Buiten, 2019)

2.1.3 Contexte architectural

L'architecture au Burkina Faso a beaucoup évolué au cours des dernières décennies, aussi bien en termes de matériaux de construction que de formes architecturales. Les matériaux traditionnels ont progressivement cédé leur place à des matériaux réputés

plus durables et contemporains. En l'absence de bois et face à la difficulté d'extraction de la pierre, l'architecture s'est historiquement développée en terre aussi nommée banco, un matériau localement disponible. Ouagadougou, autrefois surnommée "Bancoville", était caractérisée par une architecture en terre crue comme illustrée par la Figure 2-6.



Figure 2-6 : Photographies aérienne de Ouagadougou en 1931 et 2007 (Folkers & van Buiten, 2019)

L'abandon progressif de la terre crue est dû à sa fragilité et à une volonté de rupture avec l'esthétisme traditionnel. À partir de la moitié du vingtième siècle, les populations ont cherché à s'inscrire dans l'air du temps avec des constructions inspirées de l'architecture occidentale. Un engouement pour les matériaux importés tels que les parpaings, l'acier, l'aluminium s'est manifesté. En outre, on note l'apparition de baies vitrées. Les matériaux transparents, comme le vitrage, n'étaient pas disponibles. La plupart des logements vernaculaires ont des ouvertures réduites, privilégiant l'obscurité pour éviter les surchauffes. A contrario, l'architecture occidentale moderne favorise de grande ouverture pour profiter des apports solaires plus rares.

Cette évolution se traduit également par l'abandon des toits traditionnels en chaume au profit de toitures en tôle et charpentes métalliques. La morphologie des habitations a également évolué, passant de formes circulaires à des constructions rectangulaires, mieux adaptées aux nouveaux matériaux comme illustré à la Figure 2-7.



Figure 2-7 : Habitat traditionnel (Africa vernacular architecture, 2024) et moderne

La construction de logement est influencée par des choix sociaux-économiques. L'habitat est considéré comme un marqueur social important. Le coût important associé à la construction d'une habitation inspirée de l'esthétisme occidentale montre une certaine réussite sociale (Wyss, 2005).

L'architecture de Ouagadougou se caractérise par une diversité marquée, avec des logements de différents standings se côtoyant sans qu'il y ait de quartiers homogènes. Selon la catégorisation de Séré (2020), on distingue plusieurs types de logements :

Les logements de **haut standing** (Figure 2-8) sont principalement des immeubles ou duplex construits en matériaux durables comme le béton, couvrant une surface de plus de 500 m². Ces habitations sont équipées de commodités luxueuses et disposent de l'électricité. Les ouvertures sont vitrées. Bien que ces logements soient plus concentrés au centre-ville, on en trouve disséminés dans toute la ville.

Les habitats de **bon standing** (Figure 2-9), également appelés villas, sont des maisons individuelles de 300 à 500 m². Elles comprennent généralement 2 à 3 pièces, une cuisine, une salle d'eau et bénéficient de l'électricité. Cette typologie est présente dans tous les quartiers lotis et représente 18% des logements à Ouagadougou.

Les logements de **moyen standing** (Figure 2-10) sont construits en banco amélioré sans vitrage, avec une surface allant de 200 à 300 m². Ce type de logement inclut les « chambre-salon », deux pièces communément utilisées, ainsi que les « célibatérium », qui sont des alignements d'habitats locatifs d'une ou deux pièces. Ces logements sont principalement situés dans les zones loties et constituent 27% des habitations de la ville.

Les habitations de **standing bas** (Figure 2-11) sont également en banco, mais ne possèdent qu'une seule pièce de 5 à 8 m². Souvent appelées « entrée-couché », elles se trouvent essentiellement dans les quartiers non lotis et forment 44% des logements à Ouagadougou.

Les différents standings de logement et leurs caractéristiques sont résumés au Tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Synthèse des typologies de logement à Ouagadougou (Séré, 2020)

Standing	Importance dans la ville	Surface (m ²)	Matériaux de construction	Eau potable	Electricité	Sanitaire
Haut	11%	>500	Dur (béton)	Eau courante avec plusieurs points d'eau	Oui	WC avec chasse
Bon	18%	300-500	Dur, banco enduit de ciment	Eau courante avec un point d'eau	Oui	Latrine fosse étanche
Moyen	27%	300-500	Banco amélioré	Borne fontaine	Non	Latrine traditionnelle
Bas	44%	200-300	Banco simple	Borne fontaine	Non	Espace naturel

Source : Commune de Ouagadougou, Projet CDS, 2009



Figure 2-8: Logement de haut standing



Figure 2-9 : Logement de bon standing



Figure 2-10 : Logement de moyen standing



Figure 2-11 : Logement de bas standing

2.2 Concepts et définitions

2.2.1 Brique de terre comprimé

La terre crue est un matériau utilisé dans diverses régions du monde depuis plusieurs millénaires. Des civilisations anciennes ont employé ce matériau pour édifier des bâtiments aux fonctions variées. De nombreux édifices en terre sont aujourd'hui inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO. Certaines de ces constructions sont monumentales comme la cité de Chan Chan au Pérou, l'arche de Ctésiphon en Irak, la Grande Mosquée de Djenné au Mali, et l'ancienne ville de Shibam au Yémen.

Présente sur tous les continents, la terre crue est un matériau local très disponible, facile à extraire et à mettre en œuvre. Il existe différentes techniques traditionnelles permettent de réaliser des structures en terre telles que le pisé, la bauge et l'adobe. Elles sont illustrées à la Figure 2-12.



Figure 2-12 : Techniques de mise en œuvre de la terre crue : 1-le pisé, 2-la bauge, 3-l'adobe (Dejeant et al., 2021)

L'adobe, également nommé banco, est la technique de mise en œuvre la plus répandue au Burkina Faso. Il s'agit de brique de terre crue moulée et séchée au soleil. L'adobe est simple à fabriquer et nécessite peu d'outils. Il s'agit d'un mélange de terre et d'eau, parfois enrichi de matières animales ou végétales, coulé dans un moule rectangulaire (Dejeant & Joffroy, 2021). L'adobe, bien que couramment utilisé, est vulnérable à l'eau, se détériorant facilement et perdant ainsi sa résistance mécanique. Pour améliorer les propriétés de la terre, une stabilisation est nécessaire.

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont une évolution des briques d'adobe. Les BTC sont stabilisés mécaniquement par compactage, ce qui réduit la porosité et, par conséquent, l'absorption de l'eau. Cependant, ces blocs restent encore fragiles. La stabilisation chimique avec un liant permet de limiter leur sensibilité à l'eau et d'augmenter leur résistance mécanique (P'Kla, 2002). Le ciment et la chaux sont les stabilisants les plus couramment utilisés, mais des matériaux plus respectueux de l'environnement, comme des fibres végétales ou des coproduits industriels, peuvent également être employés.

Au Burkina Faso, la terre utilisée est principalement la latérite, un sol ferrugineux qui donne aux BTC leur couleur rouge caractéristique. Les BTC sont produits à proximité des chantiers. La terre est d'abord extraite du sol et séchée, puis broyée et tamisée pour enlever les éléments indésirables. Ensuite, la terre est mélangée à sec avec le stabilisant approprié, avant d'ajouter de l'eau. Le temps de réaction dépend du stabilisant utilisé. Le mélange est ensuite versé dans un moule et compacté à l'aide d'une presse manuelle, motorisée ou hydraulique. Une fois démoulée, la brique subit une cure humide qui varie en fonction du stabilisant employé, suivie d'un séchage permettant d'atteindre la qualité requise (Rigassi & CRATerre-EAG, 1995a). Les étapes de production sont illustrées à la Figure 2-13.



Figure 2-13 : Etape de production des BTC

Les BTC ont des propriétés mécaniques spécifiques qui les rendent adaptées à diverses applications dans la construction. Leur dimension habituelle est de 29,5 x 14

x 9 cm, et elles sont couramment utilisées pour des parois de 14 cm, bien qu'elles puissent également permettre la construction de murs de 29,5 cm. Les BTC stabilisées avec des liants à faible impact environnemental, comme les fibres végétales ou certains coproduits industriels, présentent une résistance à la compression comprise entre 1 et 7 MPa (Nshimiyimana, 2020). Cependant, lorsqu'elles sont stabilisées avec du ciment, la résistance à la compression peut atteindre jusqu'à 19 MPa, ce qui les rend compatibles avec des constructions nécessitant une plus grande résistance.

Bien que les BTC puissent être utilisées pour des murs porteurs, elles sont habituellement mises en œuvre avec une structure en béton pour assurer une stabilité et une durabilité accrues. Les bâtiments en BTC de plusieurs niveaux sont rares, principalement en raison des défis techniques et structurels associés à l'utilisation de ce matériau pour des constructions de grande hauteur. En général, ces bâtiments utilisent une ossature en béton pour soutenir les étages supérieurs, tout en bénéficiant des avantages thermiques et environnementaux des BTC. La Figure 2-14, la Figure 2-15 et la Figure 2-16 présentent des bâtiments de plusieurs niveaux en BTC.



Figure 2-14 : Centre Diapalante, Saint Louis, Sénégal (Dejeant & Joffroy, 2021)



Figure 2-15 : Commission Justice et Paix, Ougadougou, Burkina Faso (Dejeant & Joffroy, 2021)



Figure 2-16 : Logements SIM, Mayotte (Dejeant & Joffroy, 2021)

L'Agence Burkinabé de Normalisation, de la Métrologie et de Qualité, a établi les normes NBF 02 – 001 à NBF 02 – 009 (ABNORM, 2009), qui traitent de la classification, des spécifications techniques, des essais et des bonnes pratiques pour la mise en œuvre de BTC stabilisées au ciment dans la construction de bâtiment. Ces normes traitent uniquement des BTC et non des maçonneries en BTC. Les informations qui y sont mentionnées concernent la brique seule.

A Mayotte, une filière importante de BTC a été mise en place dans les années 1980. « Ce dispositif a permis de produire jusqu'à 2 000 unités de logement par an. En l'espace de 20 ans, ce sont plus de 18 000 logements sociaux et près de 2 000 bâtiments publics qui ont été construits »(Dejeant, Garnier, et al., 2021, p16). Ce développement important a mené à la conception d'une première norme sur les BTC (Boubeker et al., 1998) puis d'une ATEX de type A (ART.TERRE Mayotte, 2018) prévalent pour la réalisation de construction en BTC.

La réglementation française recommande une résistance à la compression d'au moins 6 MPa pour les BTC des murs porteurs de deux étages, 4 MPa pour ceux d'un étage et 2 MPa pour les structures non porteuses. Des performances spécifiques sont définies indépendamment du cas de charge réel et limitent l'utilisation des BTC à deux étages.

Il existe encore peu de documentation sur la mise en œuvre et le dimensionnement de murs porteurs en BTC de plusieurs niveaux, ce qui limite leur adoption. Cependant, avec l'avancement des recherches et l'amélioration des techniques de stabilisation, il est possible que les BTC deviennent une option viable pour les constructions multi-étages à l'avenir.

2.2.2 Confort thermique

Le confort thermique fait référence aux sensations physiques et physiologiques ressenties par les occupants d'un espace en réponse à l'environnement ambiant. Givoni (1992) le définit comme une condition dans laquelle la majorité des occupants ne ressentent ni inconfort chaud ni inconfort froid. D'un point de vue énergétique, une personne est considérée confortable lorsque les flux de chaleur entrant et sortant de son corps sont équilibrés.

La température corporelle optimale pour une personne est d'environ 36,7°C. Pour maintenir cette température, des interactions se produisent entre le corps et son environnement de manière à atteindre un équilibre. Les échanges de chaleur se font principalement par convection et rayonnement, mais aussi par évaporation, conduction et ingestion de nourriture. Ces échanges sont influencés à la fois par des facteurs environnementaux et individuels illustrés à la Figure 2-17.

Les facteurs environnementaux sont :

- Température de l'air : il s'agit de la température ambiante mesurée en degrés (°C).
- Température des parois : elle est caractérisée par la température moyenne radiante définie par ASHRAE (ASHRAE, 2020, p 5) comme « la température d'une enceinte noire uniforme qui échange avec l'occupant la même quantité de chaleur par rayonnement que l'environnement réel ». Elle est exprimée en degrés (°C).
- L'humidité : elle est caractérisée par le taux d'humidité relative de l'air (%). Elle influence les échanges par évaporation.
- La vitesse d'air : elle s'exprime en m/s et influence la sensation de chaleur ressenti par des individus.

Les facteurs environnementaux sont :

- L'habillement : simule l'isolement thermique provoqué par les vêtements. Exprimé en clo, l'habillement est compris entre 0 clo pour une personne nue et 4 clo pour des vêtements d'hivers.
- L'activité métabolique : représente la chaleur interne produite par le corps pendant une heure et pour un m². Elle est mesurée en MET qui équivaut à 58,2 W/m². Ses valeurs varient entre 1 MET pour du sommeil et jusqu'à 4 MET pour du sport.

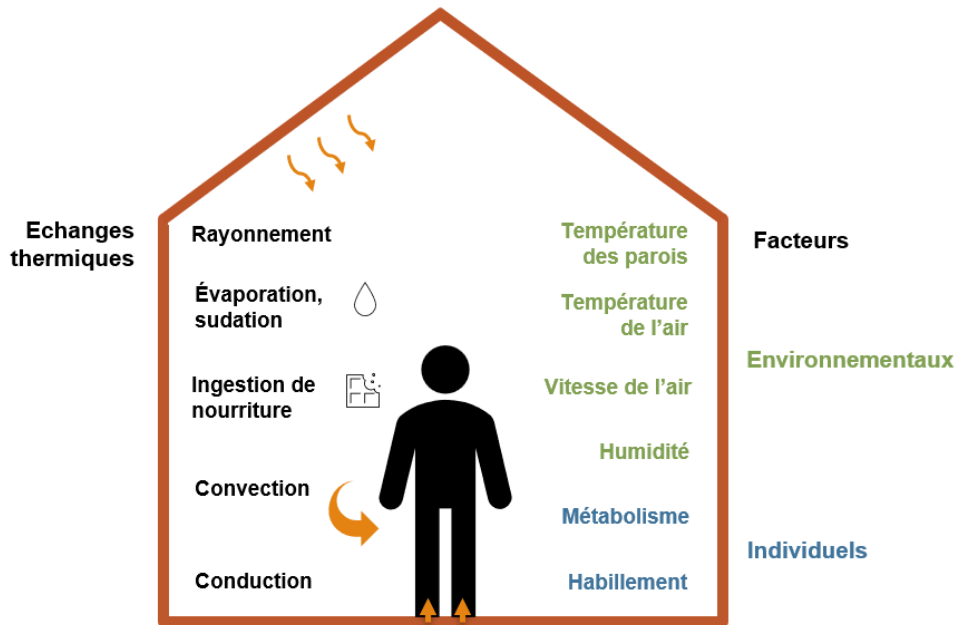


Figure 2-17 : Echanges thermiques et facteurs du confort thermique

Il existe cependant des variations de neutralité thermique entre les individus, influencées par l'acclimatation et la sensibilité individuelle à la chaleur ou au froid.

Il existe deux approches principales pour évaluer le confort thermique : l'approche analytique et l'approche adaptative.

L'approche analytique, développée par Fanger (1970), repose sur le bilan thermique du corps humain pour déterminer le confort des individus. Cette méthode suppose que pour garantir une sensation de neutralité thermique, les échanges de chaleur doivent être équilibrés. Elle utilise les paramètres environnementaux et les paramètres individuels détaillés précédemment pour déterminer le Predicted Mean Vote (PMV) sur une échelle de sensation thermique. L'ASHRAE (2020) en détermine 7 niveaux, de très froid (-3) à très chaud (+3). Le Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) est ensuite défini à partir du PMV comme illustré à la Figure 2-18. Lorsque celui-ci se situe entre -0.5 et +0.5, il est estimé qu'au moins 90% des individus trouvent l'ambiance thermique satisfaisante.

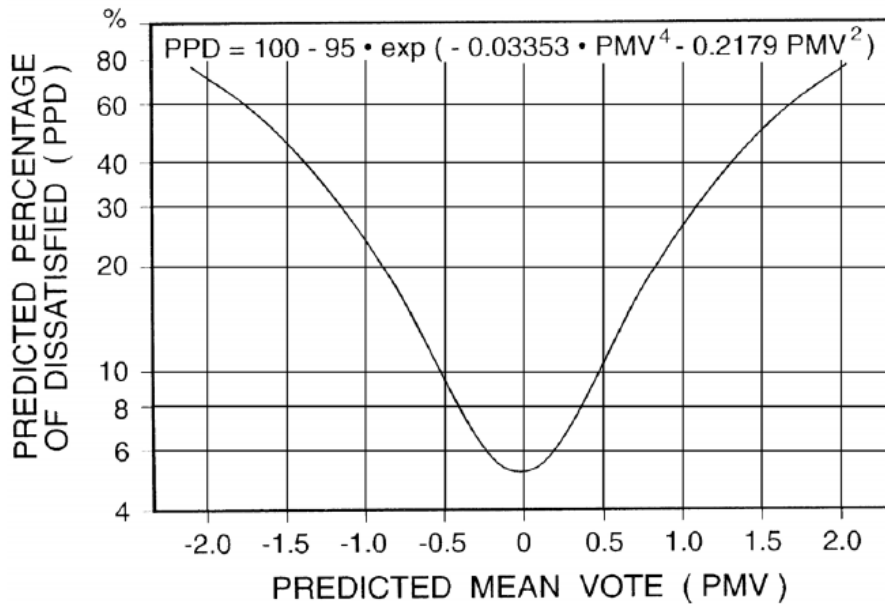


Figure 2-18 : PPD en fonction du PMV (ASHRAE, 2020)

Bien que cette approche ait standardisé l'évaluation du confort thermique, elle a été initialement développée pour des climats tempérés ou froids et tend à surestimer l'inconfort dans les climats chauds, surtout dans les bâtiments en évolution libre. Les recherches menées par Dear et Brager (1998) montrent que le PMV n'est pas adéquat pour les bâtiments dont la condition thermique varie avec l'environnement, car il surestime souvent la sensation de chaleur.

L'**approche adaptative** a été développée par Nicol et Humphreys (2002). Selon cette approche, les individus peuvent s'adapter à leur environnement pour atteindre le confort souhaité, par des ajustements comportementaux, physiques ou physiologiques. Cette méthode repose sur des sondages de terrain et des études expérimentales pour estimer une plage de température de confort, laquelle dépend de la moyenne des températures extérieures des jours précédents. Les standards ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020) et la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) définissent ainsi des intervalles de température intérieure opérative pour les bâtiments en évolution libre. La Figure 2-19 présente les températures opératives de confort en fonction des températures moyennes extérieures selon le standard ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020).

Pour les bâtiments dotés de systèmes permettant aux occupants de réguler la vitesse de l'air, un facteur correctif est prescrit par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) en fonction de la vitesse de l'air. L'habillement et le métabolisme sont considérés comme adaptés aux conditions climatiques. Seule l'humidité n'est pas prise en compte alors qu'il s'agit d'un facteur particulièrement important du confort thermique en climat tropical.

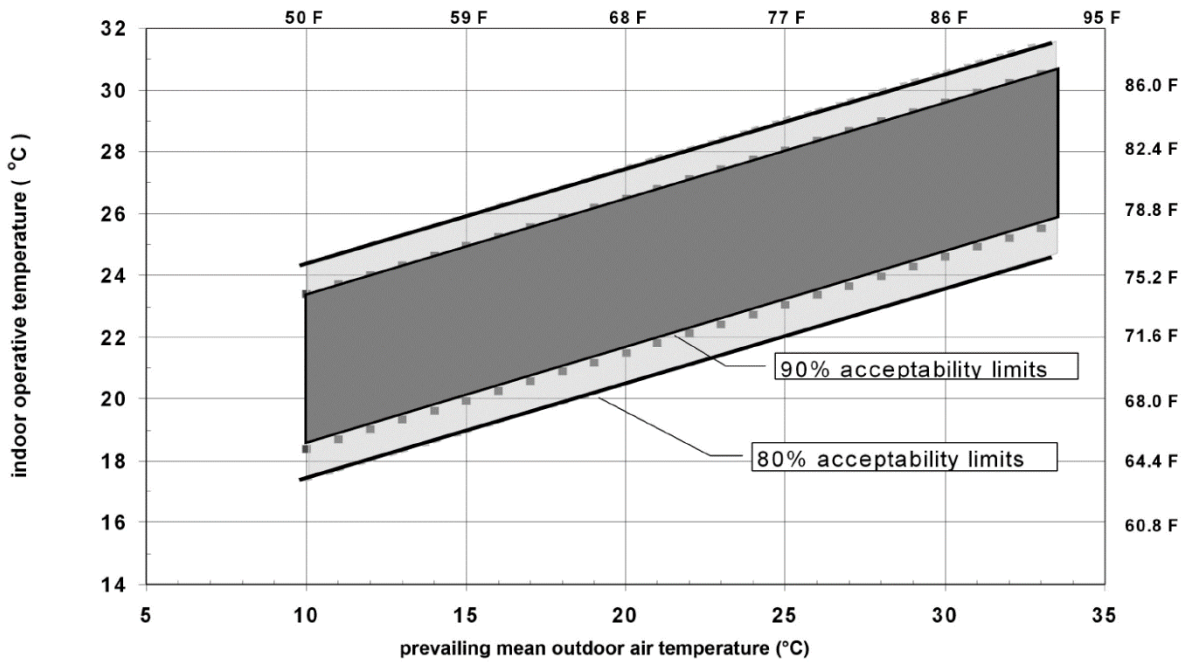


Figure 2-19 : Température opérative de confort en fonction de la température moyenne extérieure (ASHRAE, 2020)

Il existe cependant un manque de recherche sur le confort thermique dans les climats tropicaux africains. La plupart des bâtiments dans ces régions sont en évolution libre, rendant l'approche analytique inapplicable. Le confort adaptatif est donc à privilégier, bien qu'il présente des limites liées aux aspects culturels et climatiques des régions où il a été développé.

2.2.3 Conception bioclimatique

La conception bioclimatique vise à adapter les bâtiments au climat environnant. Nécessitant une analyse préalable de l'environnement, cette approche établit un lien direct entre le bâtiment et le confort des occupants. Des stratégies passives, nécessitant peu de moyens, sont mises en place dès la conception. Cela inclut l'orientation et la forme du bâtiment, la composition des parois, et les techniques de ventilation. L'objectif est d'améliorer les conditions intérieures tout en limitant la consommation d'énergie.

La littérature s'accorde sur trois principales stratégies pour préserver les bâtiments de la chaleur : protéger du soleil, dissiper la chaleur et stocker la fraîcheur. Elles sont illustrées par la Figure 2-20.

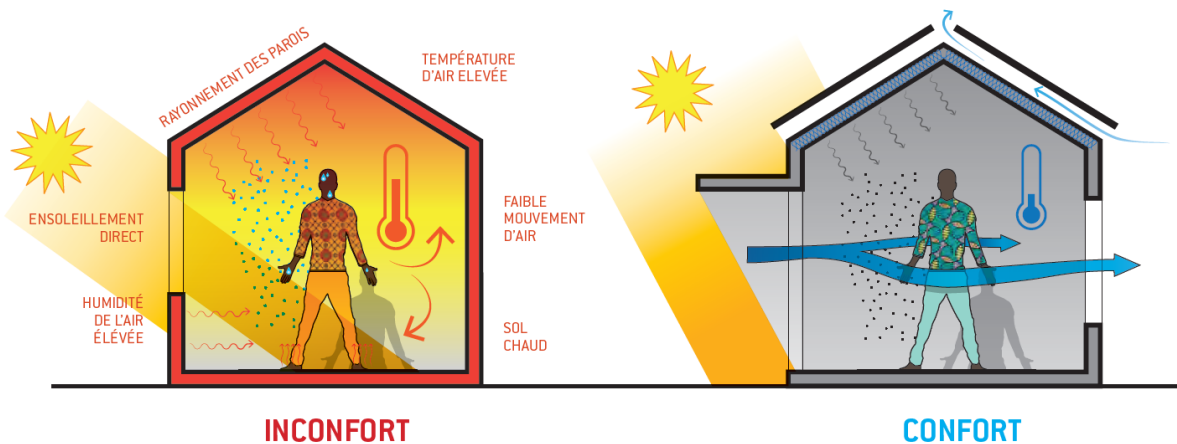


Figure 2-20 : Stratégies bioclimatiques de confort en zone tropicale (Joffroy et al., 2017)

La protection contre le rayonnement solaire est cruciale pour éviter la surchauffe des bâtiments. La toiture, étant l'élément le plus exposé, doit être prioritairement protégée. Une couleur claire à fort albédo peut diminuer la température intérieure de 2°C. En outre, l'utilisation d'une double toiture ventilée peut réduire la température intérieure de 3°C pendant les heures les plus chaudes (Joffroy et al., 2017).

Au Burkina Faso, les façades ouest, est, et sud sont les plus exposées à l'ensoleillement direct comme le montre la trajectoire du soleil illustrée à la Figure 2-21. Il est conseillé d'ombrager en priorité les fenêtres par des protections solaires telles que des auvents, loggias, débords de toiture, ou brise-soleil. Les apports solaires peuvent être réduits de 80% pour des fenêtres ombragées de l'extérieur (ASHRAE, 2009). Pour limiter les apports solaires, la surface des fenêtres doit être optimisée. Selon Kaboré (2015), le rapport optimal entre la surface vitrée et la surface de la pièce est de 5% pour les façades sud, est, et ouest, et 6% pour les façades nord.

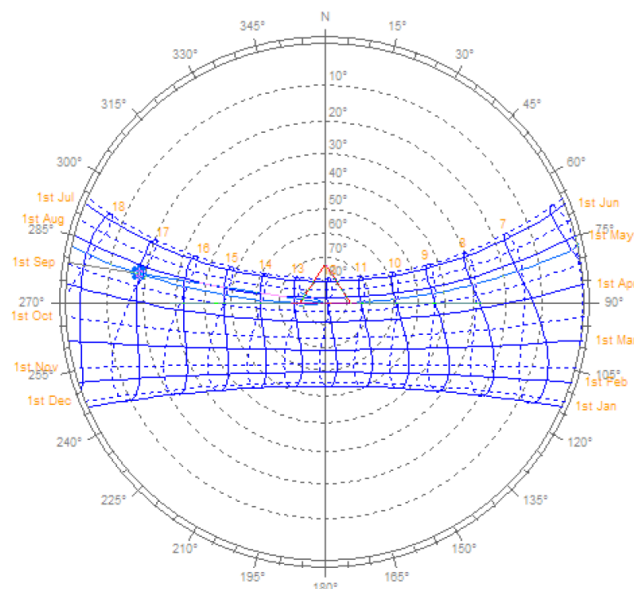


Figure 2-21 : Projection stéréographique de la trajectoire du soleil à Ouagadougou (Kaboré, 2015)

L'ombrage des murs est également important car ils contribuent aux apports de chaleur en transmettant la chaleur absorbée des rayonnements à l'intérieur du

bâtiment. De plus, un bâtiment compact a moins de murs exposés au rayonnement solaire (Joffroy et al., 2017).

La dissipation de la chaleur se fait principalement par la ventilation naturelle. Celle-ci impacte plusieurs facteurs : la température de l'air, la température de surface des parois par convection, et le ressenti des occupants par la vitesse de l'air. La ventilation naturelle nécessite plusieurs entrées et sorties d'air orientées différemment. Il est préférable d'avoir des ouvertures sur deux façades perpendiculaires aux vents dominants, créant ainsi un courant d'air grâce à la différence de pression. La présence d'ouvertures ayant une importante différence de hauteur entre elles permet d'exploiter l'effet cheminé. Ce phénomène « repose sur la circulation de l'air créée par des gradients de températures entre extérieur et intérieur : l'air plus chaud se dilate et remonte sous l'effet de la gravité, la densité de l'air au niveau du sol diminue et ce différentiel de pression amène un mouvement de l'air »(Pouffary & Delaboulaye, 2015, p 64). L'aménagement intérieur et le positionnement des entrées et sorties d'air influencent la trajectoire et la vitesse d'air. Ils doivent être réfléchis pour créer un flux d'air sur l'occupant, pouvant diminuer de 4°C le ressenti des occupants pour une vitesse d'air de 1.5 m/s (Joffroy et al., 2017).

Deux dispositifs de ventilation naturelle existent. Le premier, appelé ventilation de confort, privilégie un flux d'air continu jour et nuit afin d'améliorer le confort physiologique de l'occupant en augmentant la vitesse de l'air, bien qu'elle ne permette pas d'atteindre une température de consigne. Le second dispositif, appelé ventilation nocturne, vise à abaisser la température intérieure en ouvrant les fenêtres la nuit, lorsque les températures sont plus basses. Selon Geetha et Velraj (2012), la ventilation nocturne peut réduire la consommation d'énergie pour le refroidissement de près de 20%. D'après Hema (2020), cette méthode est particulièrement adaptée pour les bâtiments occupés pendant la journée. Cette technique doit être associée à une stratégie de conservation de la fraîcheur.

Le stockage de la fraîcheur est essentiel pour amortir les surchauffes diurnes. Des structures lourdes avec des matériaux à forte inertie thermique sont privilégiées pour tempérer l'ambiance. En outre, l'isolation de l'enveloppe limite le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur. Hema (2020) a démontré que l'utilisation d'une couche d'isolant à l'extérieur améliore le confort thermique.

L'environnement direct joue également un rôle important. La végétation rafraîchit l'air grâce au phénomène d'évaporation. Elle limite l'effet d'îlot de chaleur dû à la minéralisation, et évite le réfléchissement du rayonnement solaire vers les bâtiments (Joffroy et al., 2017).

Les diagrammes bioclimatiques sont des outils d'aide à la conception basés sur les conditions extérieures. Différentes ambiances climatiques associées à des solutions architecturales influençant le confort thermique sont représentées sur un diagramme psychométrique. Le diagramme de Givoni (1992) est l'une des approches les plus répandues. Une adaptation du diagramme de Givoni est présentée à la Figure 2-22.

Diverses solutions sont recommandées pour limiter l'inconfort chaud telles que l'ajout de systèmes de ventilation ou de refroidissement mécanique. Pour réduire les températures intérieures, un système de rafraîchissement adiabatique peut être envisagé. Aussi appelé refroidissement par évaporation, cette technologie simple est constituée d'un média humide traversé par un flux d'air. Elle permet de réduire la température de l'air de 5°C à 10°C sans recourir à un fluide frigorigène, limitant ainsi

l'impact environnemental de l'installation. De plus, ce système est peu coûteux, consomme peu d'énergie et peut être mis en œuvre avec de l'eau de pluie (PROFEEL, 2021). Cependant, ce système est inefficace lorsque l'air est déjà saturé en humidité, comme dans les climats chauds et humides. Il devra alors être associé à un déshumidificateur afin de réduire l'humidité relative de l'air entrant (Pouffary & Delaboulaye, 2015).

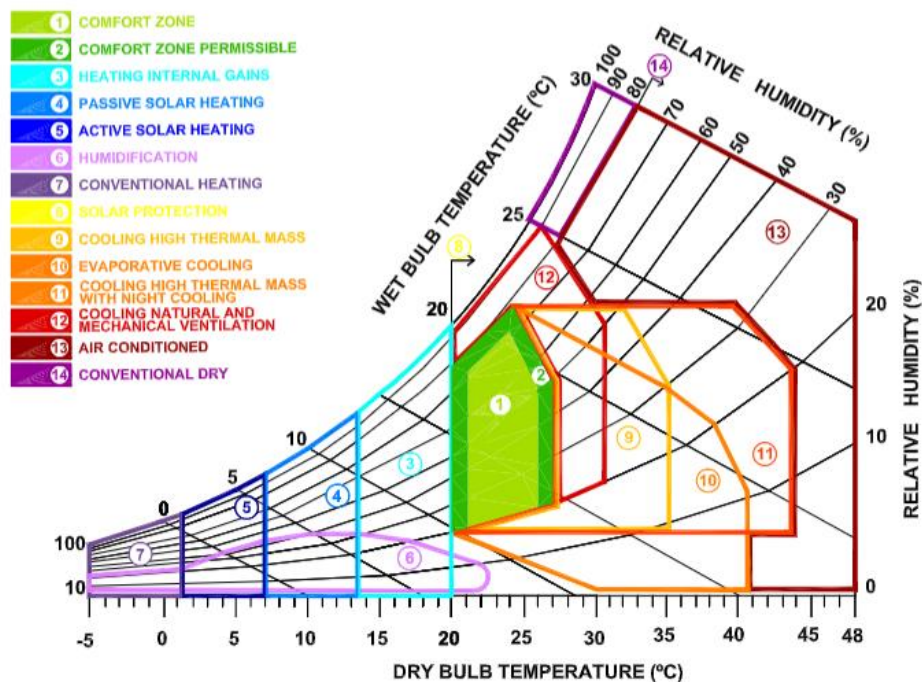


Figure 2-22 : Diagramme de Givoni adapté par (Manzano-Agugliaro et al., 2015)

2.3 Etudes similaires et gap scientifique

L'état de l'art s'achève par une synthèse des études abordant la conception d'habitat en terre crue dans un climat chaud (Tableau 2-2). Cette section identifie les méthodologies adoptées et cerne le gap scientifique que ce travail de recherche peut combler.

La conception d'habitats en terre crue, et plus particulièrement en BTC, est un sujet de plus en plus exploré. Cependant, bien qu'il existe des normes régissant la construction en BTC dans différents pays, celles-ci sont d'ordre empirique limitant leur portée et leur durabilité. Pour mieux appréhender le comportement des maçonneries en BTC, il est nécessaire d'entreprendre des campagnes d'expérimentation plus approfondies (P'Kla, 2002).

Pour augmenter leur résistance et leur durabilité, la composition des BTC et des mortiers a été étudiée par différents chercheurs notamment Nshimiyimana (2020), Perrot et al. (2018), Kolawole et al. (2020). Grâce à des essais et tests expérimentaux, ces études évaluent les performances des BTC pour différentes stabilisations.

Néanmoins, les recherches sur le comportement des murs en BTC restent limitées. La généralisation des essais sur la maçonnerie en BTC, tels que ceux réalisés par P'Kla (2002) et Sajanthan et al. (2019), permettrait de mieux appréhender leur

comportement. Ces études proposent d'ores et déjà des adaptations des équations prescrites par l'Eurocode 6 (European committee for standardization, 2013) pour les maçonneries classiques, facilitant ainsi le dimensionnement des maçonneries en BTC. Une autre approche consiste à utiliser des simulations numériques pour évaluer les performances des maçonneries en BTC. Bakhteri et al. (2004) ont effectué des modélisations par éléments finis de murs en terre crue, comparant les résultats avec des essais expérimentaux. Les résultats des simulations sont cohérents avec ceux des essais, à condition que les performances des matériaux soient bien connues et correctement renseignées dans le modèle. Pour d'autres types de maçonneries, comme les briques ou les parpaings dont les performances sont standardisées, les analyses par éléments finis sont couramment utilisées pour dimensionner les structures des bâtiments. Cette pratique n'est pas encore répandue pour les bâtiments en BTC, bien qu'elle permette d'étudier le comportement de structure à grande échelle et de manière non destructive.

En outre, la documentation sur l'utilisation des BTC pour des murs porteurs de plusieurs étages est très limitée. Les normes spécifiques aux BTC prescrivent des valeurs fixes de performances à atteindre pour les murs porteurs en fonction du nombre d'étages, limitant leur utilisation à trois niveaux, indépendamment de la charge appliquée (Boubeker et al., 1998).

Une autre voie d'amélioration des logements en BTC consiste à augmenter leur confort thermique. Au Burkina Faso, Hema (2020) a étudié la performance thermique des parois en BTC, proposant diverses solutions. Kaboré (2015) et Rincón et al. (2019) ont, quant à eux, déterminé l'impact des stratégies bioclimatiques sur le confort thermique des habitations en BTC. À l'aide d'un outil de simulation EnergyPlus, différents scénarios de conception, tels que la ventilation et la présence de protections solaires, ont été évalués. Ces études s'appuient sur l'approche adaptative pour mesurer le confort thermique et formuler des recommandations aux concepteurs.

Toutefois, ces recherches se basent sur des cas expérimentaux très simples. Les habitations étudiées comportent une ou deux pièces et sont de plain-pied. De plus, ces études n'intègrent pas d'autres aspects propres à la conception architecturale, comme la résistance structurelle ou l'intégration du contexte urbain. En revanche, Belinga Nko'o (2006) prend en compte ces facteurs dans la conception d'habitats populaires à Koudougou, mais les performances des bâtiments développés ne sont pas évaluées. Cette étude vise donc à combler le gap en évaluant non seulement les performances thermiques et mécaniques des habitations en BTC de plusieurs étages, mais aussi en tenant compte des considérations architecturales et socioculturelles spécifiques au contexte urbain de Ouagadougou.

Tableau 2-2 : Synthèse des études similaires

Référence	Sujet	Gap scientifique	Résultats
Bakhteri et al. (2004)	Modélisation par éléments finis de la maçonnerie structurelle en briques d'argile soumise à une compression axiale.	Résultats pour des briques d'argile. Expérimentation faites à l'échelle d'un mur.	La modélisation par éléments finis permet d'obtenir des résultats similaires aux essais si les performances des matériaux sont connues et correctement renseignées dans le modèle.
Kaboré (2015)	Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique subsaharienne.	Cas d'étude très simple. Ne prend pas en compte la résistance structurelle et l'intégration du contexte urbain	Recommandations pour la conception favorisant le confort thermique : <ul style="list-style-type: none"> • Réduction des surfaces de baies, • Utilisation de la ventilation naturelle, • Mise en œuvre de parois à faible albédo, • Utilisation de comble ventilé.
Rincón et al. (2019)	Améliorer le confort thermique des habitations en terre en Afrique subsaharienne grâce à la conception passive	Résultat pour des sacs de terre. Cas d'étude très simple. Ne prend pas en compte la résistance structurel et l'intégration du contexte urbain.	Montre que l'habitat en sac de terre est plus confortable que celui en adobe. Recommande l'utilisation de protection solaire et de ventilation nocturne pour les deux bâtiments.
Belinga Nko'o (2006)	Etudes prospectives pour le développement d'un habitat de qualité en adobe a Koudougou, Burkina Faso	Pas d'évaluation de la résistance structurelle et du confort thermique.	Conception d'un habitat populaire en adobe. Proposition d'une stratégie de projet.

3 Méthodologie

3.1 Description des méthodes de recherche

Ouagadougou fait face à une forte demande de logements provoquant un étalement urbain important. Pour enrayer ce phénomène, il est primordial de construire sur plusieurs niveaux et ainsi densifier le bâti. De plus, les logements « modernes » en béton, appréciés par les populations locales ne sont pas adaptés au climat burkinabé occasionnant d'importante surchauffe.

Du fait de ses propriétés hygrothermiques, sa disponibilité et son coût abordable, le BTC se positionne comme une bonne alternative au mode constructif actuel. Mais l'utilisation de ce matériau ne suffit pas à garantir un bon confort thermique. Encore faut-il adapter l'architecture au climat comme le propose la construction bioclimatique.

Les récentes avancées scientifiques ont permis d'améliorer les propriétés mécaniques des BTC, leur permettant d'être utilisées dans la réalisation de murs porteurs de plusieurs niveaux. Cependant, ce type de construction est encore peu documenté. Pour garantir une architecture de qualité, durable dans le temps, une attention particulière doit être portée au dimensionnement et à la mise en œuvre des maçonneries en BTC.

C'est pourquoi, au cours de cette étude, nous nous sommes demandés : comment concilier qualité architecturale et confort thermique en construction BTC ?

Afin de répondre concrètement à cette problématique, nous avons fait le choix de concevoir trois archétypes de logement en BTC et d'étudier leur performance structurelle et thermique.

Cette étude se base sur l'analyse des données climatiques, des dispositifs architecturaux et des pratiques sociales burkinabé afin de proposer une architecture adaptée aux besoins des populations locales. Ces analyses sont renforcées par des « focus groups » avec une architecte et un ingénieur burkinabé. Les archétypes développés sont ensuite évalués à l'aide de simulation. Les méthodes utilisées sont qualitatives (focus group) et quantitatives (simulation et analyse de données).

3.2 Cadre de l'étude

La Figure 3-1 illustre le processus de réalisation de cette étude, laquelle se découpe en quatre étapes comme détaillées ci-dessous.

3.2.1 Récolte de donnée

La recherche consiste en premier lieu à collecter des informations qui guideront la conception. Il s'agit d'étudier les propriétés et modes de mise en œuvre des BTC. L'architecture locale et les stratégies de conception bioclimatique recommandées pour le climat burkinabé doivent être étudiées. Des projets exemplaires (menés dans le passé) en BTC et en terre crue dans des climats similaires sont analysés de manière à identifier les bonnes pratiques.

Les données climatiques comme la température, l'humidité, le rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent sont des informations clés, utilisées à différentes étapes de l'étude. Au cours de l'évaluation du confort thermique, les données climatiques sont

importées dans le logiciel de simulation sous le format TMY (Typical Meteorological Year).

3.2.2 Traitement des données

Dans un second temps, nous analysons les données récoltées afin de déterminer les facteurs d'une architecture de qualité. Cela se traduit par l'identification des besoins des utilisateurs, et des contraintes liées au site. Cette étape inclut l'établissement d'un programme et le dimensionnement des espaces associés. Des « focus groups » avec un architecte et un ingénieur burkinabé, permettent de confirmer les besoins habituellement exprimés par la population locale. Ces échanges participent également à déterminer le type de structure et les épaisseurs caractéristiques des éléments porteurs.

Commence alors le prototypage avec la conception d'une première version de plan et de façade. Lors de « focus groups », une architecte burkinabé et un ingénieur spécialisé dans les structures en BTC partagent leurs remarques face aux prototypes. Ce feedback permet d'affiner le prototypage. Une seconde version prenant en compte les retours du « focus groups » est ensuite soumise aux experts pour validation.

3.2.3 Développement d'un instrument

Vient ensuite la conception d'archétypes et le développement de plans, de coupes et de modèles 3D guidés par les analyses faites précédemment. Ces archétypes permettent de répondre à la question : comment intégrer les concepts développés autour de la construction « dense » bioclimatique et modulable dans des plans types, coupes et maquettes numériques disponibles pour les architectes et les populations pratiquant l'auto-construction ?

3.2.4 Validation

Enfin, ce travail inclut des simulations et des calculs pour évaluer la performance, valider la structure, ainsi que le confort thermique de chacun des archétypes.

Pour la validation structurelle, un ingénieur spécialisé dans les BTC effectue des simulations sur le logiciel de calcul par élément fini DIANA FEA (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, 2024). Les résultats de cette simulation évaluent la performance de la structure de chacun des archétypes et permettent de répondre à la question : dans quelle mesure les BTC sont compatibles avec la construction d'habitations de plusieurs niveaux ?

Pour la validation du confort thermique, une simulation des archétypes sur DesignBuilder (DesignBuilder Software Ltd, 2022) est réalisée afin d'évaluer l'inconfort. Différentes solutions sont étudiées pour améliorer les performances thermiques des archétypes. Cette étude permet de répondre à la question : dans quelle mesure une habitation en BTC est performante thermiquement ?

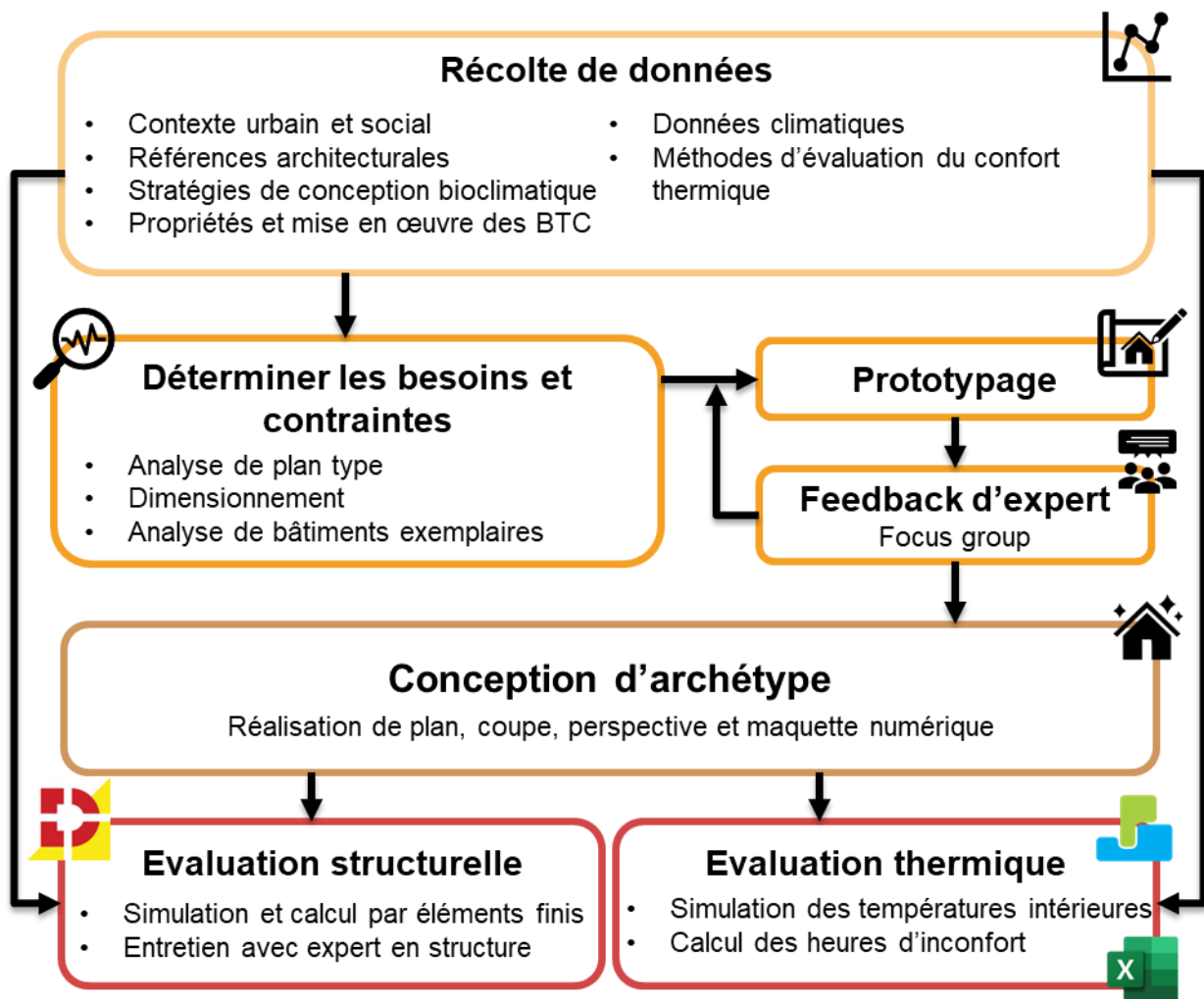


Figure 3-1 : Cadre de l'étude

3.3 Variables et indicateurs

Lors de cette étude, deux aspects de la performance des archétypes développés sont évalués : la structure et le confort thermique. Les variables et les indicateurs étudiés sont répartis dans ces deux catégories. Elles sont synthétisées dans le Tableau 3-2.

3.3.1 Performance structurelle

La charge appliquée à la structure est l'un des principaux facteurs dimensionnant la structure des bâtiments. Pour des habitations, les hypothèses de chargement sont normalisées par le BAEL 92 REVISE 99 (Commission générale de normalisation du bâtiment, 1992). Bien que remplacée par l'Eurocode en Europe, cette norme est toujours utilisée dans certains pays tels que le Burkina Faso. La charge est influencée par la volumétrie du bâtiment en particulier sa hauteur, le nombre d'étages et l'espacement entre les éléments porteurs.

L'étude de la structure est réalisée par un ingénieur à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis DIANA FEA (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, 2024). La simulation est détaillée à l'Annexe 3. Elle permet d'estimer la contrainte à la compression maximale appliquée au mur. Cette valeur représente la résistance à la

compression minimum que le mur en BTC doit atteindre. Sajanthan et al. (2019) ont proposé une adaptation des calculs de dimensionnement prescrits par l'Eurocode 6 (European committee for standardization, 2013) aux maçonneries de terre comprimée. En l'absence de calculs normalisés pour les BTC au Burkina Faso, cette expression a été utilisée dans notre étude. Elle permet de calculer la résistance d'un mur en BTC à partir de la résistance du mortier et des briques utilisées. Cette relation est détaillée par l'équation 1.1 avec f_k la résistance du mur, f_b la résistance des BTC et f_m la résistance du mortier.

$$f_k = 0.25 \times f_b^{1.03} \times f_m^{0.28} \quad (1.1)$$

D'après l'Eurocode 6 (European committee for standardization, 2013), la résistance à la compression d'un mur porteur en BTC R_{cd} se calcule à l'aide de l'équation 1.7 avec f_k la résistance caractéristique à la compression du mur et γ_m un coefficient de sécurité. L'ATEX de Type A n°2588 (ART.TERRE Mayotte, 2018), prévalant en France pour la mise en œuvre de maçonnerie en BTC, préconise l'utilisation de cette équation.

$$R_{cd} = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (1.2)$$

γ_m est issu de l'Eurocode 6 (European committee for standardization, 2013). Ce coefficient tient compte de la dispersion des résistances du matériau et de l'exécution. Sa valeur varie en fonction de la qualité de contrôle mise en place lors de la production et de la mise en œuvre. En particulier, si une inspection initiale et périodique du système de contrôle de production est menée par un organisme tiers alors $\gamma_m=2.7$ sinon

$\gamma_m=3.3$. Dans le cadre de cette étude, $\gamma_m=3.3$, afin de convenir à la totalité des processus de production.

A l'état-limite ultime, la valeur obtenue par simulation de la contrainte en compression des murs en BTC, σ_m , doit être inférieure ou égale à la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales du mur, R_{cd} , de sorte que :

$$\sigma_m \leq R_{cd} \quad (1.3)$$

D'après ces équations, nous pouvons calculer la résistance en compression que les BTC doivent atteindre pour résister à une contrainte appliquée sur le mur avec un mortier donné. La résistance en compression des BTC est l'indicateur permettant d'évaluer la performance de la structure et d'établir leur composition.

A l'aide de ces calculs et des discussions avec un ingénieur spécialisé dans les BTC, nous déterminons la résistance en compression du mortier et le liant à utiliser avec les BTC choisies antérieurement.

Un autre critère à analyser lors des simulations est l'instabilité structurelle. Dans la présente étude une attention particulière a été portée au flambement. Pour l'évaluer, l'élanement du mur est étudié. En l'absence de norme spécifique aux murs porteurs en BTC, les résultats sont comparés aux valeurs spécifiées dans les Eurocodes 6 et 8 (European committee for standardization, 2013). Différentes solutions sont proposées pour limiter les instabilités structurelles.

La présence de joints de dilatation est primordiale dans les murs en BTC. Le positionnement de ces derniers sera déterminé de manière qualitative grâce à des études de cas et un entretien avec un architecte expert en terre crue.

3.3.2 Performance thermique

Pour déterminer les critères de performance à atteindre en termes de confort thermique, le modèle adaptatif sera pris en compte. Cette méthode est recommandée pour l'étude de bâtiments en évolution libre. D'autres études traitant du confort thermique au Burkina Faso ont utilisé le modèle adaptatif (Hema, 2020; Kaboré, 2015; Ouedraogo, 2022).

Le standard ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020) et la norme européenne EN 16798 (European committee for standardization, 2019) recommandent l'utilisation du confort adaptatif pour les bâtiments dont l'ambiance ne peut pas être contrôlée par ses occupants. Ces deux références définissent les valeurs limites du confort adaptatif de manière différente. Les recherches de Attia et Carlucci (2015) ont montré que la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) anciennement EN 15251 (European committee for standardization, 2007), possède une plus grande plage de température acceptable. Cela favorise l'utilisation de la ventilation naturelle et réduit le besoin en refroidissement mécanique qui est associé à une dépendance énergétique. L'étude préliminaire d'un bâtiment test a démontré que l'utilisation de la norme européenne engendre une diminution de plus de 10% des degrés heures pour le climat Ouagalais par rapport au standard ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020). C'est pourquoi, le confort thermique sera évalué par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) dans cette étude. Les archétypes devront atteindre le niveau d'exigence de la catégorie II définie par la norme comme « le niveau normal utilisé pour la conception et l'exploitation »(European committee for standardization, 2019, p13).

Les températures de confort sont évaluées en fonction de la température des jours précédents tout en prenant en compte une estimation du comportement et du ressenti des occupants. Cette approche considère que les occupants adaptent leur habillement et leurs activités aux conditions climatiques.

Pour chaque jour, la température moyenne journalière est calculée d'après la formule 1.4.

$$T_m = \frac{(T_{j-1} + 0.8T_{j-2} + 0.6T_{j-3} + 0.5T_{j-4} + 0.4T_{j-5} + 0.3T_{j-6} + 0.2T_{j-7})}{3.8} \quad (1.4)$$

La température de confort intérieur idéale pour les bâtiments de catégorie II est définie par la température opérative optimale selon l'équation 1.5. L'intervalle de température admissible est défini par les formules 1.6.

$$T_{op} = 0.33 \times T_m + 18.8 \quad (1.5)$$

$$T_{basse} = 0.33 \times T_m + 14.8$$

$$T_{haute} = 0.33 \times T_m + 21.8 \quad (1.6)$$

D'après la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019), pour les bâtiments de classe II la température opérative haute est limitée à 31.7°C, la température basse limite est de 18.1°C.

Pour chacune de ces zones, grâce à des simulations sur DesignBuilder, nous obtenons la température opérative. Elle est définie par la formule 1.7 comme « la moyenne de la température radiative moyenne et de la température ambiante

(température sèche), pondérée respectivement par les coefficients de transfert thermique »(ASHRAE, 2009).

$$T_{op} = \frac{h_r T_{mr} + h_c T_a}{h_r + h_c} \quad (1.7)$$

Les températures opératives horaires obtenues grâce à la simulation sont comparées avec celles calculées d'après les formules 1.6 dans un fichier Excel. Si la température opérative simulée n'appartient pas à l'intervalle admissible alors on estime que les occupants souffrent d'un inconfort thermique.

La vitesse du vent est également une variable qui agit sur le confort thermique des occupants. Pour des bâtiments équipés d'un système permettant aux occupants de contrôler la vitesse de l'air, la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) propose une température de correction. Les valeurs prises par ce facteur sont détaillées dans le Tableau 3-1. La température corrective est additionnée à l'intervalle de confort thermique défini à l'équation 1.4.

Tableau 3-1 : Température corrective

Vitesse de l'air moyenne 0.6 m/s	Vitesse de l'air moyenne 0.9 m/s	Vitesse de l'air moyenne 1.2 m/s
1.2°C	1.8°C	2.2°C

L'indicateur degrés-heures d'inconfort (DH) est utilisé pour mesurer l'inconfort chaud. Il associe la durée à l'intensité des périodes d'inconfort selon la méthode du confort adaptatif. Il est utilisé dans différentes études traitant d'inconfort thermique estival (Kaboré, 2015; Monnier et al., 2022). Aussi nommé « degree discomfort hours » (DDH), cet indicateur est également suggéré par Kordjamshidi (2011) et la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) pour l'évaluation du confort thermique des habitations en évolution libre. C'est pourquoi le degrés-heures est l'indice privilégié pour cette étude. Il s'agit de la somme cumulée des dépassements de température par rapport aux seuils de confort T_{basse} et T_{haute} à chaque pas de temps. Les DH sont calculés d'après les formules 1.8 à 1.10.

$$DH = DH_{chaud} + DH_{froid} \quad (1.8)$$

$$DH_{chaud} = \sum_0^{8760} (T_{op} - T_{haute})_{T_{op} > T_{haute}} \quad (1.9)$$

$$DH_{froid} = \sum_0^{8760} (T_{basse} - T_{op})_{T_{op} < T_{basse}} \quad (1.10)$$

Les variables et indicateurs détaillés précédemment sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-2 : Tableau récapitulatif des variables et indicateurs

Concept	Définition	Variables	Indicateurs
---------	------------	-----------	-------------

Résistance de la structure	Capacité de la structure à rester stable et intacte face aux contraintes, tout en assurant sa fonction et sa sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Répartition des charges • Position des joints de dilatations • Géométries de la structure 	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance en compression des BTC et du mortier • Elancement
Confort Thermique	Ambiance satisfaisant les occupants, sans ressenti de sensation de chaud ou de froid désagréable	<ul style="list-style-type: none"> • Température opérative • Humidité relative • Vitesse de l'air 	<ul style="list-style-type: none"> • Heures d'inconfort • Degrés-heures d'inconfort

3.4 Collecte de données

Cette première étape consiste à récolter l'ensemble des informations susceptibles de guider la conception des archétypes à savoir : les caractéristiques des BTC, les conditions climatiques de Ouagadougou, les stratégies bioclimatiques recommandées pour améliorer le confort thermique des occupants et des références architecturales.

3.4.1 Caractéristiques des BTC

L'étude de la littérature a permis de déterminer la composition, la fabrication et la mise en œuvre traditionnelle des BTC (Rigassi & CRATerre-EAG, 1995a). Ces recherches ont également aidé à documenter le mode constructif, l'appareillage et les bonnes pratiques liées au BTC (Rigassi & CRATerre-EAG, 1995b). L'ATEX de type A n°2588 (ART.TERRE Mayotte, 2018) détaille les caractéristiques et la mise en œuvre de mur porteur en BTC sur deux niveaux.

Pour améliorer les propriétés mécaniques et physiques des BTC, des études ont évalué les effets de différents stabilisants (Sajanthan et al., 2019). En particulier, nous nous sommes intéressés aux recherches menées sur des adjuvants disponibles dans la région de Ouagadougou (Nshimiyimana, 2020).

3.4.2 Climat

Les données climatiques comme la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, l'ensoleillement et la pluviométrie sont des informations clés qui influencent la conception de bâtiments bioclimatiques. Lors de cette étude, nous utilisons des données venant d'un fichier TMY (typical meteorological year) élaboré à partir de relevés faits de 2007 à 2021 à Ouagadougou (Climate OneBuilding, 2024).

3.4.3 Contextes sociaux culturels et références architecturales

La compréhension du contexte urbain, notamment l'organisation spatiale de Ouagadougou, revêt une importance cruciale pour l'intégration des archétypes aux

quartiers préexistants. L'histoire de l'urbanisation de la ville et l'organisation de ces quartiers est documentée par Séré (2020).

Afin de mieux appréhender le contexte architectural à Ouagadougou, nous nous appuyons sur les photographies réalisées par Attia lors d'un voyage en mars 2024. L'analyse de la typologie du bâti existant, réalisée par Séré (2020), est également prise en compte.

L'étude des « modes d'habiter » au Burkina Faso et plus particulièrement dans les grandes villes comme Ouagadougou est un élément primordial pour comprendre les besoins des utilisateurs. Afin de mieux appréhender les usages socio-culturels, nous nous appuyons sur les travaux de Deverin (1999) et les entretiens réalisés avec des architectes burkinabé.

Pour nous guider lors de la conception, nous avons analysé des plans types pour différentes habitations sur le site internet d'un promoteur et constructeur burkinabé (CGE Immobilier, n.d.).

Nous avons également recensé des projets de bâtiments modernes à Ouagadougou, mixant différents types de fonctions (Architecture studio, 2024), (Bâtiment commercial à usage mixte au Burkina Faso - Zaca Ouagadougou, 2018)

Le travail de Kéré est l'une de nos principales références de construction moderne en BTC. Ses réalisations sont documentées sur son site internet (Kéré Architecture, 2024a). Nous nous appuyons également sur des photographies de Attia réalisées lors d'une visite de l'Opéra Village en mars 2024.

D'autres logements bioclimatiques en BTC ont été réalisés dans un climat tropical comme à Mayotte où il existe de nombreux logements collectifs en BTC (Tand'M Architectes, s. d.) (Art Terre Mayotte, s. d.).

Les données utilisées lors de cette étude sont principalement issues de recherches sur Internet, lecture de livres et de normes. Il s'agit d'une récolte de données qualitatives. Différentes sources ont été consultées pour s'assurer de la justesse des éléments. De plus, des « focus groups » avec une architecte et un ingénieur en structure ont permis de valider et d'enrichir nos recherches.

3.5 Analyse de données

Pour commencer, une analyse du climat est réalisée. Il s'agit d'identifier et de caractériser des périodes aux conditions météorologiques homogènes. Ainsi, les contraintes climatiques importantes à prendre en compte lors de la conception sont identifiées en fonction des saisons.

Le programme détaillant les typologies d'habitats, le nombre d'étages, les fonctions et les pièces à inclure dans les archétypes a été élaboré grâce à une analyse des références architecturales. Ce document s'appuie également sur les discussions réalisées lors de « focus group » avec Claudia Malgoubri, architecte burkinabé et Simon-Pierre Joy Salassi, ingénieur spécialisé dans les BTC. Un entretien avec Christian Belinga Nko'o, architecte spécialisé dans les bâtiments en terre crue a également permis d'enrichir l'analyse des données. Les comptes rendus de ces discussions sont disponibles à l'Annexe 1.

Une analyse des plans types (CGE Immobilier, n.d.) est réalisée afin de déterminer la surface cible de chacune des pièces et les adjacences entre elles. Pour chaque typologie de logement, nous étudions 3 plans types. Un tableau comparatif permet de synthétiser les surfaces des différentes pièces. Une moyenne des surfaces est calculée pour chacune des pièces constituant la valeur cible à atteindre lors de la conception. Un graphe d'adjacences est réalisé à partir d'analyses des plans types.

Pour finir, les références architecturales sont analysées afin d'identifier les stratégies bioclimatiques et dispositifs architecturaux mis en place pour garantir un bon confort thermique tout en développant une architecture de qualité.

3.6 Hypothèses de l'étude

Cette section détaille les hypothèses prises lors de cette étude, notamment le choix des archétypes à réaliser.

Face à l'étalement urbain que subit Ouagadougou, il est important de densifier le bâti en privilégiant des habitats à plusieurs niveaux. C'est pourquoi, lors de ce travail, nous avons choisi de nous concentrer sur la conception d'archétypes avec minimum un étage.

Pour limiter l'inconfort thermique des bâtiments, les conditions climatiques de Ouagadougou sont prises en compte dès les premières étapes de conception grâce à l'intégration des principes bioclimatiques. La littérature identifie trois principales stratégies à mettre en œuvre dans les climats chauds et humides tels que celui de Ouagadougou : protéger du soleil, dissiper la chaleur et stocker la fraîcheur.

Les éléments les plus exposés au rayonnement solaire, notamment la toiture et les façades sud, est et ouest, doivent être ombragés pour éviter les surchauffes. Comme recommandé par Joffroy et al. (2017), les toitures des archétypes sont protégées par une sur-toiture à fort albédo. Toutes les surfaces vitrées sont ombragées par des protections solaires extérieures, conformément aux recommandations de ASHRAE (2009).

En outre, lorsque des dispositifs architecturaux le permettent, les murs les plus exposés aux rayons solaires sont protégés des surchauffes, suivant les conseils de Joffroy et al. (2017). De plus, pour limiter la chaleur transmise vers l'intérieur, Hema (2020) recommande d'isoler l'enveloppe. Bien que prescrite par l'UEMOA (2019), l'isolation n'est pas une stratégie courante au Burkina Faso. Cet élément n'est donc pas inclus dans la version originale des archétypes. Néanmoins, dans un second temps, une couche d'isolation extérieure de coefficient de transmission thermique $1.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ comme recommandé par l'UEMOA (2019), est ajoutée aux archétypes afin de mesurer son impact sur les performances thermiques des habitations en BTC.

Pour minimiser les apports solaires, l'architecture développée limite les surfaces vitrées à un WFR de 6 % pour les façades nord et 5 % pour les autres façades comme recommandé par Kaboré (2015). Cependant la littérature diverge à ce sujet. D'après Belinga Nko'o (Annexe 1), la présence de baies plus importantes favorise une meilleure ventilation. Une deuxième version des archétypes comprenant des surfaces vitrées deux fois plus importantes est évaluée dans un second temps. Cela représente un ajout de $2,32 \text{ m}^2$ de surface vitrée.

La ventilation naturelle est utilisée pour dissiper la chaleur. Plusieurs entrées et sorties d'air perpendiculaires aux vents dominants sont conçues, créant ainsi un courant d'air. Des espaces traversants sont imaginés dans chaque logement, privilégiant un flux d'air sur les occupants (Joffroy et al., 2017). L'effet cheminé est exploité en créant des ouvertures placées à des hauteurs différentes (Pouffary & Delaboulaye, 2015).

D'après Geetha & Velraj (2012), il faut privilégier la ventilation nocturne. Cette technique consiste à ouvrir les fenêtres la nuit lorsque les températures descendent, permettant de profiter de la fraîcheur nocturne. Selon Hema (2020), une ouverture des fenêtres entre 22h et 8h permet d'obtenir un meilleur confort thermique à Ouagadougou. Ce scénario de ventilation est appliqué à la version originale des archétypes. Néanmoins, une ventilation continue permet de créer une vitesse d'air sur l'occupant, augmentant son confort. Ce deuxième scénario est testé dans un second temps et comparé avec la ventilation nocturne.

Enfin, pour stocker la fraîcheur, des parois à forte inertie sont utilisées. Tous les murs sont en BTC, un matériau atténuant les variations de température à l'intérieur des archétypes.

Le Burkina Faso est sujet à de fréquentes coupures électriques. L'utilisation d'appareils de climatisation n'est pas viable face à la fiabilité du réseau électrique et aggraverait la situation de ce dernier. De plus, ces technologies ont un impact environnemental important. Cette étude se limite à la conception de bâtiments en évolution libre bien que l'évaluation du confort thermique puisse donner des pistes sur le dimensionnement du futur système de refroidissement.

L'analyse du climat faite grâce au diagramme de Givoni (1992) reproduit d'après (Lenoir et al., 2012), indique que l'utilisation d'un système de refroidissement est nécessaire. Comme détaillé à la section 2.2.3, des systèmes peu énergivores, comme le refroidissement évaporatif, existent (PROFEEL, 2021). Dans les climats humides, comme lors de la saison des pluies à Ouagadougou, ce système doit être couplé à un déshumidificateur afin de diminuer l'humidité relative de l'air (Pouffary & Delaboulaye, 2015).

Le confort thermique dans les climats chauds et humides de l'Afrique de l'Ouest est encore très peu étudié. Les performances thermiques sont évaluées selon le confort adaptatif spécifié par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) en l'absence d'un standard spécifique à la région subsaharienne. En particulier, l'humidité, qui joue un rôle crucial dans le confort thermique, n'est pas considérée dans cette approche. Cela constitue une limitation majeure de cette étude, qu'il convient de garder à l'esprit lors de l'interprétation des résultats.

D'après la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019), la déshumidification n'est nécessaire que dans les climats où le taux d'humidité extérieur est élevé. Elle spécifie des seuils d'humidité relative que les bâtiments doivent respecter s'ils possèdent un système de déshumidification. Pour les bâtiments de classe II l'humidité relative doit être comprise entre 25% et 60%.

Face à l'impossibilité de se rendre sur place, cette étude ne traitera pas de l'acceptation sociale des archétypes par la population. La classification des typologies de logement effectuée par Séré (2020) constitue une référence définissant quatre standings de logement : haut, bon, moyen et bas détaillés dans la section 2.1.3. Pour garantir un habitat de qualité en BTC, les archétypes atteignent les critères

correspondants aux logements de haut standing. Ainsi, ce sont des bâtiments de plusieurs niveaux comme des immeubles ou des duplex. Ils sont réalisés en matériau durable, les BTC étant considérées comme telles si elles sont correctement mises en œuvre. Les archétypes sont équipés de commodités luxueuses comme des WC à chasse d'eau et l'eau courante. Ils disposent d'électricité et de vitrages.

En l'absence de norme spécifique aux BTC, nous nous appuyons sur les coefficients de sécurité établis par l'Eurocode 6 (European committee for standardization, 2013) pour le dimensionnement des murs porteurs en BTC.

La validation structurelle et thermique sont effectuées à l'aide de simulation. Cette méthodologie présente des avantages notables, notamment en termes de flexibilité et d'efficacité. Elle permet de tester rapidement diverses hypothèses et scénarios sans les contraintes physiques et temporelles des expériences réelles. Cependant, ces simulations reposent sur des hypothèses et des simplifications, énumérées en détail à l'Annexe 3 et l'Annexe 4, qui peuvent introduire une certaine marge d'erreur. Il est donc crucial de garder à l'esprit que les résultats obtenus ne sont pas vérifiés par des expérimentations.

En particulier, l'évaluation structurelle est effectuée par une analyse linéaire de la structure en utilisant un macro-modèle. Lors de la simulation, les murs sont représentés de manière homogène sans détailler chaque élément individuel. De plus, dans la mesure où Ouagadougou n'est pas soumis à des tremblements de terre, les simulations effectuées sont statiques. Ces simplifications permettent d'alléger les calculs et limiter le besoin en ressource informatique.

3.7 Critères de qualité

Différentes validations sont effectuées pour garantir la qualité de ce travail. Une étude de la structure et une étude du confort thermique permettent d'évaluer la performance de chacun des archétypes et de vérifier sa faisabilité.

Pour la validation structurelle, des calculs par éléments finis seront effectués par Salassi Simon-Pierre Joy, ingénieur spécialisé dans les BTC et doctorants à l'université de Liège. Les archétypes sont modélisés à l'aide du logiciel Diana FEA (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, 2024) afin d'effectuer une analyse linéaire de la structure. La géométrie, les matériaux et les liaisons entre les éléments modélisés dans le logiciel sont décrits dans l'Annexe 3. La descente de charge encodée est estimée d'après le BAEL (Commission générale de normalisation du bâtiment, 1992). Elle est également détaillée à l'Annexe 3.

Concernant le confort thermique, des simulations sont réalisées sur le logiciel DesignBuilder (DesignBuilder Software Ltd, 2022) à partir des modèles 3D des archétypes et des données climatiques récoltées. Les matériaux utilisés, le scénario de ventilation, l'activité des occupants et leur planning d'occupation seront encodés dans le logiciel. À l'intérieur du bâtiment, différentes zones thermiques sont définies en fonction de l'activité effectuée et leur orientation selon une approche multizone. Les paramètres encodés dans le logiciel sont détaillés à l'Annexe 4.

En complément de l'évaluation du confort thermique des archétypes, une analyse succincte de l'influence des solutions bioclimatiques a été menée. Diverses stratégies passives ont été envisagées lors de la conception des archétypes, certaines ayant été écartées au profit d'autres dispositifs dans la version originale des modèles. Dans un

second temps, ces stratégies sont simulées afin de comparer leur impact sur le confort thermique. En particulier, différents scénarios de ventilation sont mis en parallèle :

- Avec ventilation nocturne : les fenêtres sont ouvertes entre 22h et 8h. La température extérieure est alors inférieure à celle intérieure. Il s'agit du scénario de référence mis en œuvre dans la version original des archétypes.
- Avec ventilation continue : les fenêtres sont ouvertes jour et nuit.
- Sans ventilation naturelle : les fenêtres sont maintenues fermées jour et nuit.

Ajouter des baies permet d'améliorer la ventilation naturelle. L'impact de cet ajout sur le confort thermique est mesuré à l'aide de simulations. Pour ce scénario, les fenêtres existantes sont doublées, ajoutant une surface vitrée supplémentaire de 2,32 m².

L'ajout d'un isolant extérieur est également étudié. Cela permet d'obtenir un coefficient de transmission thermique de 1,1 W/m².°C conformément à la directive 5 de l'UEMOA (2019). Couramment utilisée au Burkina Faso, la laine de verre, avec une conductivité thermique de 0,042 W/m.K, permet d'atteindre ces performances avec une épaisseur de 38 mm. Plus écologique, un isolant en balle de riz, avec une conductivité thermique de 0,102 W/m.K, peut également assurer de telles performances avec une épaisseur de 93 mm.

4 Les archétypes

4.1 Introduction

Cette section présente les archétypes développés au cours de cette recherche. Chaque archétype est décrit en détail et illustré par des plans, des coupes et des perspectives. L'objectif est d'expliquer leur fonctionnement et de voir comment ils répondent de manière innovante aux attentes de la population. Les principes bioclimatiques mis en place pour faire face aux contraintes climatiques et apporter un bon confort thermique seront également détaillés.

Des entretiens avec une architecte burkinabé ont permis de déterminer la taille des terrains destinés à la construction d'habitations. Cette taille dépend des quartiers, elle peut varier de 300 m² à 600 m². Plus imposants, les archétypes 1 et 2 sont implantés sur des parcelles de 20 m par 30 m alors que l'archétype 3 est situé sur un terrain de 20 m par 20 m.

Les archétypes s'implantent dans des quartiers lotis ayant accès à une voirie, au réseau d'eau potable et à l'électricité. L'Archétype 1 et 2 caractérisés par une densité importante, sont destinés à des quartiers du centre ou du péri centre. L'Archétype 3 est conçu pour des zones du péri centre ou de la périphérie.

4.2 Archétype 1

L'Archétype 1 est un immeuble à appartements se développant en R+5 représenté en perspective à la Figure 4-1. Ce bâtiment de 20.6 m de hauteur comprend quinze logements allant du F2 au F4.

Cette architecture propose de densifier les parcelles de manière verticale afin de libérer de l'espace au rez-de-chaussée pour des activités sociales. Les habitations reléguées aux étages sont ainsi mises à distance par rapport à la rue. Implanté sur une parcelle de 600m², l'Archétype 1 permet d'atteindre une densité de population de 0.075 hab/m².



Figure 4-1: Perspective de l'Archétype 1

La Figure 4-2 et la Figure 4-3 représentent les plans du rez-de-chaussée et des étages de l'Archétype 1.

Le rez-de-chaussée est occupé par des locaux commerciaux donnant sur la rue. Une clôture fait office de séparation physique entre l'espace public et semi-privé. Protégé par la clôture, un parking est mis en commun avec des emplacements voitures, motos et vélos. Une buanderie partagée à l'arrière du bâtiment s'ouvre sur une petite cour végétalisée servant de cuisine extérieure. La buanderie est un espace semi-extérieur dont les murs en briques ajourés permettent une bonne ventilation naturelle tout en préservant une certaine intimité. Au centre, une cage d'escalier servant également de patio distribue les différents étages.

Chacun des étages comprend un F2 de 52 m², un F3 de 82 m² et un F4 de 103 m². Bien qu'innovante, cette configuration permet une cohabitation de famille élargie ou de différents foyers comme pratiqué habituellement sur une même parcelle.

L'entrée s'effectue par le séjour qui fait office de pièce de vie familiale. Elle s'ouvre sur un balcon assimilable à la cour intérieure destinée aux activités familiales. Des volets amovibles permettent d'y garantir une certaine intimité. La cuisine est séparée de la pièce de vie pour éviter les odeurs. Les salles d'eau, toilettes et cuisines sont regroupées et alignées de manière à mettre en commun les gaines techniques. L'Archétype 1 est équipé d'eau courante et de commodités luxueuses comme des WC avec chasse séparés de la salle d'eau.

Au dernier niveau, une grande terrasse ombragée de 390 m² joue le rôle de cour extérieure destinée à la sociabilisation. C'est un espace partagé qui pourra être utilisé aussi bien pour des événements ponctuels que dans la vie quotidienne. Les Burkinabé apprécient ce type d'espace le soir lorsqu'il fait plus frais, pour se détendre et se reposer.

Le Burkina Faso possède un climat tropical chaud et sec caractérisé par une saison sèche et une saison des pluies. Les conditions climatiques sont présentées en détail au chapitre 2.1.1.

Lors de la saison des pluies, il est important que les murs en BTC soient correctement protégés des intempéries. En effet, la résistance à la compression des BTC diminue lorsqu'elles sont exposées à de l'eau (ART.TERRE Mayotte, 2018; Nshimiyimana, 2020).

Pour des raisons de durabilité face aux intempéries et aux inondations, la structure du rez-de-chaussée est constituée de poteaux-poutres en béton armé. Les BTC sont utilisées pour le remplissage des murs. Les inondations étant fréquentes à Ouagadougou, il est préférable de ne pas construire en BTC à même le sol. De plus, l'utilisation de poteaux libère le plan, permettant la création d'un parking sous une partie du bâtiment. Cette structure apporte également plus de modularité. En effet, les cloisons entre les locaux commerciaux peuvent être supprimées pour créer un plus grand espace. Aux étages, la structure est assurée par des murs porteurs en BTC.

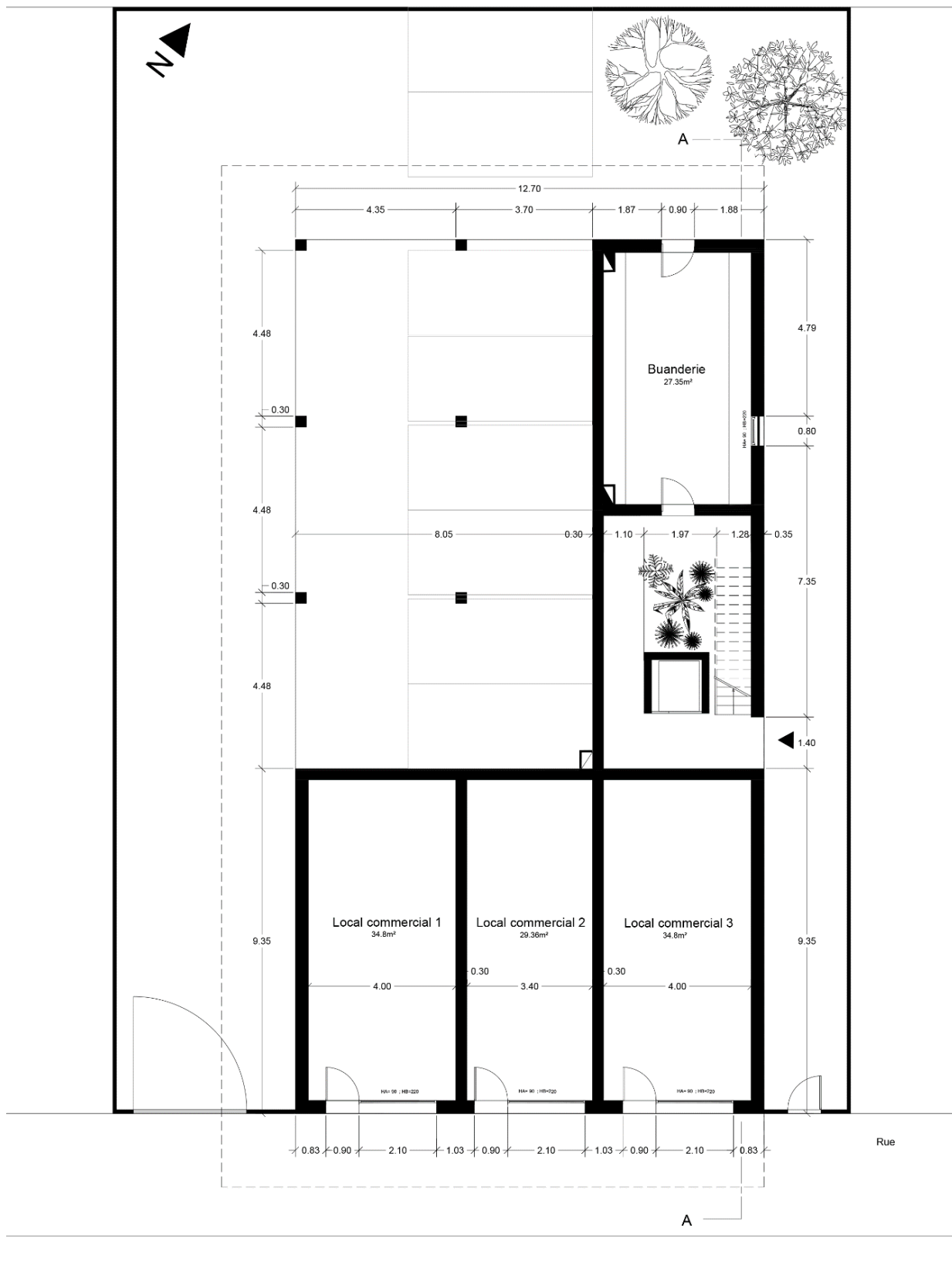


Figure 4-2 : Plan du R0 de l'Archétype 1

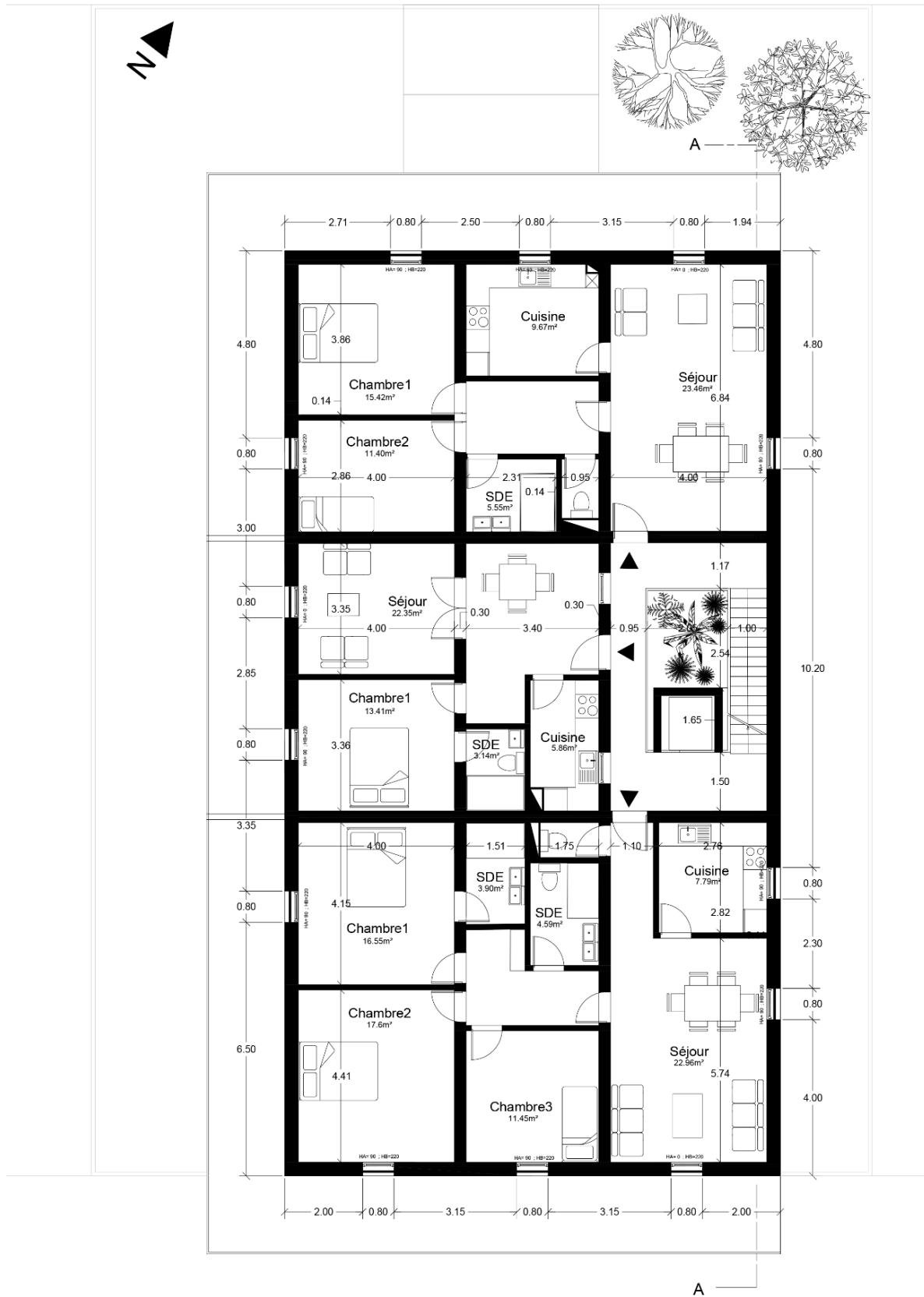


Figure 4-3 : Plan des étages de l'Archétype 1

A chaque étage, des balcons en porte-à-faux abritent de la pluie les murs porteurs en BTC. Seule la façade Nord-Est n'est pas protégée de la pluie par les balcons. Mais étant opposée aux vents fréquents chargés de pluie, elle n'est pas considérée comme exposée aux intempéries d'après l'Atex de type A n°2588 (ART.TERRE Mayotte, 2018).

En période de forte chaleur, il existe trois principales stratégies bioclimatiques pour conserver une température intérieure agréable. Tout d'abord, il faut protéger l'enveloppe du bâtiment du rayonnement solaire, en priorité les baies mais également la toiture et les murs.

Les avancées créées par les balcons apportent de l'ombre sur les façades sud, est et ouest. Ces trois orientations sont les plus exposées au rayonnement direct du soleil. D'importantes surchauffes sont limitées en les protégeant. Des pare-soleils coulissants permettent de moduler l'apport solaire sur les balcons. Sur la Figure 4-4 on peut observer qu'en avril, mois le plus chaud, les baies sont protégées des rayons du soleil jusqu'à 15h30. L'ajout des pare-soleil coulissant permet d'ombrager les ouvertures jusqu'au coucher du soleil. Au dernier étage, la toiture terrasse est ombragée par une seconde toiture en tôle de couleur blanche. Caractérisé par une absorbance solaire de 0.25, cet élément protège le plafond du R+5 du rayonnement solaire.

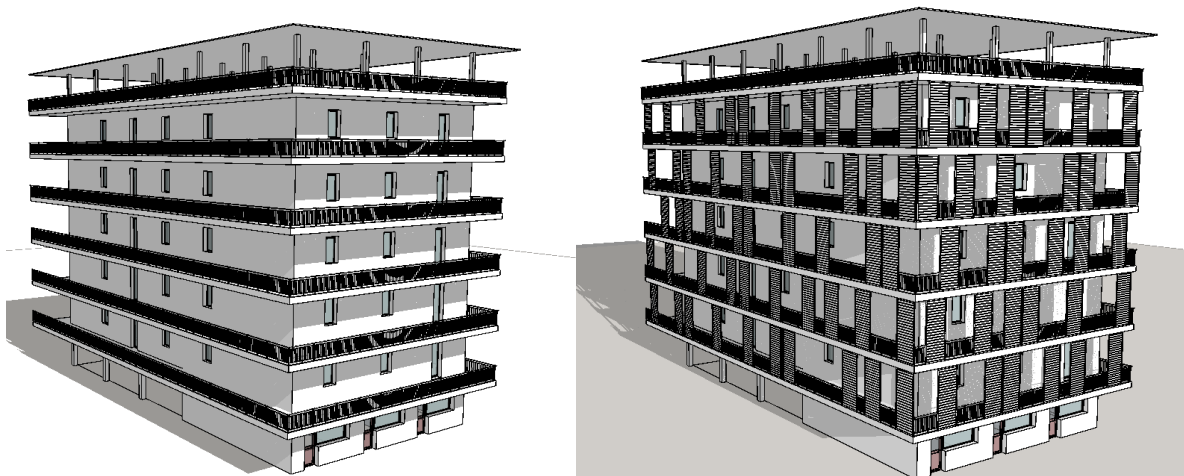


Figure 4-4 : Ombres portées en avril à 15h30 sans pare-soleil et à 17h avec des brise-soleil

La deuxième stratégie bioclimatique est de dissiper la chaleur et de rafraîchir l'intérieur. Pour cela, il faut favoriser la ventilation naturelle. C'est pourquoi tous les appartements sont traversants. Des baies orientées Nord-Est et Sud-Ouest permettent de créer un courant d'air dans le sens du vent dominant. La ventilation naturelle est optimisée en plaçant des « naco » en fer amovible aux fenêtres. Ces stores en persienne permettent la circulation de l'air tout en protégeant l'habitation de la poussière et des intrusions. De surcroît, leur couleur blanche limite l'absorbance du matériau à 0.25.

Chacun des appartements possède une trappe de ventilation vers la cage d'escalier favorisant la ventilation naturelle. Elle fait effet cheminée avec un tirage d'air chaud du bas vers le haut. Des claustras au-dessus des portes intérieures permettent d'assurer un passage de l'air tout en maintenant l'intimité des pièces. Dans la cuisine, les

toilettes et la salle d'eau, un conduit de ventilation évacue l'air chaud, l'humidité et les odeurs en toiture.

Le mur Nord de la cage d'escalier et les murs de la buanderie sont en BTC ajourées. Souvent utilisé par Kéré (Kéré Architecture, 2024b), ce type de mur permet de limiter l'apport solaire tout en favorisant la ventilation naturelle.

Pendant la nuit, les températures chutent de plusieurs degrés. Afin de bénéficier d'une ventilation nocturne efficace, toutes les ouvertures doivent être laissées ouvertes entre 22h et 8h. Il est essentiel de stocker cette fraîcheur pour la journée suivante, ce qui constitue le troisième principe bioclimatique mis en œuvre dans ce bâtiment. Cette approche implique l'utilisation de parois à forte inertie et à déphasage important pour réguler l'ambiance. Ces parois absorbent la fraîcheur pendant la nuit et la restituent pendant la journée. Les BTC sont utilisées à la fois comme enveloppe extérieure et pour les cloisons, ce qui permet d'atténuer les variations de température.

La Figure 4-5 représente une coupe de l'archétype 1.

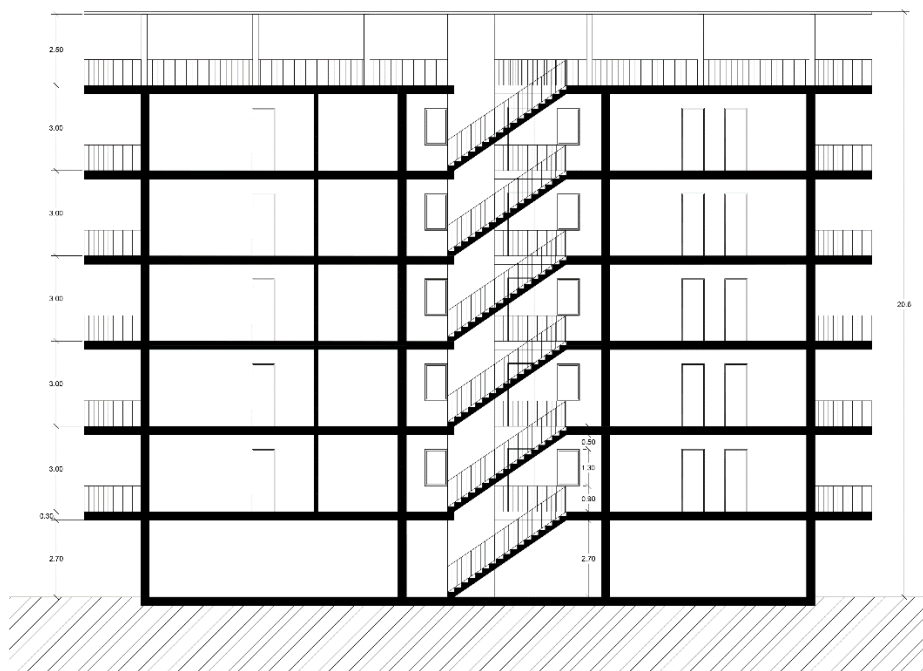


Figure 4-5 : Coupe AA de l'Archétype 1

La dimension des ouvertures est standardisée pour limiter les coûts et apporter de l'esthétisme aux façades. Deux types de baies sont utilisés : des fenêtres à un ouvrant et des portes-fenêtres. La surface vitrée est réduite à un WWR de 6% pour limiter les surchauffes.

Les baies ont une largeur de 80 cm permettant de limiter les apports solaires. D'après Kaboré (2015), la surface vitrée doit faire 5% de la surface de la pièce pour atteindre un bon niveau de luminosité à l'est, l'ouest et au sud. Au nord, un ratio de 6 % est nécessaire. Pour respecter ce ratio, les baies à un ouvrant sont utilisées dans les chambres étant les pièces de vie les plus petites. Alors que les portes-fenêtres, plus

hautes, sont placées dans les séjours nécessitant plus de luminosité. La lumière naturelle pénètre dans une pièce jusqu'à 6 m, c'est pourquoi une deuxième baie est ajoutée dans le séjour. De plus, étant placée dans une autre orientation, elle favorise la ventilation naturelle.

Cependant, de plus grandes surfaces de baies permettent une meilleure ventilation naturelle. En particulier, l'ajout de fenêtres sur la façade Sud-Ouest dans les chambres, permettrait une double orientation favorisant le passage d'un flux d'air. De même dans le séjour, l'ajout d'une deuxième ouverture sur la façade Nord-Est augmenterait encore l'efficacité de la ventilation naturelle. Ces modifications sont facilement envisageables, elles seront étudiées dans un second temps.

Le Tableau 4-1 résume les matériaux utilisés et leurs propriétés.

Tableau 4-1 : Propriétés des matériaux utilisés

Élément	Composition	Épaisseur (cm)	Conductivité (W/mK)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Masse volumique (Kg/m3)
Murs extérieurs	BTC	29	1.01	844	1781
Cloisons	BTC	14	1.01	844	1781
Dalles	Béton armé	30	1.4	1001	2200
Toiture	Tôle d'acier galvanisé	2	50	450	7800
Fenêtres	Simple vitrage Châssis PVC	0.3	0.9	840	2500
		2	0.17	900	1390
Volets, nacos	Acier	2	50	450	7800

4.3 Archétype 2

Les Archétypes 1 et 2 sont très similaires à l'exception de leur hauteur. L'Archétype 2 se développe en R+3 avec une hauteur de 14.6 m. Il accueille 9 logements de différentes typologies. Avec une superficie de 600 m², la parcelle accueille une densité de population de 0.045 hab/m².

La Figure 4-6 représente une vue en perspective de l'Archétype 2.



Figure 4-6: Perspective de l'Archétype 2

Tout comme l'Archétype 1, l'objectif est de densifier la parcelle tout en proposant des espaces communautaires. Les espaces privés, nécessitant davantage d'intimité, sont situés aux étages. Cela met à distance les habitations par rapport à la rue, offrant ainsi une meilleure isolation sonore et visuelle, et favorisant un cadre de vie plus tranquille et sécurisé pour les résidents. En plaçant les espaces privés en hauteur, nous assurons un équilibre harmonieux entre les besoins communautaires et individuels, tout en maximisant l'efficacité et la fonctionnalité de la parcelle.

La Figure 4-7 et la Figure 4-8 représentent les plans du rez-de-chaussée et des étages de l'Archétype 2. Identique à ceux développés pour l'Archétype 1, ils sont détaillés dans la partie 4.2.

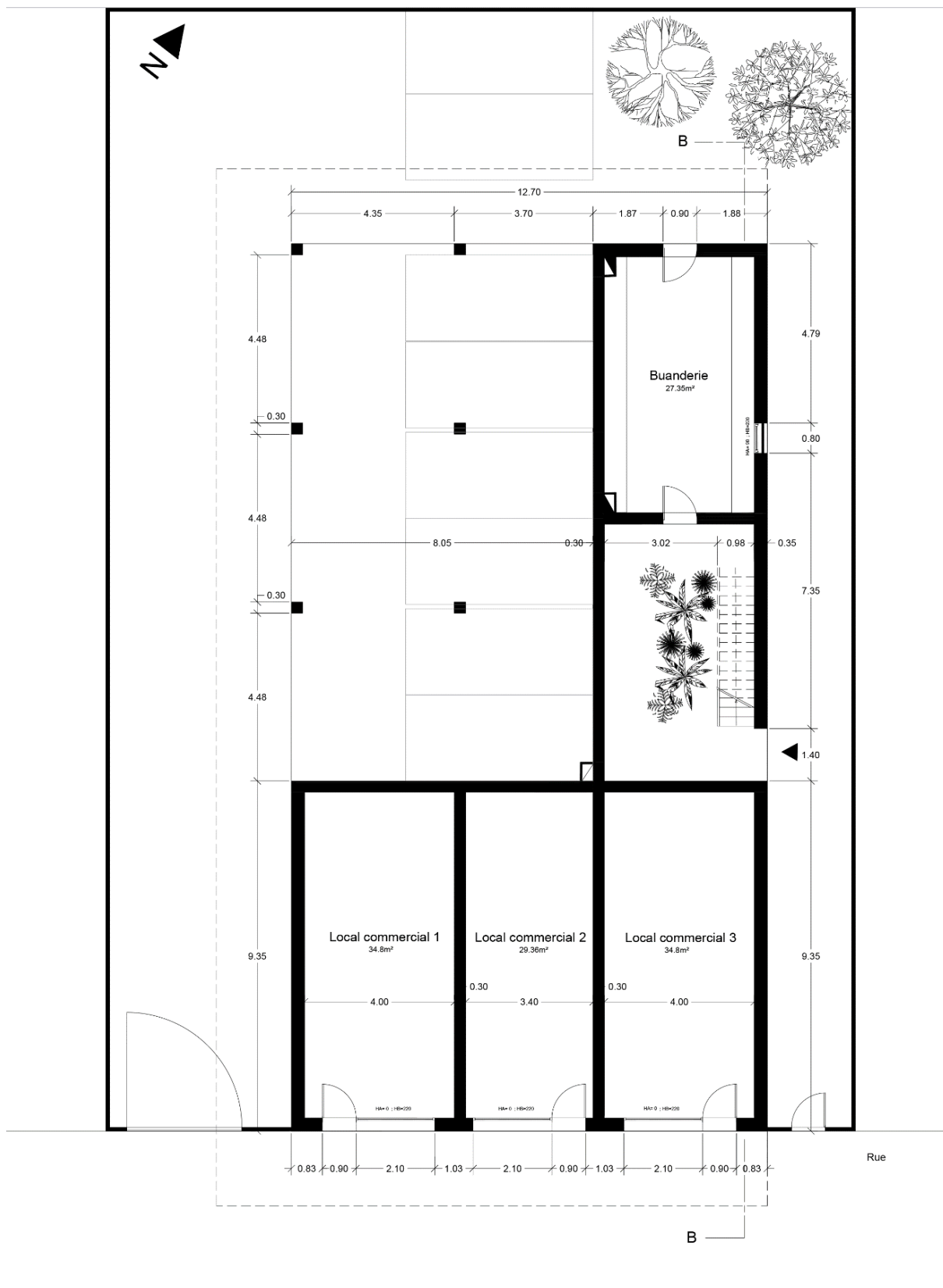


Figure 4-7 : Plan du R0 de l'Archétype 2

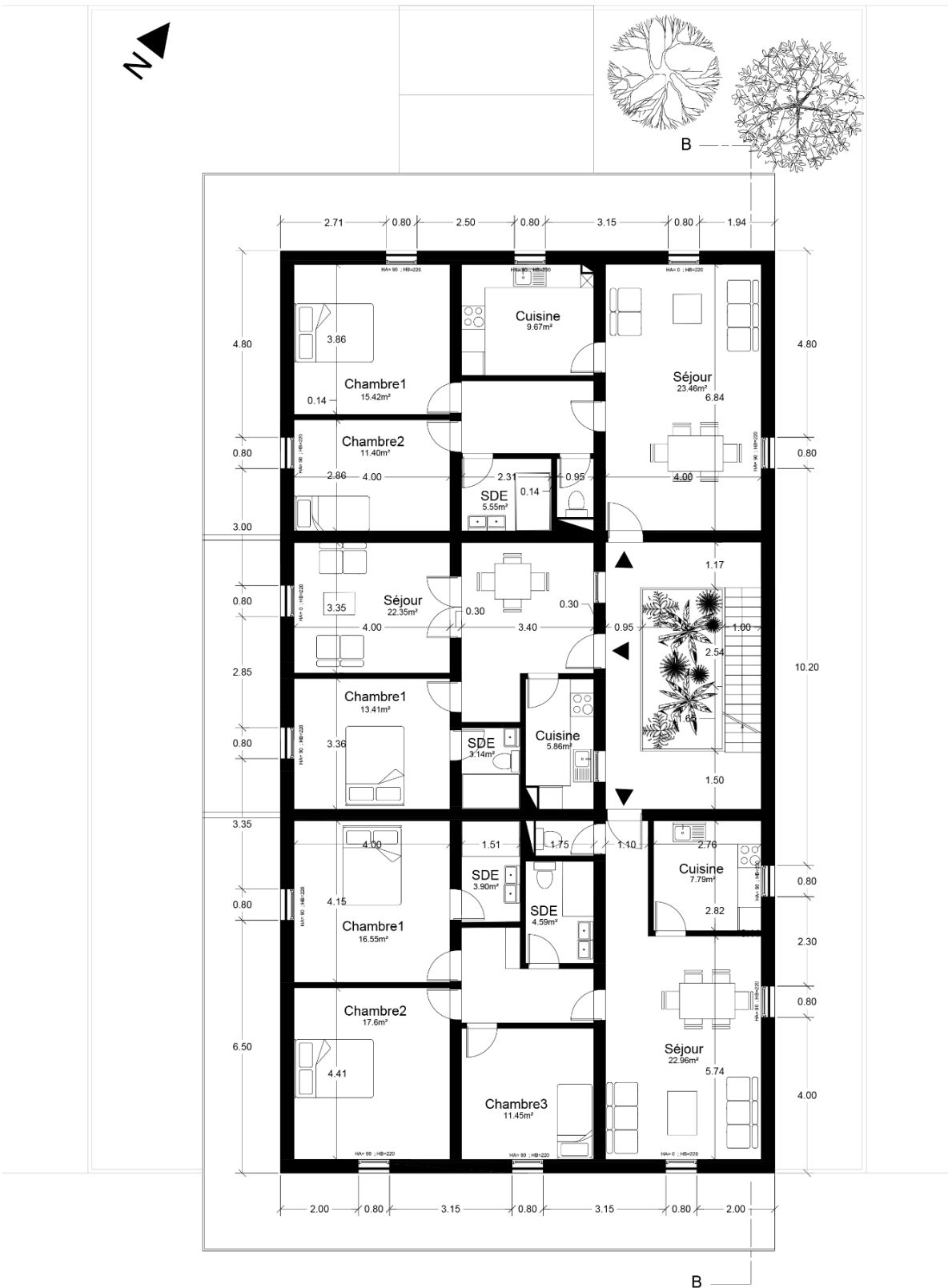


Figure 4-8 : Plan des étages de l'Archétype 2

A l'instar de l'Archétype 1, les différentes stratégies bioclimatiques pour les climats chauds sont intégrées à l'architecture. Notamment, toutes les baies sont protégées du soleil par des brise-soleil en persienne. Les murs sud, est et ouest, très exposés aux surchauffes, sont ombragés par les balcons et des volets coulissants. Au dernier niveau, la toiture terrasse est protégée par une tôle blanche absorbant seulement 25% du rayonnement solaire. La toiture du R+3 est ainsi ombragée et ventilée.

Comme détaillé à la section 4.2, la ventilation est favorisée par des espaces traversants orientés dans le sens du vent dominant lors de la saison chaude. Avec une forte inertie thermique, les murs en BTC permettent d'amortir les variations de température.

Tout comme l'Archétype 1, ce bâtiment correspond à une typologie qualifiée de haut standing. Il intègre des commodités luxueuses comme des WC avec chasse d'eau et fourni l'eau courante.

La Figure 4-9 présente une coupe de l'Archétype 2.

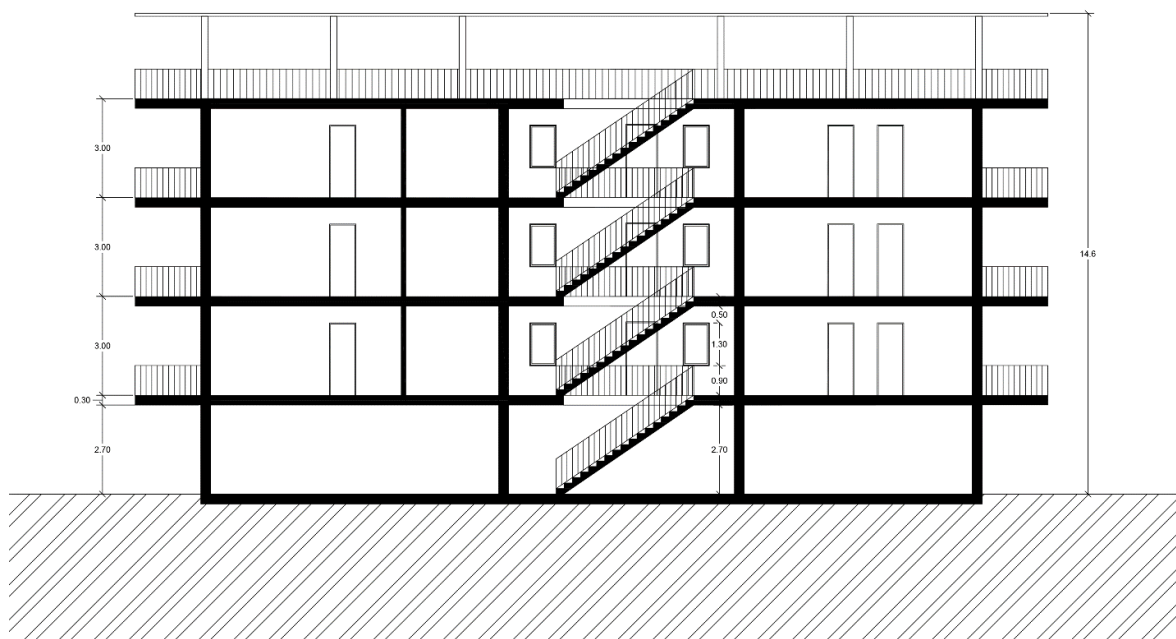


Figure 4-9 : Coupe BB de l'Archétype 2

Tout comme pour l'Archétype 1, les ouvertures sont conçues pour limiter les surchauffes, réduire les coûts et offrir un attrait esthétique à la façade. Leur dimensionnement est détaillé dans la section 4.2.

Les matériaux utilisés et leurs propriétés sont synthétisés au Tableau 4-1.

4.4 Archétype 3

Le troisième Archétype est un logement unifamilial de type F4. Ce bâtiment plus classique est en R+1. Il s'adresse à des familles élargies ou des couples avec enfants. La présence de deux-pièces modulables au rez-de-chaussée permet de proposer différents usages. Il est tout à fait envisageable de les aménager en bureau pour une profession libérale, chambre supplémentaire pour de la famille ou mis en location avec une entrée indépendante.

La Figure 4-10, la Figure 4-11, et la Figure 4-12 représentent une perspective et les plans de l'archétype 3.



Figure 4-10: Perspective de l'Archétype 3

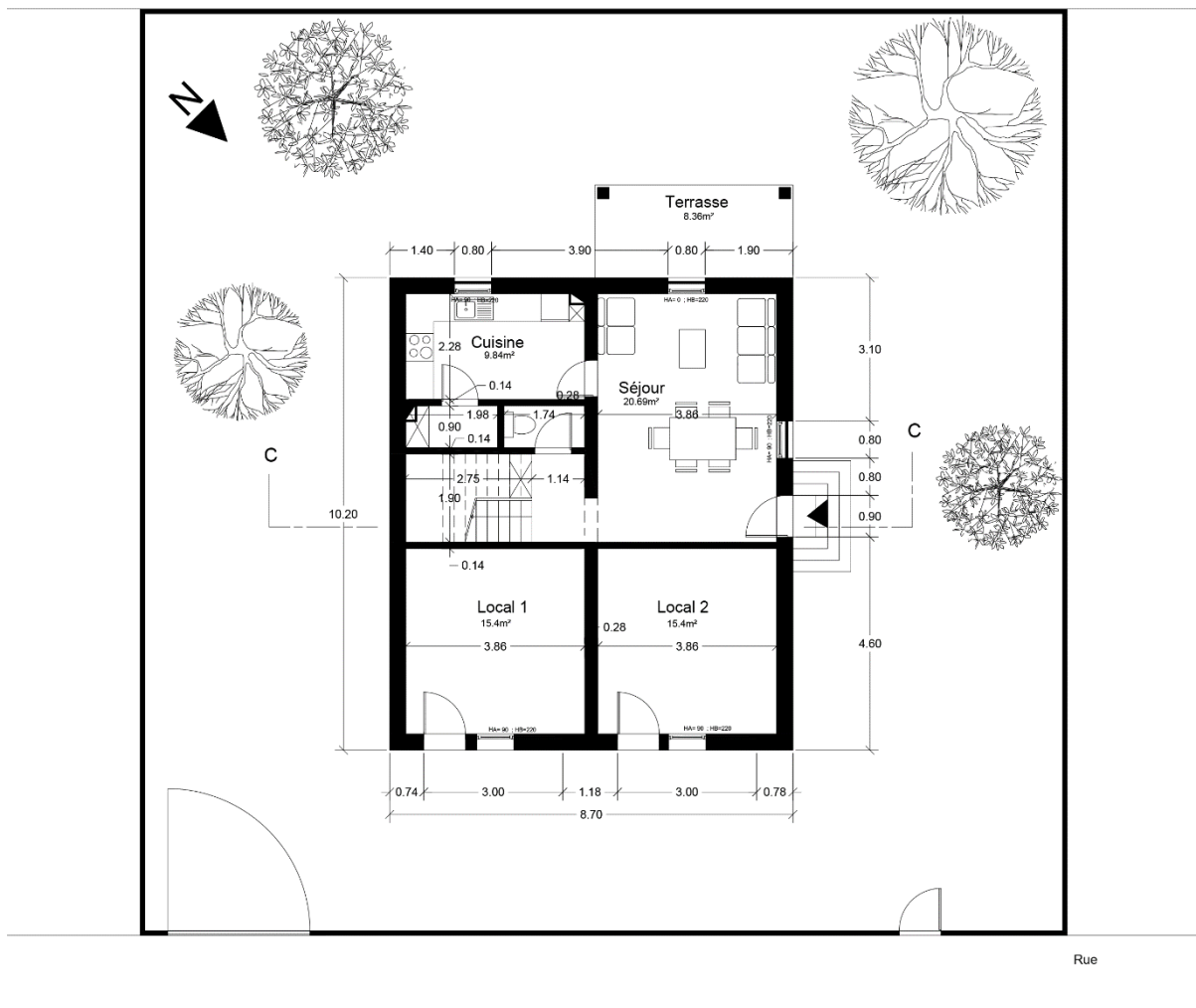


Figure 4-11 : Plan du R0 de l'Archétype 3

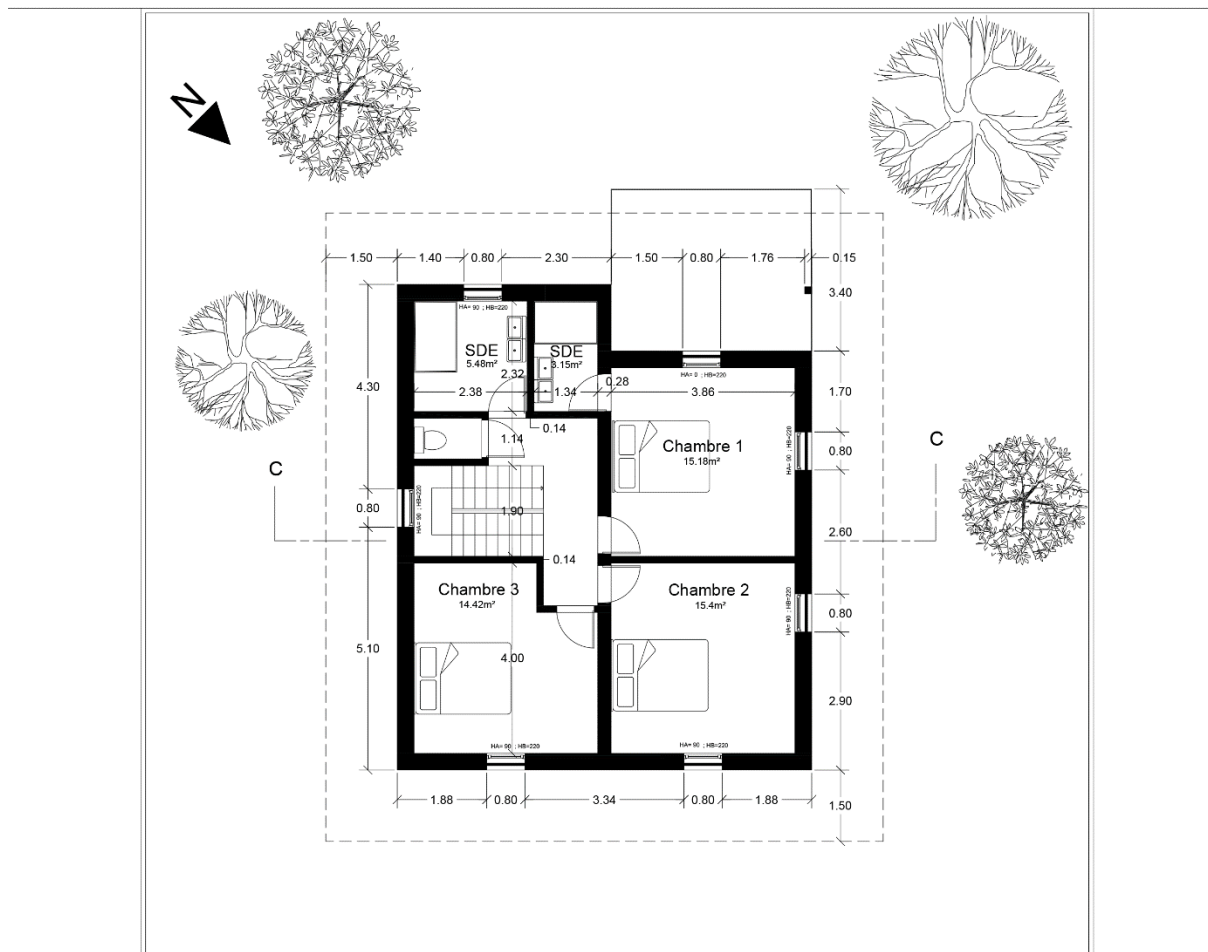


Figure 4-12 : Plan du R+1 de l'Archétype 3

Une clôture permet de séparer la rue de la propriété, une pratique très courante à Ouagadougou. Des voitures, vélos et motos peuvent être stationnés et ainsi protégés le long de l'habitation.

Les espaces de vie sont à l'arrière du bâtiment pour préserver l'intimité. L'entrée se fait sur la façade est, par le séjour qui s'ouvre sur une terrasse ombragée. Elle fait office de cour intérieure où peuvent prendre place les activités familiales. La cuisine est séparée des espaces de vie pour éviter les odeurs.

Une toilette indépendante se trouve au rez-de-chaussée. A l'étage, sont réparties trois chambres, dont une suite parentale possédant un balcon. Les salles d'eau, toilettes et la cuisine sont adjacentes pour faciliter les descentes d'eau. Les occupants ont accès à l'eau courante et à des commodités luxueuses comme un WC avec chasse séparés de la salle d'eau.

Les murs du bâtiment sont exclusivement en BTC. Trois murs porteurs orientés Nord Sud supportent le premier étage et la toiture. Le bâtiment est surélevé de 70 cm pour le protéger des inondations. Cela évite aux BTC d'être en contact avec de l'eau, ce qui diminue sa résistance en compression (Nshimiyimana, 2020).

Une avancée de la toiture permet d'abriter les murs de la pluie tout en les ombrageant durant les périodes les plus chaudes. La terrasse est protégée du soleil par un balcon accessible au premier étage. Cette avancée crée une casquette limitant les apports solaires dans le séjour.

Chacune des baies est protégée par des volets pliants en persienne. Ils permettent de moduler les apports solaires au cours de la journée et des saisons. Utilisés dans plusieurs projets de Kéré au Burkina Faso (Kéré Architecture, 2024b), ces volets peuvent aussi bien servir de casquette ou bien de store en fonction de leur position comme illustré à la Figure 4-13.



Figure 4-13 : Volet pliant en persienne utilisé par Kéré (Kéré Architecture, 2024b)

Tout comme pour les deux premiers archétypes les dimensions des baies sont standardisées pour diminuer les coûts et apporter une cohérence esthétique aux façades. La façade ouest étant la plus exposée aux surchauffes, les ouvertures sont minimisées sur cette façade.

Afin de dissiper la chaleur, une toiture ventilée est réalisée. Il s'agit d'une sur-toiture constituée d'une tôle peinte en blanc inclinée dans le sens du vent dominant lors des périodes les plus chaudes (Nord-Est, Sud-Ouest). Elle permet de baisser la température intérieure de plusieurs degrés en prévenant efficacement les surchauffes. En effet, ce dispositif limite l'absorption du rayonnement solaire à 25% et favorise l'évacuation de la chaleur par ventilation. De plus, elle limite la conduction directe de la chaleur absorbée dans les espaces habités (Joffroy et al., 2017). La toiture ventilée est représentée sur la Figure 4-14 par une coupe de l'archétype 3.

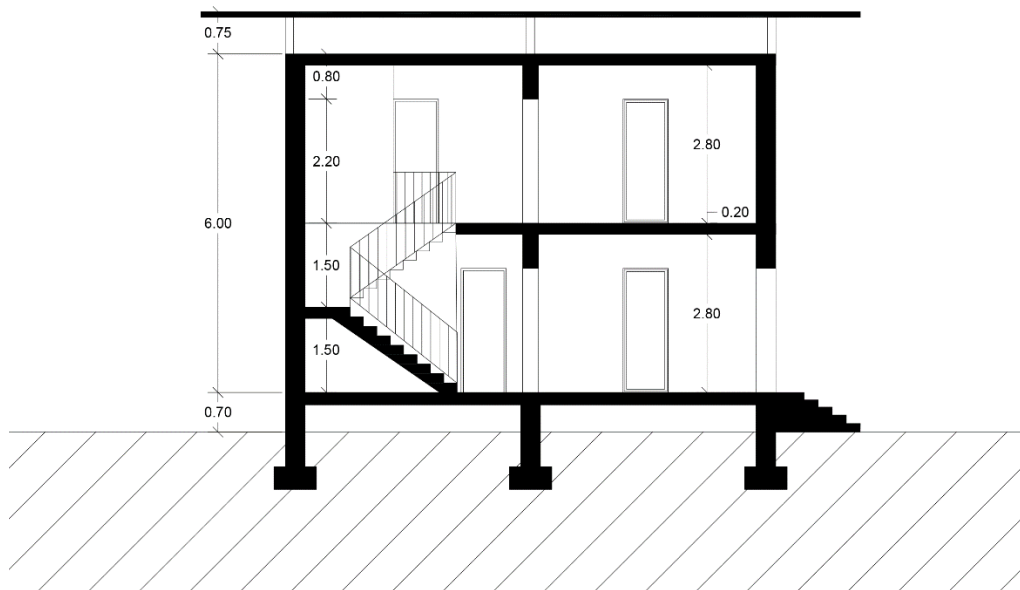


Figure 4-14 : Coupe CC de l'Archétype 3

La ventilation naturelle est optimisée par la création d'ouvertures sur deux façades orientées face aux vents dominants. L'utilisation de naco favorise la circulation de l'air tout en protégeant l'habitation de la poussière et des intrusions. Cette ventilation traversante est créée à chaque niveau pour permettre un écoulement d'air et ainsi évacuer les apports de chaleur. Des claustras installés au-dessus des portes intérieures facilitent la circulation de l'air tout en préservant l'intimité des pièces.

De plus, les chambres et le séjour possèdent des baies sur plusieurs orientations. Les courants d'air créés génèrent une vitesse d'air sur l'occupant améliorant son confort. Une baie en haut de la cage d'escalier permet d'utiliser l'effet cheminée avec un tirage de l'air chaud du bas vers le haut. Dans la cuisine, un conduit de ventilation extrait l'air chaud et les odeurs vers le toit.

Le Tableau 4-1 synthétise les matériaux employés et leurs caractéristiques physiques.

A l'instar des Archétypes 1 et 2, les fondations sont des semelles filantes en béton armé. Un drain permet d'évacuer l'eau de pluie au pied des murs. A chaque niveau, les murs en BTC reposent sur un plancher en béton armé. Un chaînage horizontal en haut de mur supporte le plancher de l'étage supérieur. Ce dernier se prolonge à l'extérieur de l'enveloppe pour créer les balcons des étages comme illustrés à la Figure 4-15.

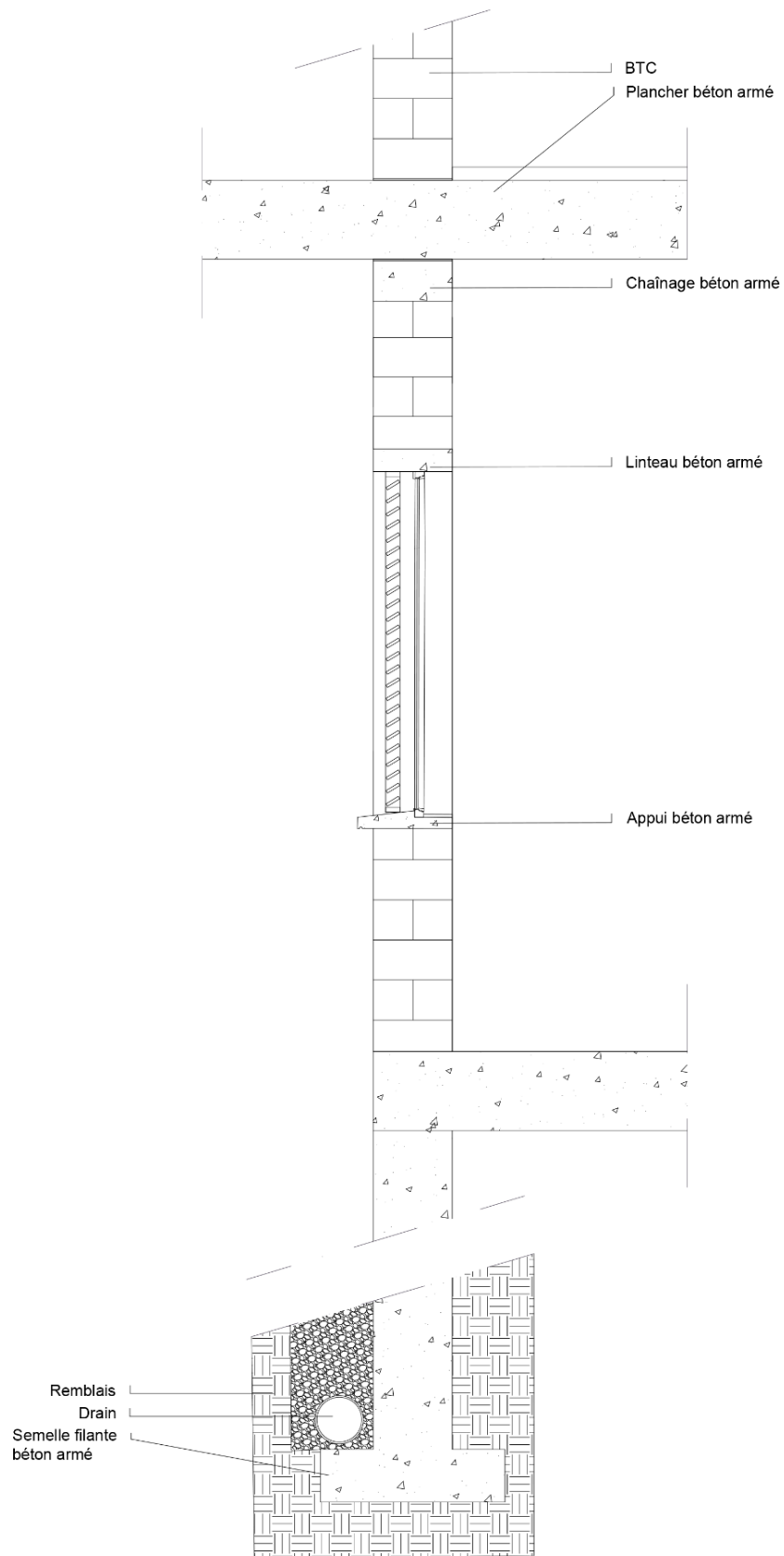


Figure 4-15 : Détail technique d'un mur porteur en BTC

4.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre fournit une présentation détaillée des archétypes d'habitat conçus au cours de ce travail de recherche. Cela permet de mieux appréhender l'intégration des stratégies bioclimatiques et des critères de haut standing dans l'architecture élaborée.

Les Archétypes 1 et 2, correspondant à des bâtiments en R+5 et R+3, se distinguent par leur densité, une caractéristique innovante dans le contexte burkinabé où les immeubles d'appartements sont encore rares. Malgré leur caractère innovant, ces habitations intègrent des éléments culturels locaux, assurant ainsi une architecture adaptée aux habitudes des Burkinabé.

L'Archétype 3, avec sa typologie plus courante, propose une flexibilité élevée grâce à une conception modulable. Cette modularité permet une adaptation facile aux divers besoins des habitants. Cela offre une solution polyvalente, capable de répondre à une large gamme d'usages tout en s'adaptant aux changements dans les modes de vie des occupants.

Un point central de cette étude a été l'intégration des stratégies bioclimatiques dans la conception des archétypes. Pour les climats chauds comme celui de Ouagadougou, des solutions telles que les protections solaires, la ventilation naturelle et les parois à forte inertie ont été mises en œuvre. Les caractéristiques des trois archétypes sont résumées dans le Tableau 4-2.

Ainsi, les archétypes développés dans cette recherche répondent non seulement aux exigences climatiques mais également aux attentes culturelles et sociales des habitants de Ouagadougou.

Tableau 4-2 : Caractéristiques des archétypes

	Archétype 1	Archétype 2	Archétype 3
Milieu	Urbain	Urbain	Périurbain
Surface du terrain	600 m ²	600 m ²	400 m ²
Nombre d'étage	5	3	1
Hauteur	20.6 m	14.6 m	7.8 m
Nombre de Logement	15	9	1
Surface par étage	246 m ²	246 m ²	76 m ²
Surface habitable totale	1230 m ²	738 m ²	152 m ²
Densité de population	0.075 hab/m ²	0.045 hab/m ²	0.015 hab/m ²
WWR	0.059	0.062	0.047
Structure	<ul style="list-style-type: none"> • Poteau poutre en béton armé au RDC • Murs porteurs en BTC aux étages • Dalles en béton armé • Toiture en tôle 	<ul style="list-style-type: none"> • Poteau poutre en béton armé au RDC • Murs porteurs en BTC aux étages • Dalles en béton armé • Toiture en tôle 	<ul style="list-style-type: none"> • Soubassement en béton armé • Murs porteurs en BTC • Dalles en béton armé • Toiture en tôle
Protections solaires	<ul style="list-style-type: none"> • Murs sud, est et ouest ombragés, • Brise-soleil en persienne sur toutes les fenêtres, • Toiture terrasse ombragée 	<ul style="list-style-type: none"> • Murs sud, est et ouest ombragés, • Brise-soleil en persienne sur toutes les fenêtres, • Toiture terrasse ombragée 	<ul style="list-style-type: none"> • Murs du R+1 protégés par le débord de toiture • Brise-soleil en persienne sur toutes les fenêtres, • Sur toiture en tôle
Ventilation	Nocturne (entre 22h et 8h)	Nocturne (entre 22h et 8h)	Nocturne (entre 22h et 8h)

5 Evaluation de la structure

5.1 Introduction

Ce Chapitre est dédié à l'analyse approfondie des murs porteurs en BTC, un matériau de construction utilisé dans les différents archétypes développés dans cette étude. L'objectif est de définir les caractéristiques techniques et les applications spécifiques des BTC dans la réalisation d'habitations de plusieurs étages.

Tout d'abord, nous introduirons les briques de terre comprimée en détaillant leur composition, leurs dimensions standardisées, et les méthodes d'appareillage utilisées pour leur mise en œuvre. Cette section fournira une base essentielle pour comprendre les choix techniques effectués lors de la conception des archétypes.

Ensuite, à l'aide de simulations structurales, nous déterminerons la contrainte en compression requise pour les BTC dans chacun des archétypes. Ces simulations permettent d'identifier les exigences spécifiques en matière de résistance et de durabilité des BTC, guidant ainsi le choix des mélanges de conception. En fonction des caractéristiques attendues pour chaque archétype, nous présenterons les formulations optimales des BTC, en tenant compte des propriétés mécaniques et des conditions climatiques locales.

Par ailleurs, ce Chapitre explorera les propriétés attendues pour le mortier utilisé avec les BTC. Nous définirons sa composition en veillant à ce que le mortier offre une compatibilité adéquate avec les BTC choisies, tout en assurant une performance optimale des structures.

Une section sera consacrée à l'étude du flambement des murs porteurs en BTC, un phénomène critique pour la stabilité des constructions. Nous proposerons des solutions techniques pour minimiser le risque de flambement dans les trois archétypes, en adoptant des stratégies de conception et des renforcements structurels appropriés.

Enfin, nous ferons des recommandations concernant les joints de dilatation, leur positionnement et leur application spécifique aux archétypes étudiés. Les joints de dilatation jouent un rôle crucial dans la gestion des mouvements thermiques et des déformations structurelles, et leur mise en œuvre correcte est essentielle pour la durabilité des bâtiments.

Ce chapitre vise à fournir une compréhension complète et technique des murs porteurs en BTC et de leur application dans la construction d'habitations de plusieurs niveaux à Ouagadougou, en intégrant une approche innovante et adaptée aux défis climatiques et structurels locaux.

5.2 Les briques de terre comprimée

Les BTC sont des blocs de terre moulés. Il s'agit d'une évolution moderne des blocs ou briques d'Adobe utilisés traditionnellement au Burkina Faso et dans de nombreuses régions du monde. Pour améliorer la résistance de ces briques, la terre est compactée à l'aide d'une presse. Depuis son apparition dans les années cinquante, la technologie de production des BTC ne cesse de progresser. A ce jour, elle répond à des exigences de qualité grâce à des tests et des essais scientifiques réalisés tout au long du processus de production. Son utilisation grandissante a permis de définir des principes de conception pour guider les concepteurs et les bâtisseurs.

La composition d'une BTC est très variable puisqu'elle repose sur l'utilisation de la terre présente localement. Au Burkina Faso, ainsi que dans d'autres régions africaines, la latérite est largement répandue. C'est un sol ferrugineux caractérisé par une couche latéritique indurée, d'une épaisseur allant de quelques centimètres à environ 1 mètre, qui recouvre des argiles situées en dessous (dont la taille est inférieure à 63 micromètres). Pour améliorer sa résistance mécanique et sa sensibilité à l'eau, différentes techniques de stabilisation sont utilisées. L'ajout d'additifs est une technique très répandue. Il peut s'agir d'un liant hydraulique comme du ciment, de la chaux ou des résines qui vont intervenir au niveau chimique. D'autres types d'additifs existent. Ils peuvent être d'origine géologique, animale ou végétale et permettent la formation d'une matrice qui lie les particules.

Les BTC sont des éléments de forme parallélépipédique constituant une maçonnerie. Leurs dimensions varient selon les types de presses et les moules employés. Bien que ces produits présentent une grande variété, la tradition de fabrication des blocs de terre comprimée favorise généralement des dimensions permettant de construire des murs d'épaisseurs standard de 15, 30 ou 45 cm.

La forme la plus répandue de BTC est le bloc plein. Ces briques peuvent être entières ou divisées aux trois-quarts ou en demi. Elles sont utilisées pour constituer des murs porteurs ou des cloisons. Il existe également des blocs accessoires qui sont de forme particulière présentant souvent des évitements. Ils sont utilisés en complément des BTC courantes pour réaliser des éléments particuliers de la maçonnerie comme des chaînages, des angles ou des linteaux. Des blocs alvéolaires présentant des évidements sont utilisés dans les régions sismiques pour armer la maçonnerie. Enfin, les BTC de parement sont des blocs pleins plus fins qui permettent de réaliser des revêtements intérieur ou extérieur (ART.TERRE Mayotte, 2018).

Les BTC les plus couramment utilisées font 29,5 x 14 x 9 cm. Ils servent à réaliser différents types de parois comme présenté à la Figure 5-1, ils ont une épaisseur de :

- 9.5 cm maçonnés sur chant
- 14 cm maçonnés en panneresse
- 29.5 cm maçonnés en boutisse

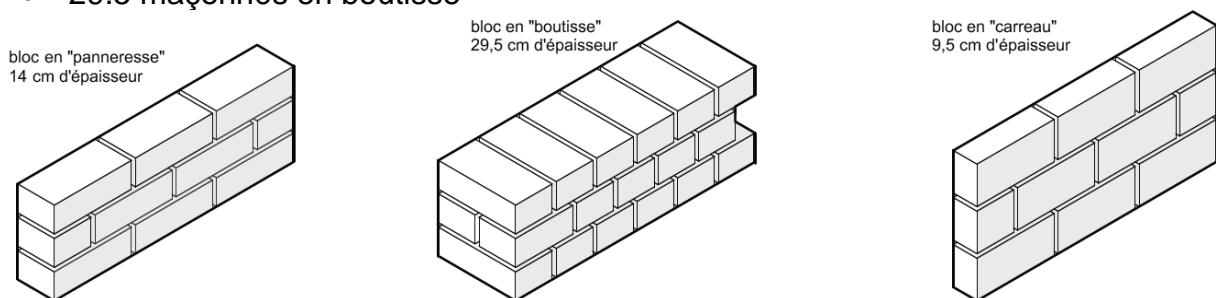


Figure 5-1 : Type de parois en BTC (ART.TERRE Mayotte, 2018)

Les murs porteurs des archétypes sont maçonnés en boutisse, avec une épaisseur de 29.5 cm. Les BTC sont disposées en boutisse sur une première assise puis en panneresse sur la deuxième assise. Cette alternance est répétée sur l'entièreté de la maçonnerie.

Les cloisons intérieures sont des maçonneries de 14 cm d'épaisseur constituées de blocs en panneresse. Afin d'assurer à la maçonnerie un comportement monolithique, les joints sont décalés d'une assise à l'autre. Ils ne doivent en aucun cas être alignés

pour éviter la propagation de fissures. D'après l'Atex de type A n°2588 (ART.TERRE Mayotte, 2018), les joints verticaux doivent toujours être décalés d'au moins un quart de la longueur d'une brique.

Les propriétés des BTC varient grandement en fonction de leur composition. Le Tableau 5-1 résume ses principales caractéristiques.

Tableau 5-1 : Caractéristiques principales des BTC

Caractéristiques	Unités	BTC
Forme et taille		
L x l x h	cm	29.5 x 14 x 9
Résistance en compression	MPa	1 à 12
Coefficient de dilatation thermique	/K	6 à 12 10 ⁻⁵
Isolation thermique	W/m°C	0.81 à 1.04
Masse volumique	Kg/m ³	1 700 à 2 200

Les propriétés que doivent atteindre les BTC utilisées pour la construction des archétypes sont définies dans les chapitres suivants.

5.3 Résistance à la compression

Des simulations sont réalisées à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis DIANA FEA par un ingénieur en structure, Salassi Simon-Pierre Joy. Elles permettent d'évaluer la contrainte en compression σ_m des murs porteurs en BTC pour chacun des archétypes selon les hypothèses détaillées à l'Annexe 4. Comme expliqué au chapitre 0, des éléments architecturaux permettent de protéger les murs en BTC des intempéries. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que les BTC ne sont pas en contact avec l'eau. Cette section se limitera à l'étude de la résistance en compression dans des conditions sèches. Les résultats obtenus pour l'Archétype 1 sont présentés par la Figure 5-2.

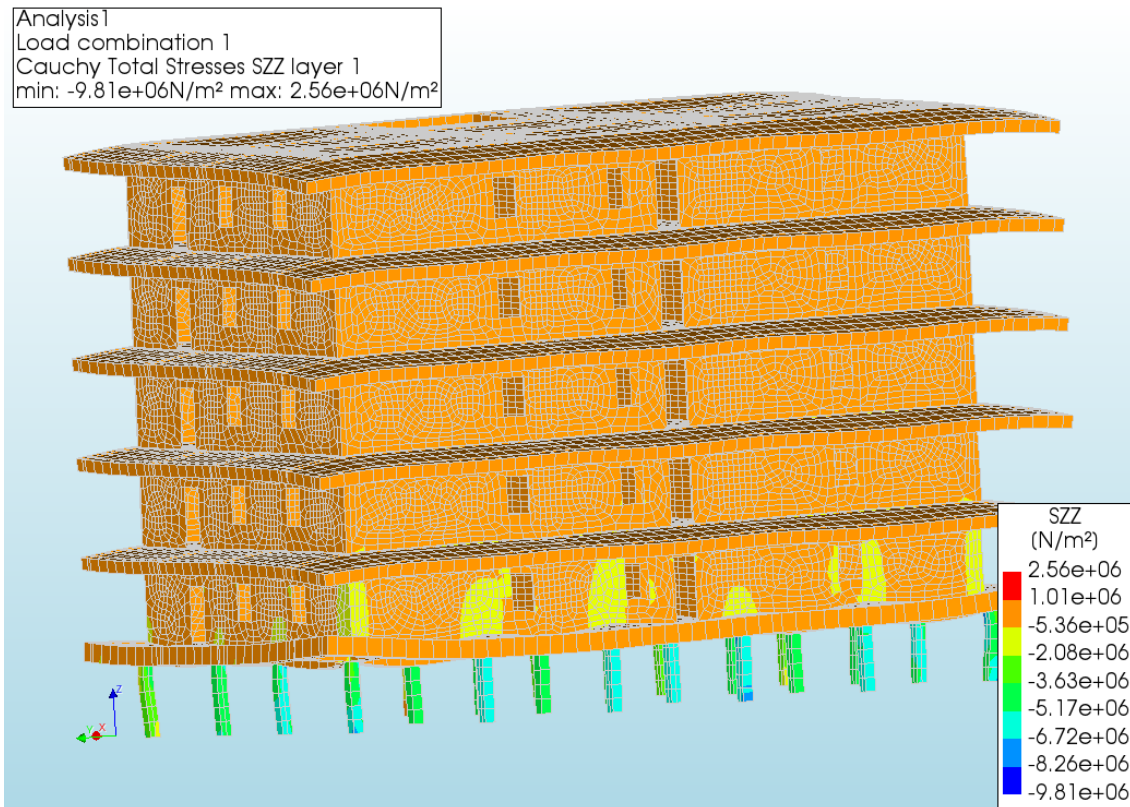


Figure 5-2 : Contrainte en compression de l'Archétype 1

La contrainte en compression augmente avec la charge appliquée sur la structure (en valeur absolue). Les niveaux inférieurs sont les plus contraints comme le montre la Figure 5-2. Mis à part le rez-de-chaussée qui est en structure poteaux poutres en béton, les murs les plus contraints sont ceux du R+1. Ils ont été isolés afin d'en extraire la contrainte en compression appliquée à la maçonnerie en BTC de manière plus précise.

La Figure 5-3 présente les détails de la distribution des contraintes dans le mur porteur du R+1. Comme le montre cette figure, la contrainte maximale en valeur absolue est de 3.24 MPa (en bleu) mais elle n'est présente que très localement aux angles des baies et des murs. Ces éléments seront renforcés par des raidisseurs et des linteaux qui seront dimensionnés en conséquence. La contrainte maximale prépondérante dans les murs du R+1 est de 1.7 MPa (en vert).

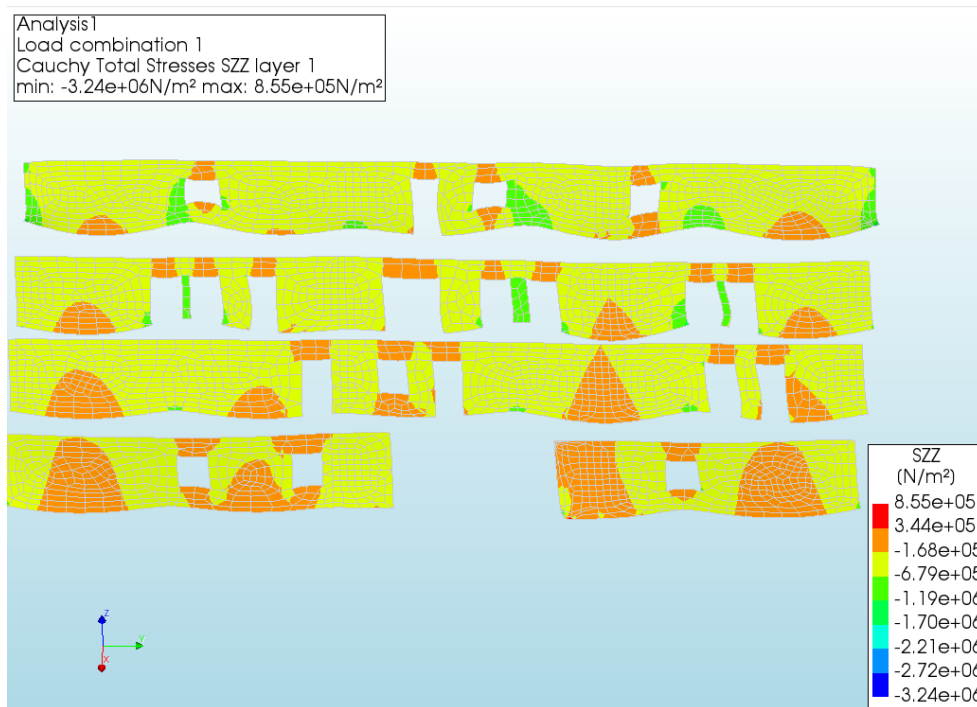


Figure 5-3 : Contrainte en compression dans les murs du R+1 de l'Archétype 1

De même pour l'Archétype 2, la contrainte en compression des murs du R+1 est représentée à la Figure 5-4. La contrainte maximum prépondérante étant de 0.646 MPa.

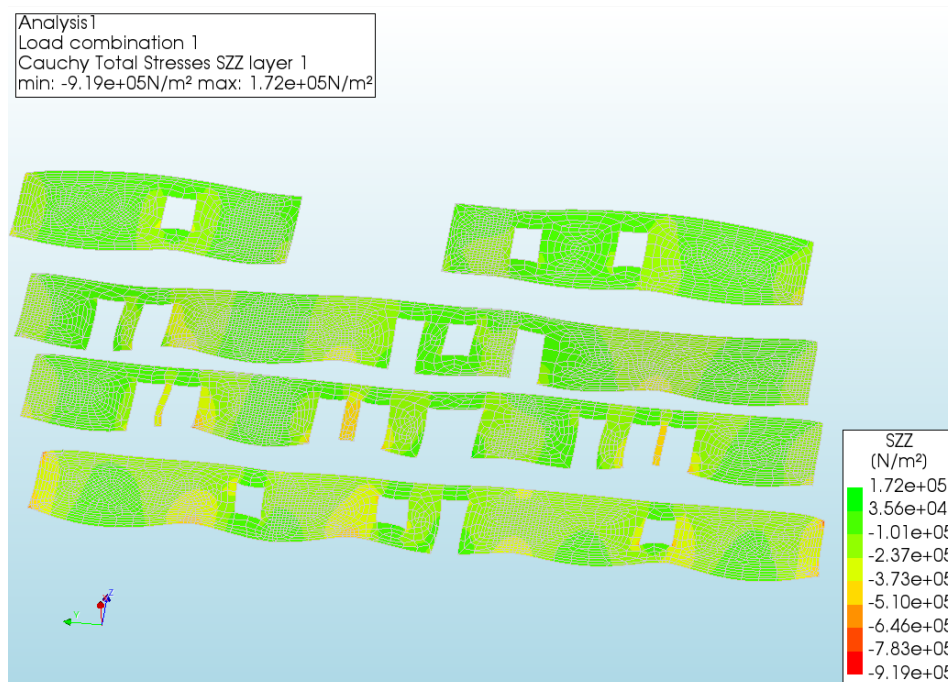


Figure 5-4 : Contrainte en compression dans les murs du R+1 de l'Archétype 2

Pour l'Archétype 3, les résultats des simulations sont représentés par la Figure 5-5. Les murs porteurs du rez-de-chaussée étant les plus contraints, ils sont isolés à la Figure 5-6. La contrainte maximale prépondérante est de 0.137 MPa.

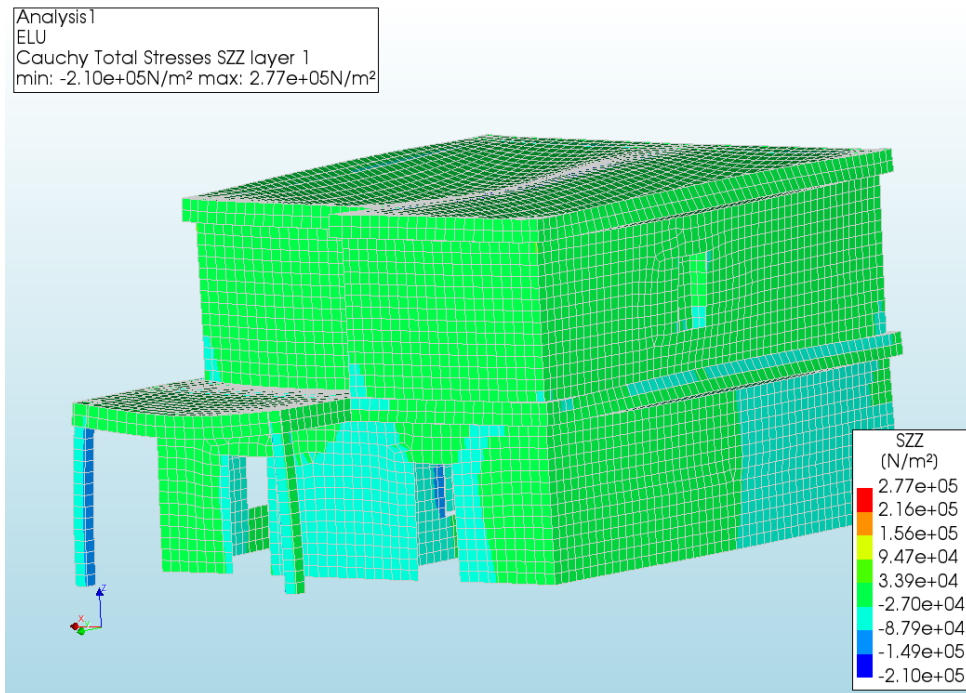


Figure 5-5 : Contrainte en compression de l'Archétype 3

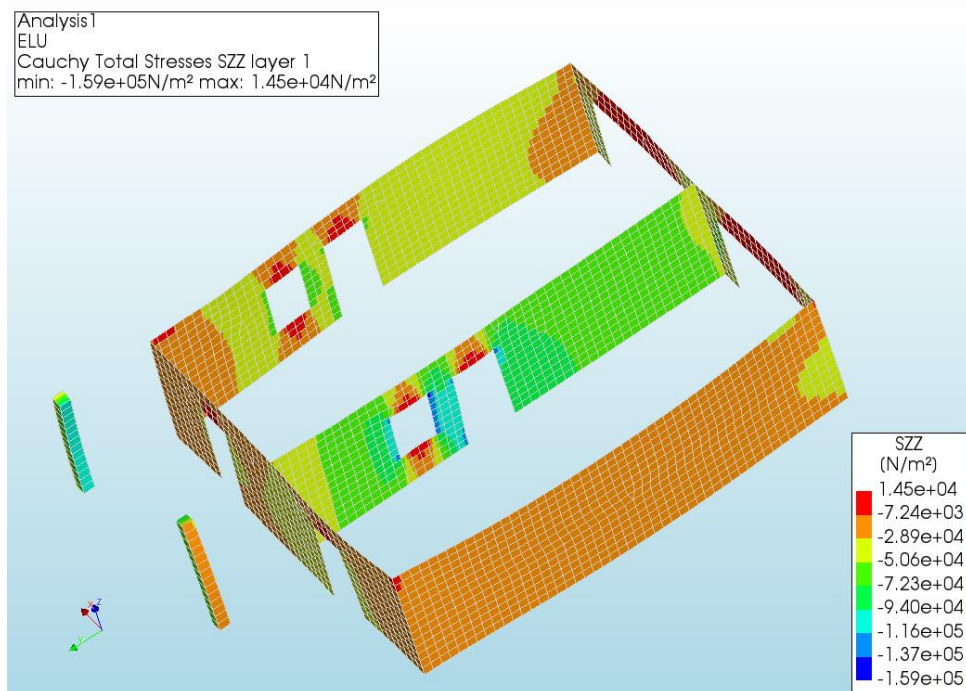


Figure 5-6 : Contrainte en compression dans les murs du R+1 de l'Archétype 3

Pour chacun des archétypes, les résultats des calculs détaillés dans la méthodologie, au Chapitre 3.3.1, sont représentés dans le Tableau 5-2. Le choix du mortier est expliqué au Chapitre 5.4.

Tableau 5-2 : Résistance et contrainte en compression des BTC, mortiers et de la maçonnerie pour chacun des archétypes

	Archétype 1	Archétype 2	Archétype 3
Contrainte en compression maximum σ_m (MPa)	1,7	0,65	0,14
Résistance à la compression du mur porteur en BTC R_{cd}(MPa)	1,71	0,66	0,15
Résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie f_k (MPa)	5,63	2,15	0,48
Résistance à la compression du mortier f_m (MPa)	10	4,4	1,5
Résistance à la compression des BTC f_b (MPa)	11	5,4	1,7

Le Tableau 5-3 présente les mélanges de stabilisant à utiliser pour la fabrication des BTC en fonction des propriétés requises d'après les recherches menées par Nshimiyimana (2020).

Tableau 5-3 : Matrice de sélection des mélanges de conception (stabilisants ajoutés à la terre) sur la base des propriété requises pour les BTC stabilisés (Nshimiyimana, 2020)

Mix design	Physico-mechanical properties					Thermal properties					Hydric properties				Durability indicators						
	ρ	TP	Redry	Rewet	CSE	E	Cap	λ	a	Depth	WAP	Ab24h	Ca10min	Sorp.	Cb	DE	EA				
(a)																					
10CCR+0fiber	1689	39	4.3	2.7	2528	+++	1159	915.7	0.84	5.4E-07	0.12	-	33	20	10	0.071	-	12	5	15	+
10CCR+0.2fiber	1658	39	3.7	1.4	2242	+++	1080	908.5	0.76	5.0E-07	0.12	-	35	21	11	0.081	+	14	6	13	+
10CCR+0.4fiber	1645	39	3.7	1.3	2224	+++	1055	811.6	0.83	6.1E-07	0.13	*	35	22	11	0.084	++	14	10	20	+
10CCR+0.8fiber	1616	40	3.7	1.2	2316	+++	983	885.3	0.66	4.6E-07	0.11	--	36	22	13	0.079	+	10	7	21	+
10CCR+1.2fiber	1612	40	3.5	1.3	2170	++	953	915.2	0.63	4.2E-07	0.11	--	36	22	16	0.075	*	18	7	10	++
Standards requirements			>2	>1	The higher, the better (one-storey building)		>920	<1		The lower, the better		<20	<20		The lower, the better	>5	<120		The higher, the better		
(b)																					
0CCR	1801	34	1.1		609	----	1291	899	1.02	6.3E-07	0.13	*						1			*
5CCR	1711	37	3	1.6	1753	*	1152	922	0.83	5.3E-07	0.12	-	33	19	11	0.073	*	3	7	41	*
10CCR	1689	38	4.3	2.7	2546	++++	1159	916	0.88	5.7E-07	0.12	-	33	20	10	0.076	*	12	5	15	++
15CCR	1573	42	4.6	1.9	2924	+++++	1084	957	0.78	5.2E-07	0.12	-	34	22	10	0.071	-	16	5	3	++
20CCR	1522	44	4.4	1.8	2891	+++++	1107	966	0.85	5.8E-07	0.12	-	35	23	12	0.084	++	20	5	9	+++
25CCR	1477	45	4.5	1.7	3047	+++++	1010	997	0.69	4.7E-07	0.11	--	36	24	13	0.084	++	27	4	4	+++
Standards requirements			>4	>2	The higher, the better (two-storey building)		>920	<1		The lower, the better		<20	<20		The lower, the better	>5	<120		The higher, the better		
(c)																					
20:0CCR-RHA	1522	44	4.4	1.8	2890	+++++	1111	966	0.83	5.8E-07	0.12	-	35	23	12	0.084	++	20	5	9	++
18:2CCR-RHA	1597	41	6.4	2.4	3999	+++++	1042	942	0.73	4.9E-07	0.12	-	36	23	11	0.056	----	27	6	9	+++
16:4CCR-RHA	1613	40	7.0	2.7	4357	+++++	974	939	0.64	4.1E-07	0.11	--	36	23	12	0.071	--	46	5	16	++++
14:6CCR-RHA	1619	39	6.8	2.3	4181	+++++	1009	933	0.69	4.7E-07	0.11	--	36	23	11	0.078	+	39	5	17	++++
12:8CCR-RHA	1623	39	6.0	1.9	3667	+++++	1081	880	0.86	6.3E-07	0.13	*	38	24	11	0.089	++	70	7	27	+++++
8CEM	1781	37	6.2	3.1	3493	+++++	1231	844	1.01	6.8E-07	0.14	++	29	16	8	0.045	----	70	4	7	+++++
Standards requirements			>6	>3	The higher, the better (two-storey building)		>920	<1		The lower, the better		<20	<20		The lower, the better	>7	<120		The higher, the better		

p: Bulk density (kg/m³), TP: Total porosity (%), Redry: Dry compressive strength (MPa), Rewet: Wet compressive strength (MPa), CSE: Coefficient of structural efficiency (J/kg), E: Thermal effusivity (J/m².K.s^{0.5}), Cap: Thermal capacity (J/kg.K), λ : Thermal conductivity (W/m.K), a: Thermal diffusivity (m²/s), Depth: Depth of thermal penetration (m), WAP: Water accessible porosity (%), Ab24h: Water absorption in 24 at saturation (%), Ca10min: Coefficient of capillary absorption in 10 min (g/cm²), Sorp: Sorptivity (g/cm².min^{0.5}), Cb: Coefficient of abrasion (cm²/g), DE: Depth of erodability (mm), EA: Percentage of Eroded area (%)

* Benchmark + Increasing with respect to (*) - Decreasing with respect to (*) Acceptable/ considerable Values do NOT comply with the standard

D'après Nshimiyimana (2020), les BTC préconisées pour les bâtiments de deux niveaux sont des BTC stabilisées avec du résidu de carbure de calcium. Il s'agit d'un sous-produit de la production de gaz acétylène par hydrolyse du carbure de calcium produit par des industries locales. L'Archétype 3 nécessite des BTC avec une résistance à la compression de minimum **1.7 MPa**, ce qui est le cas des BTC 10CCR.

Pour des bâtiments de trois niveaux, cette étude recommande d'utiliser des BTC stabilisées avec des résidus de carbure de calcium et des cendres de balle de riz. La résistance à la compression des BTC 16:4CCR:RHA est de 6.4 MPa. Elle est bien supérieure à **5.4 MPa**, celle calculée pour l'Archétype 2, et conviennent donc pour ce bâtiment.

La résistance à la compression des BTC calculée pour l'Archétype 1 est de **11 MPa**. Cette valeur est trop importante pour pouvoir utiliser des BTC stabilisées avec des sous-produits présentés par Nshimiyimana (2020). Il faudra utiliser des BTC stabilisées avec du ciment, leur résistance en compression peut atteindre jusqu'à 12 MPa (Sajanathan et al., 2019). Ces BTC permettent de construire des bâtiments plus hauts et denses comme l'Archétype 1 mais, étant composées de ciment, leur impact sur l'environnement est plus important.

Comme la contrainte en compression augmente avec la charge appliquée sur la structure, les niveaux supérieurs sont moins contraints. Lors de cette étude, les BTC sont dimensionnées pour le niveau le plus contraint. Mais les BTC utilisées aux étages supérieurs ont besoin d'une résistance à la compression moins importante. En isolant chaque étage, il est possible de déterminer la résistance en compression des BTC par étage et ainsi d'adapter leur composition.

5.4 Mortier

Les murs en BTC sont composés de blocs liés entre eux par du mortier. Il s'agit d'un mélange de sable, d'eau et de liant qui assure la cohésion entre les éléments de maçonnerie. Le rôle du mortier est de garantir une bonne liaison mécanique tout en transmettant les charges aux BTC. Il assure la distribution de ces charges sur toute la surface des briques. En outre, le mortier doit pouvoir accepter la déformation et présenter une bonne cohésion avec les éléments de maçonnerie (Rigassi & CRATerre-EAG, 1995b).

Tout comme pour la maçonnerie de pierre et de brique cuite, les performances de la structure en BTC dépendent aussi bien des caractéristiques des BTC que du mortier utilisé. Il existe à ce jour encore peu de recherches sur les mortiers préconisés pour la réalisation de mur porteur en BTC. Néanmoins, les chercheurs s'accordent sur le fait que les mortiers de terre ou de terre stabilisée sont à privilégier (P'Kla et al., 2003). En effet, le mortier utilisé doit avoir des caractéristiques mécaniques et hygrométriques similaires aux BTC. Ainsi, quand le mur se corrode avec l'abrasion du vent, du frottement humain, les deux matériaux s'usent de manière uniforme. De plus, les mortiers contenant de la terre montrent une meilleure adhérence avec les BTC dans des conditions humides (Kolawole et al., 2020).

Pour des BTC stabilisées avec un liant, l'ATEX de type A n°2588 (ART.TERRE Mayotte, 2018) préconise l'utilisation du même liant avec un dosage majoré de 1.5 à 2 fois. Ce dosage est également recommandé par Rigassi & CRATerre-EAG (1995b), ils conseillent l'utilisation d'un mortier ayant une résistance à la compression et à l'érosion similaire aux BTC utilisées. Un mortier ayant une résistance supérieure ne s'adaptera pas aux déformations, ce qui expose les BTC à un risque de fissuration. D'après le code brésilien ABNT NBR 15961-1 pour des maçonneries de bloc de béton creux, il est recommandé d'utiliser des mortiers ayant une résistance à la compression maximale de 70 % de celle des blocs.

Les sols stabilisés à la chaux ont une résistance à la compression allant de 1 à 8 MPa. Nous pouvons conjecturer que des mortiers de terre stabilisée à la chaux pourraient obtenir des résistances similaires. A l'heure actuelle, les recherches effectuées par Pachta et al. (2018), ont permis de mesurer des résistances à la compression comprises entre 3.15 et 4.63 MPa pour de tels mortiers. D'autres formulations de mortier de terre ont montré des résistances allant jusqu'à 17.5 MPa (Perrot et al., 2018).

Pour les archétypes développés lors de cette étude, il convient d'utiliser des **mortiers de terre** ayant une **résistance à la compression proche** de celle des BTC choisies et **stabilisés avec le même liant**. Les résistances des mortiers et la composition des BTC choisies pour chacun des archétypes sont détaillées dans le Tableau 5-2 Tableau 5-2 : Résistance et contrainte en compression des BTC, mortiers et de la maçonnerie pour chacun des archétypes.

5.5 Flambement

Le flambement est un phénomène que l'on retrouve dans toutes les structures en compression. Il est très important à prendre en compte lors des analyses de la structure.

Lors des simulations, nous avons constaté l'existence de contraintes en compression de signes opposés dans un même mur ce qui pourrait indiquer la présence de flambement. Les causes principales du flambement sont l'excentricité de la charge, l'élanement du mur et sa raideur (Sandoval & Roca, 2012).

L'excentricité de la charge n'est pas un paramètre aisément modifiable puisqu'elle dépend du centre de gravité des charges appliquées à la structure. Dans cette étude, les charges sont principalement les poids propres des dalles en béton et les charges d'utilisation.

L'élanement des murs est relatif à sa géométrie. Il est défini comme le rapport entre sa hauteur et son épaisseur. Ainsi, pour réduire le flambement d'un élément, il faut augmenter son épaisseur ou diminuer sa hauteur. L'épaisseur est limitée par la dimension et l'appareillage des BTC utilisées. L'appareillage des murs choisis pour les archétypes implique une épaisseur de mur de 29.5 cm. Leur hauteur étant de 2.7 m, l'élanement est de 9.3. D'après l'Atex de type A n°2588 (ART.TERRE Mayotte, 2018), l'élanement géométrique des murs porteurs en BTC doit être inférieur ou égal à 15, ce qui est bien le cas pour tous les archétypes. Pour diminuer le flambement, la hauteur des éléments peut être réduite en utilisant des **chaînages horizontaux**. Ces derniers peuvent être placés au-dessus des baies, à 2.20 m ce qui permet de réduire de 20% la hauteur des murs et d'obtenir un élanement de 7.59.

La raideur d'un mur dépend des propriétés mécaniques des BTC et du mortier qui le compose. Il est défini comme le rapport entre le module d'Young et la résistance à la compression. Ces paramètres dépendent des stabilisants utilisés dans les BTC. Ainsi, la composition des BTC choisies influence le flambement, plus une BTC sera raide, moins il y aura de flambement.

Pour rigidifier la structure des **chaînages verticaux** ou des **raidisseurs** peuvent être utilisés. Ils doivent être **connectés aux chaînages horizontaux** et insérés dans les parois. L'intersection régulière des murs porteurs avec des murs de refend permet également de renforcer la stabilité et la rigidité de l'ensemble de la construction. Les

murs intérieurs n'ont pas été modélisés lors de la simulation, leur ajout permettra de diminuer le flambement.

5.6 Joint de dilatation

La terre est un matériau sensible aux éléments extérieurs. En effet, elle a tendance à augmenter de volume en fonction des variations de température et d'humidité. Les BTC bien qu'elles soient stabilisées sont également sujettes à ce comportement. D'après l'ATEX de type A n°2588, « La dilatation linéaire ou Retrait/Gonflement à l'humidité ou à long terme des maçonneries de BTC varie de - 0,45 (retrait) à + 0,3 mm/m (gonflement) » (ART.TERRE Mayotte, 2018). De plus, le coefficient de dilatation thermique des BTC est de 6 à 12 $10^{-5}/K$, il est 10 fois plus important que le béton. Pour éviter que les briques se fissurent en se dilatant, il est primordial d'effectuer des joints permettant d'amortir le changement de volume des briques.

Au cours de nos recherches, nous avons constaté un manque de documentation scientifique sur la réalisation de joints de dilatation pourtant essentiel à la longévité des bâtiments en BTC. Pourtant les constructions en BTC au Burkina Faso intègrent bien ce genre de procédé comme le montre la Figure 5-7.



Figure 5-7 : Bâtiment en BTC réalisé par Kéré présentant un joint de dilatation (Kéré Architecture, 2024b)

Dans les bâtiments de Kéré comme l'école primaire de Gando et l'opéra village, on peut observer la présence d'un joint de dilatation. Ils sont matérialisés par une fente de quelques millimètres sur toute la hauteur d'un mur en BTC. A la Figure 5-7, on remarque la présence d'un joint dans un mur sans percement d'une dizaine de mètres.

Pour les pans de mur plus petits comme montrés à la Figure 5-8, on observe la présence de joints à l'une ou aux deux extrémités des baies. Ces fentes sont présentes en dessous des fenêtres et au-dessus des portes. Leur positionnement étant influencé par la présence d'ouverture, les joints sont espacés de 2 à 5 m. De plus, on peut noter que les joints ne sont pas prolongés dans les éléments en béton qui constituent la toiture ou la dalle du R+1.



Figure 5-8 : Bâtiment réalisé par Kéré présentant des joints de dilatation (Kéré Architecture, 2024b)

Un entretien avec M. Belinga Nko'o (Annexe 1), architecte spécialisé dans la terre crue, a permis de confirmer ces observations. D'après lui, la pratique la plus répandue est d'effectuer des joints creux sur les retombées d'ouvertures. Il s'agit d'une fente d'un à deux millimètres entre les briques pour laisser un espace entre grand et petit trumeau. Deux joints sont effectués au nu des fenêtres, cela permet de séparer les trumeaux qui peuvent librement se dilater.

D'après Chamodat et al. (2021), la présence régulière de raidisseurs évite de devoir ajouter des joints de dilatation supplémentaires. Si des joints sont prévus dans la structure, ils doivent s'étendre verticalement dans les sections de maçonnerie en BTC.

Ainsi en prolongeant les cadres des fenêtres jusqu'au chaînage supportant la dalle supérieure, les raidisseurs aux extrémités des baies permettent la dilatation des BTC. L'ajout de deux baies à chaque extrémité du mur Sud-Ouest permet de respecter une fréquence de joint de dilatation inférieur à 5 m. Pour permettre la dilatation, un joint pourrait être ajouté entre les murs de refend séparant les différents appartements. L'emplacement des joints de dilatation de chacun des archétypes est schématisé en rouge la Figure 5-9, la Figure 5-10, et la Figure 5-11.



Figure 5-9 : Plan des étages avec joint de dilatation de l'Archétype 1 et 2

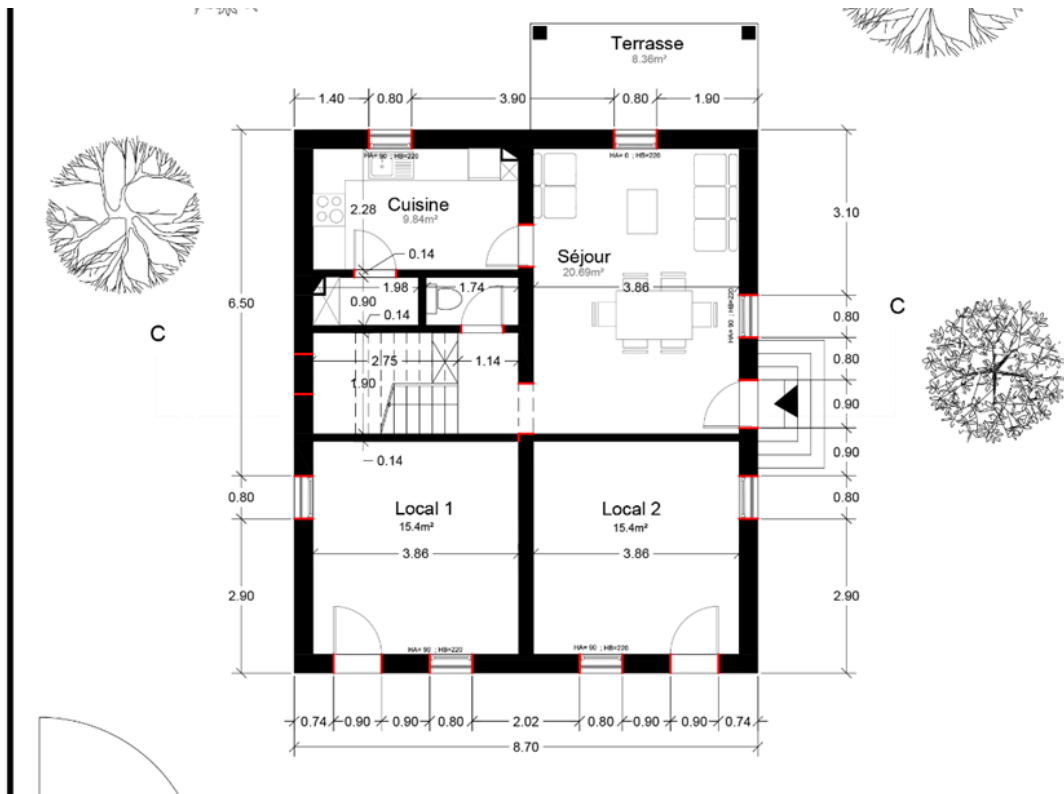


Figure 5-10 : Plan du R0 avec joint de dilatation de l'Archétype 3

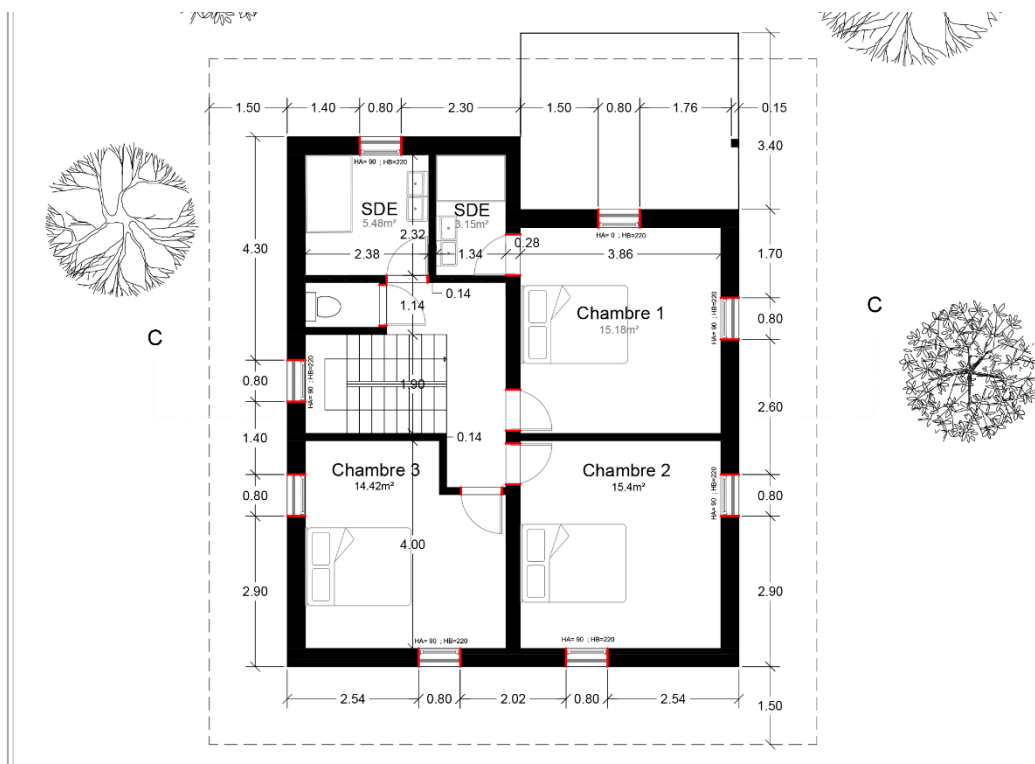


Figure 5-11 : Plan du R+1 avec joint de dilatation de l'Archétype 3

La présence des joints de dilatation n'a pas été prise en compte par l'étude structurale. Les propositions faites aux figures ci-dessus devront être vérifiées par des expérimentations.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les performances et la mise en œuvre des murs porteurs en BTC sont étudiées dans le cadre de trois archétypes conçus lors de cette étude. Grâce à une analyse détaillée et des simulations structurelles, les exigences de résistance en compression sont déterminées et des compositions sont proposées pour les BTC et les mortiers.

Pour l'Archétype 1, il a été déterminé que les BTC stabilisées au ciment sont nécessaires pour atteindre une résistance à la compression de **11 MPa**. Cette stabilisation garantit la durabilité et la robustesse des structures dans un contexte de construction plus dense, mais augmente leur impact environnemental.

Pour l'Archétype 2, des BTC stabilisées avec des résidus de carbure de calcium et des cendres de balle de riz, atteignant une résistance supérieure à **5.4 MPa**, ont été sélectionnées. Cette approche innovante utilise des matériaux locaux et durables, tout en assurant une performance structurelle adéquate.

Pour l'Archétype 3, des BTC avec une résistance en compression supérieur à **1.7 MPa** suffisent. Ces briques peuvent être stabilisées également avec des résidus de carbure de calcium, offrant une solution économique et durable viable pour des constructions plus traditionnelles.

Les mortiers utilisés avec les BTC doivent posséder des propriétés similaires pour assurer une cohérence structurelle et une bonne adhésion. Il est recommandé d'utiliser des **mortiers de terre, stabilisés avec le même liant** que les BTC choisies et ayant une **résistance comparable**. Cette harmonisation des matériaux est cruciale pour la stabilité et la longévité des constructions.

Pour minimiser le flambement, l'intégration de **chaînages horizontaux et verticaux** est nécessaire. Ces chaînages doivent être connectés entre eux et aux murs de refend, assurant une structure résistante. Des **raidisseurs** verticaux ajoutent également une stabilité supplémentaire, particulièrement dans les zones de haute sollicitation.

Enfin, l'importance des joints de dilatation ne peut être sous-estimée pour la durabilité des structures. Ces joints, qui sont des fentes verticales de quelques millimètres sur toute la hauteur du mur, doivent être placés au minimum **tous les 5 mètres**. Dans les trois archétypes, ils sont positionnés **au nu des baies** pour éviter les fissurations dues à la dilatation et la contraction des matériaux.

En conclusion, cette étude a permis de définir des solutions adaptées à l'utilisation de murs porteurs en BTC dans des habitations de plusieurs niveaux à Ouagadougou. Les choix de matériaux et de techniques de construction proposés assurent non seulement la performance structurelle, mais aussi la durabilité et la qualité des habitations, tout en intégrant des pratiques durables et des ressources locales.

6 Evaluation du confort thermique

6.1 Introduction

La conception des archétypes présentés précédemment repose sur une étude approfondie des conditions climatiques de Ouagadougou et intègre des stratégies bioclimatiques visant à offrir un confort thermique optimal aux utilisateurs. Une attention particulière a été accordée à cet aspect lors de la conception.

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes interrogés sur l'efficacité thermique des archétypes développés. Le présent chapitre vise à évaluer leurs performances thermiques grâce à une simulation réalisée avec le logiciel DesignBuilder (DesignBuilder Software Ltd, 2022). Cette étude permet de mesurer les limites des conceptions bioclimatiques précédentes et propose des améliorations en examinant différents scénarios de conception.

Comme mentionné dans la méthodologie, détaillée au Chapitre 3.3.2, les performances thermiques des archétypes sont évaluées selon le modèle du confort adaptatif prescrit par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019).

L'étude de la température intérieure de chaque archétype est effectuée dans la pièce de vie ayant une température opérative la plus défavorable avec une ventilation naturelle nocturne active (les fenêtres sont ouvertes entre 22h et 8h).

6.2 Archétype 1

Pour l'Archétype 1, les simulations ont été effectuées dans le séjour de l'appartement F4, situé au R+5. Étant orientée à l'ouest, cette pièce de vie présente la température opérative moyenne la plus élevée du bâtiment.

Les résultats des simulations sont illustrés par un graphe à la Figure 6-1, présentant les températures limites du confort thermique intérieur prescrites par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019), en fonction des températures moyennes extérieures.

On observe un total de **2 605 degrés-heures** (DH) d'inconfort, dont 2 482 °C.h au-dessus du seuil haut et 122 °C.h en dessous du seuil bas sur une année.

Avec **1689 heures d'inconfort**, l'habitation est considérée comme inconfortable pendant 25 % de l'année avec un inconfort froid durant 193 h ce qui représente 2% de l'année.

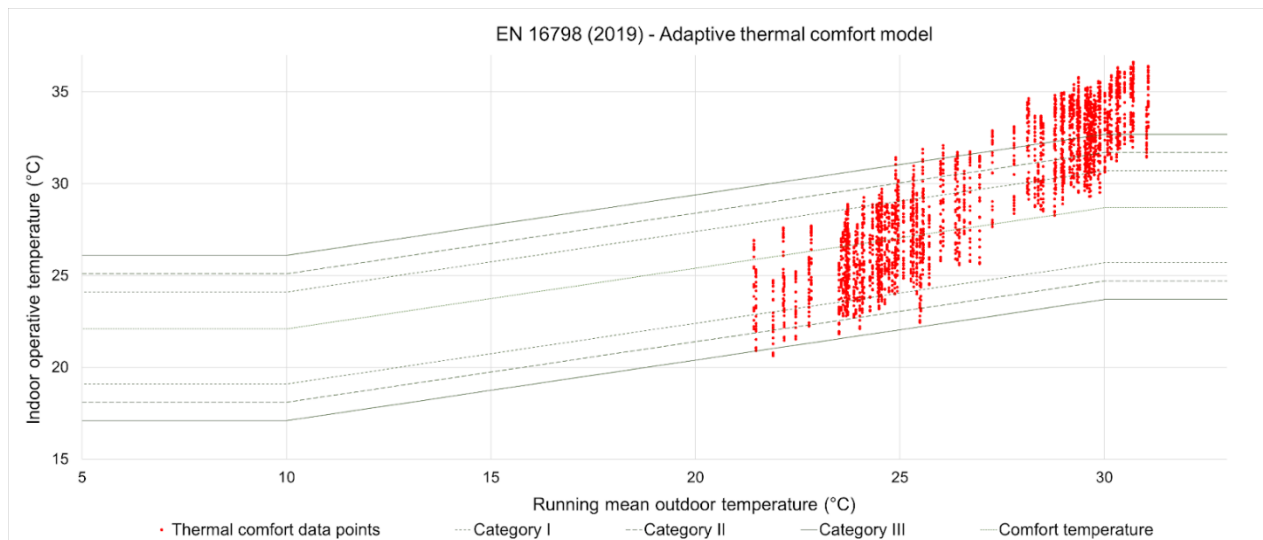


Figure 6-1 : Seuils de confort adaptatif d'après la norme EN 16798 (2019) pour l'Archétype 1

La Figure 6-2 montre que les heures d'inconfort se concentrent principalement de mars à mai. Certains jours, la température ne descend pas en dessous de 31,7°C, seuil maximal du confort adaptatif défini la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019), pendant plus de 24 heures.

Les températures intérieures de l'archétype varient entre 20,39°C et 36,28°C, tandis que les températures extérieures oscillent entre 15,46°C et 41,26°C. Bien que les variations intérieures soient atténuées par rapport à l'extérieur, elles restent influencées par celles-ci. Ce phénomène est dû à la forte inertie thermique des murs en BTC, qui amortissent les fluctuations de chaleur.

Un déphasage thermique est également observé. Les variations de température extérieure sont ressenties à l'intérieur avec un délai de quelques heures. Ce phénomène explique pourquoi les températures intérieures peuvent être plus élevées que les températures extérieures la nuit, lors des périodes de forte chaleur, malgré l'ouverture des fenêtres. Les murs, ayant accumulé la chaleur durant la journée, mettent plusieurs heures à la dissiper. Dans ces conditions, il est souvent préférable de dormir à l'extérieur, une pratique courante au Burkina Faso. Elle a été intégrée à l'architecture de l'archétype avec des balcons protégés par des volets coulissants.

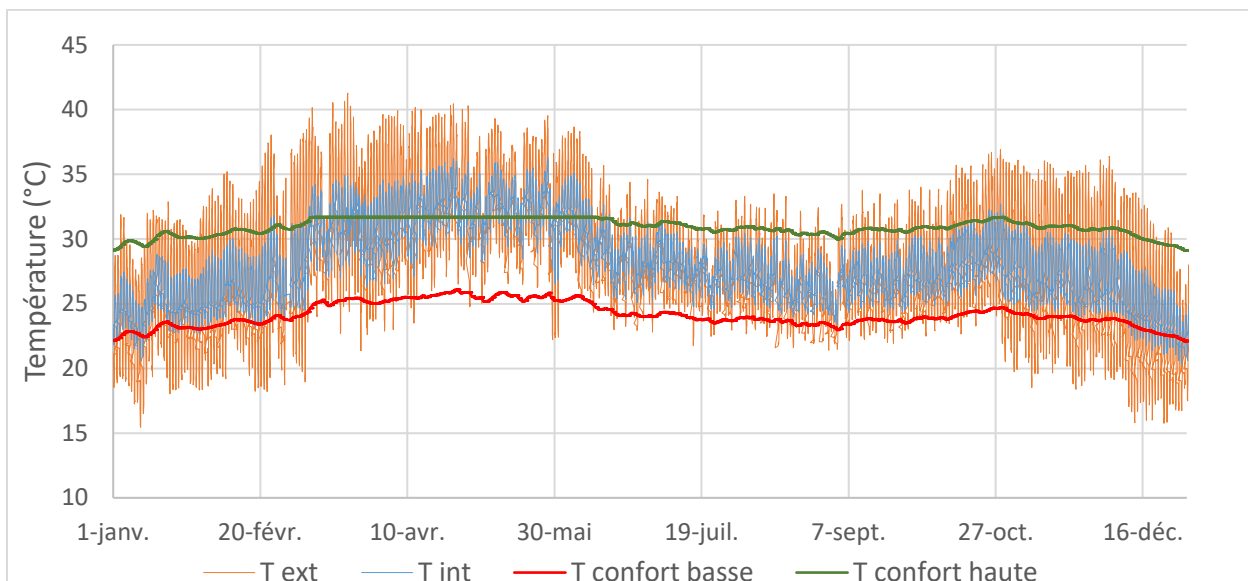


Figure 6-2 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) pour l'Archétype 1

Une solution pour augmenter le confort des habitations consiste à accroître la vitesse du flux d'air. Pour les bâtiments équipés de systèmes permettant aux occupants de contrôler la vitesse de l'air, la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) prévoit l'augmentation du seuil supérieur de la température de confort. Un facteur correctif de 2.2°C est ajouté à la température opérative haute pour une vitesse d'air de 1,2 m/s.

La Figure 6-3 montre que les heures d'inconfort sont alors réduites de 15 %, avec un total de **724 heures** en surchauffe, ce qui représente 8 % de l'année. Avec une vitesse d'air de 1.2 m/s, l'Archétype 1 ne présente plus que **779 °C.h** dont 657°C.h au-dessus du seuil haut, soit une **diminution de 70% des DH**.

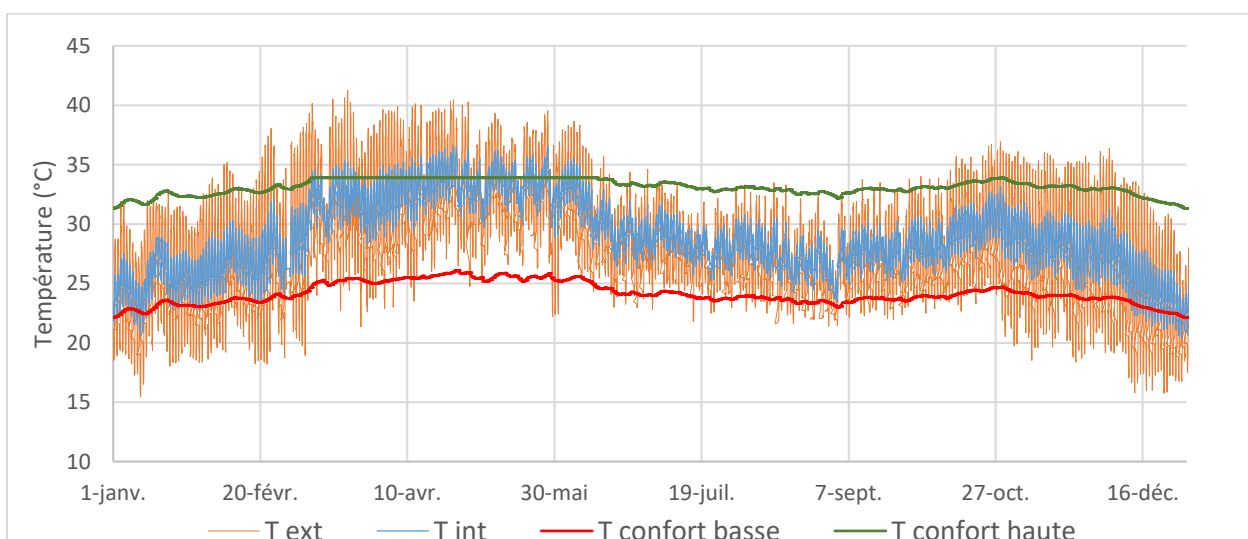


Figure 6-3 : Confort thermique adaptatif pour une vitesse d'air de 1,2 m/s EN 16798 (2019)

Les résultats décrits aux paragraphes précédents sont résumés dans le Tableau 6-1.

Tableau 6-1 : Evaluation du confort thermique de l'Archétype 1

	Degrés-heures	DH_{chaud}	DH_{froid}	Heures d'inconfort	Ratio d'inconfort
Ventilation nocturne	2 605	2 483	122	1689	25%
Brasseur d'air	779	657	122	724	8%

Afin de comprendre l'impact des choix fait lors de la conception de l'Archétype 1, différentes solutions ont été envisagées et comparées au scénario de référence. Ils sont décrits dans la méthodologie, Chapitre 3.6. Le cas de base représente la situation originale de l'Archétype 1 avec une ventilation nocturne naturelle, qui a été évaluée auparavant.

La Figure 6-4 présente les DH en fonction des différents scénarios de conception. Les DH sont les plus élevés lorsque l'Archétype 1 est maintenu fermé avec 8 419 °C.h. Sans ventilation nocturne, les DH augmentent de 13%, réduisant ainsi le confort thermique. Cependant, la ventilation continue du bâtiment montre des résultats similaires à la ventilation nocturne, avec une augmentation de seulement 2% des DH soit 20539 °C.h.

L'ajout de 2.32 m² de surface vitrée répartie sur les façades nord et est, n'influence que très peu le confort thermique, avec une augmentation de seulement 2% des DH par rapport au scénario de base, soit 2 529 °C.h. Ce phénomène s'explique par la présence de protection solaire permettant l'ombrage constant des baies.

En revanche, l'isolation de l'enveloppe a un impact significatif sur les performances thermiques de l'Archétype 1. L'ajout d'un isolant de coefficient de transmission thermique 1.1 W/m².°C réduit les DH à seulement 1 610 °C.h, soit une diminution de 35% par rapport au scénario initial. L'isolant extérieur réduit le transfert de chaleur entre l'extérieur et le mur en BTC. En accumulant moins de chaleur durant la journée, les murs en restituent moins la nuit, améliorant ainsi le confort thermique. La Figure 6-4 permet de comparer les différents scénarios et de souligner l'impact de l'enveloppe isolée.

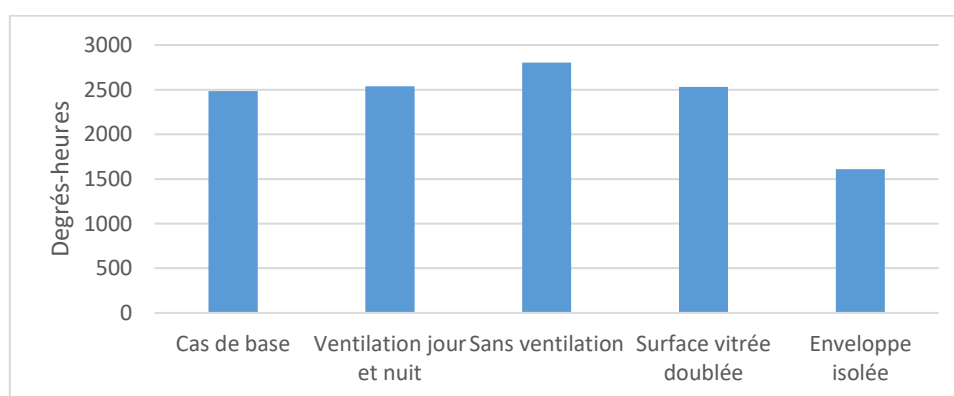


Figure 6-4 : Degrés heures par scénario pour l'Archétype 1

6.3 Archétype 2

Concernant l'archétype 2, les simulations ont été effectuées dans le séjour de l'appartement F4, situé au troisième étage. Orientée à l'ouest, cette pièce de vie présente la température opérative moyenne la plus élevée du bâtiment.

Les résultats des simulations sont illustrés par un graphique à la Figure 6-5, qui montre les seuils de confort thermique intérieur prescrits par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) en fonction des températures moyennes extérieures.

Les températures intérieures de l'Archétype 2 varient entre 20,44 °C et 36,06 °C. On observe un total de **2406 °C.h** d'inconfort, dont 2283 °C.h au-dessus du seuil supérieur et 123 °C.h en dessous du seuil inférieur. L'archétype 2 offre un confort thermique légèrement supérieur à l'archétype 1, avec une réduction de 8 % des DH d'inconfort.

Le bâtiment est jugé inconfortable pendant **1622 heures** ce qui équivaut à 19 % de l'année. De plus, on constate la présence de 123 heures d'inconfort froid soit 2% de l'année.

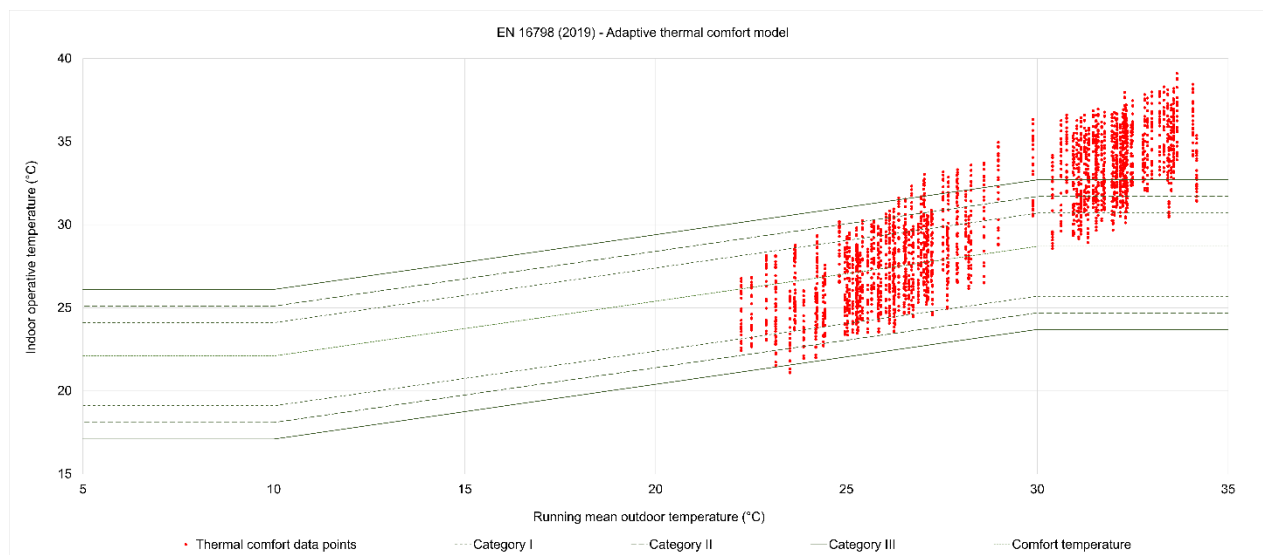


Figure 6-5 : Seuils de confort adaptatif d'après la norme EN 16798 (2019) pour l'Archétype 2

La Figure 6-6 montre que les heures d'inconfort se concentrent principalement durant la saison sèche, de mars à mai. A cette période, la température intérieure ne descend pas en dessous de 31,7°C, le seuil maximal du confort adaptatif défini par la norme EN 16798 (European Committee for Standardization, 2019), durant plusieurs jours.

Tout comme l'archétype 1, les variations de températures intérieures sont moins importantes que celles extérieures grâce à la forte inertie des murs en BTC. Un déphasage thermique est également présent avec un décalage temporel entre la variation de température intérieure et extérieure.

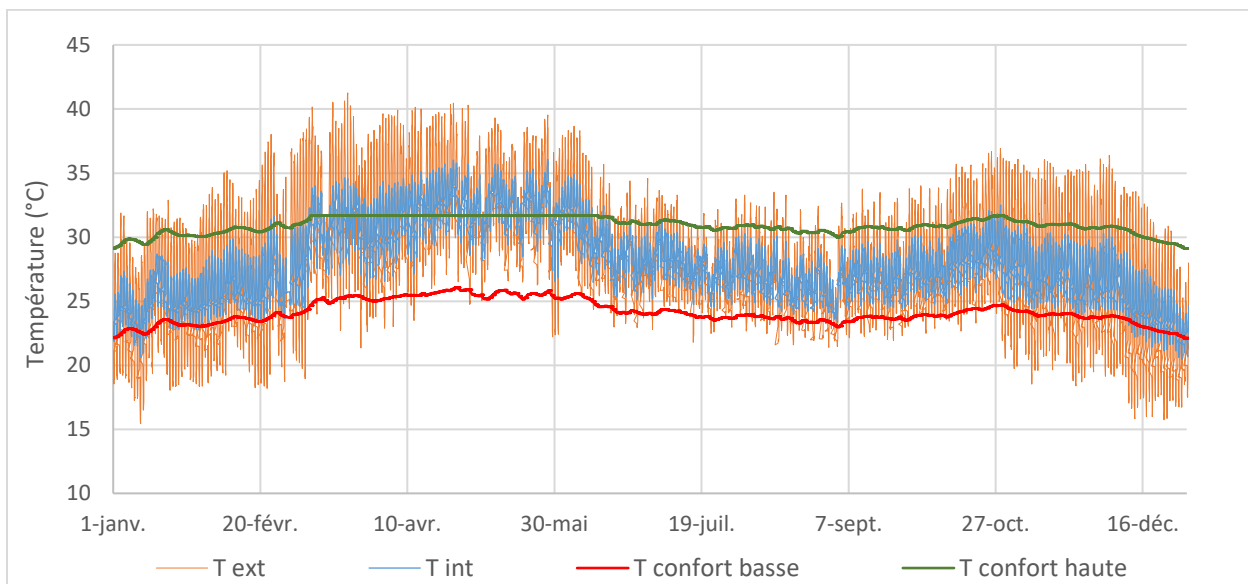


Figure 6-6 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) pour l'Archétype 2

Pour améliorer le confort de l'Archétype 2, un brasseur d'air est ajouté à l'Archétype 2 permettant d'accroître la vitesse du flux d'air. D'après la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) un facteur correctif de 2.2°C est additionné au seuil haut pour une vitesse d'air de 1,2 m/s.

La Figure 6-7 présente l'application du facteur correctif à l'Archétype 2, on y observe **643 heures d'inconfort** réparti sur 8 % de l'année, soit une réduction de 15 %. À une vitesse d'air de 1.2 m/s, l'Archétype 2 affiche seulement **636 °C.h** d'inconfort dont 520 °C.h au-dessus du seuil haut, ce qui équivaut à **une réduction de 74% des DH**.

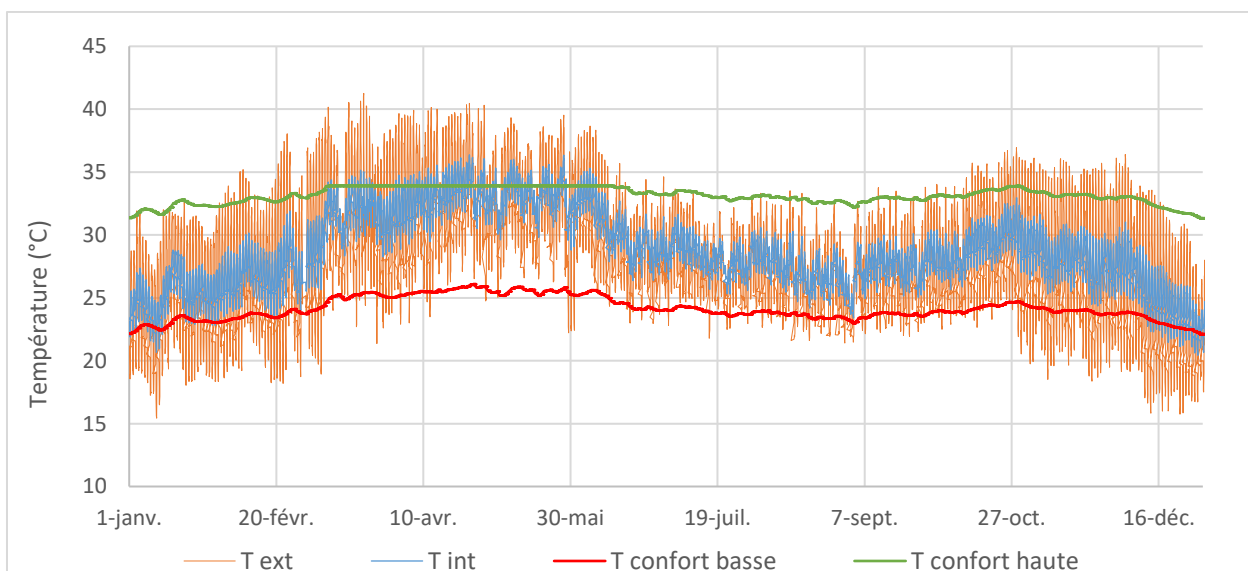


Figure 6-7 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) à une vitesse d'air de 1.2 m/s pour l'Archétype 2

Les résultats décrits aux paragraphes précédents sont résumés dans le Tableau 6-2.

Tableau 6-2 : évaluation du confort thermique de l'Archétype 2

	Heures d'inconfort	DH_{chaud}	DH_{froid}	Ratio d'inconfort	Degrés-heures
Ventilation nocturne	1 622	2 283	123	25%	2 405 DH
Brasseur d'air	643	520	116	7%	636 DH

A l'instar de l'Archétype 1, les températures opératives intérieures de différents scénarios de conception ont été étudiées. Les DH pour chacune des propositions sont représentés sur la Figure 6-8. Le scénario de référence correspond à la situation initiale avec une ventilation naturelle nocturne, déjà étudiée précédemment, présentant 2 283 °C.h au-dessus du seuil de confort thermique.

Avec l'utilisation de la ventilation naturelle de jour comme de nuit, les fenêtres étant laissées ouvertes pour profiter des courants d'air, on observe une augmentation de 14 % des DH par rapport à une ventilation nocturne, atteignant plus de 2 603 °C.h. Ce constat est bien plus significatif que pour l'Archétype 1, où la ventilation continue permettait d'atteindre un niveau de confort similaire à la ventilation nocturne.

En l'absence de ventilation naturelle nocturne, les DH augmentent de 50 %, dépassant les 3 426 °C.h. Ce résultat est plus exacerbé par rapport à l'Archétype 1, où l'augmentation des DH n'était que de 13 %.

En doublant la surface vitrée, soit un ajout de 2.32 m², on observe très peu de différence avec le scénario de référence, les DH augmentent de seulement 1 %. Cette proposition permet d'améliorer la ventilation naturelle, un constat similaire aux résultats obtenus avec l'Archétype 1.

L'ajout d'une couche d'isolation extérieure, pour obtenir un coefficient U des parois de 1,1 W/m².°C, comme recommandé par la directive 5 de l'UEMOA (UEMOA, 2019), permet de réduire de 38 % les DH, les ramenant à 1 400 °C.h. Cette observation concorde avec les résultats obtenus pour l'Archétype 1.

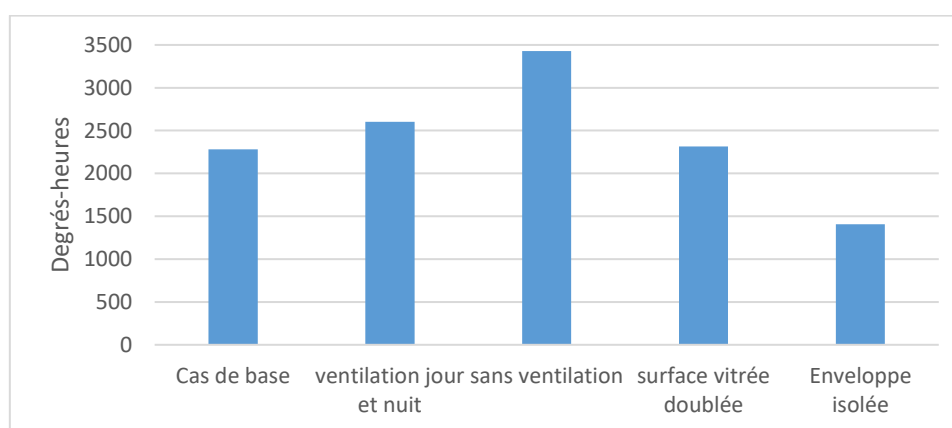


Figure 6-8 : Degrés heures par scénario pour l'Archétype 2

6.4 Archétype 3

Pour l'Archétype 3, la simulation a été réalisée dans le salon au rez-de-chaussée. Cette pièce est orientée au sud-ouest et présente la température opérative intérieure moyenne la plus élevée de tout le bâtiment.

Les résultats de la simulation sont mis en évidence à la Figure 6-9. Elle présente le seuil de confort thermique intérieur spécifié par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) en fonction de la température extérieure moyenne.

La plage de température interne de l'Archétype 3 se situe entre 20,86°C et 40,7°C. Les simulations affichent un total de **5 804 °C.h** d'inconfort, avec 5 746 °C.h au-dessus du seuil supérieur et 58 °C.h en dessous du seuil inférieur.

Avec **2578 heures d'inconfort**, le bâtiment est considéré comme inconfortable 30 % de l'année. On observe 117 heures d'inconfort froid. Ces résultats sont cohérents avec les observations effectuées sur les autres archétypes.

L'Archétype 3 est nettement moins performant que les archétypes 1 et 2 en termes de confort thermique. En effet, **les DH sont doublés entre les immeubles à appartements et les maisons unifamiliales.**

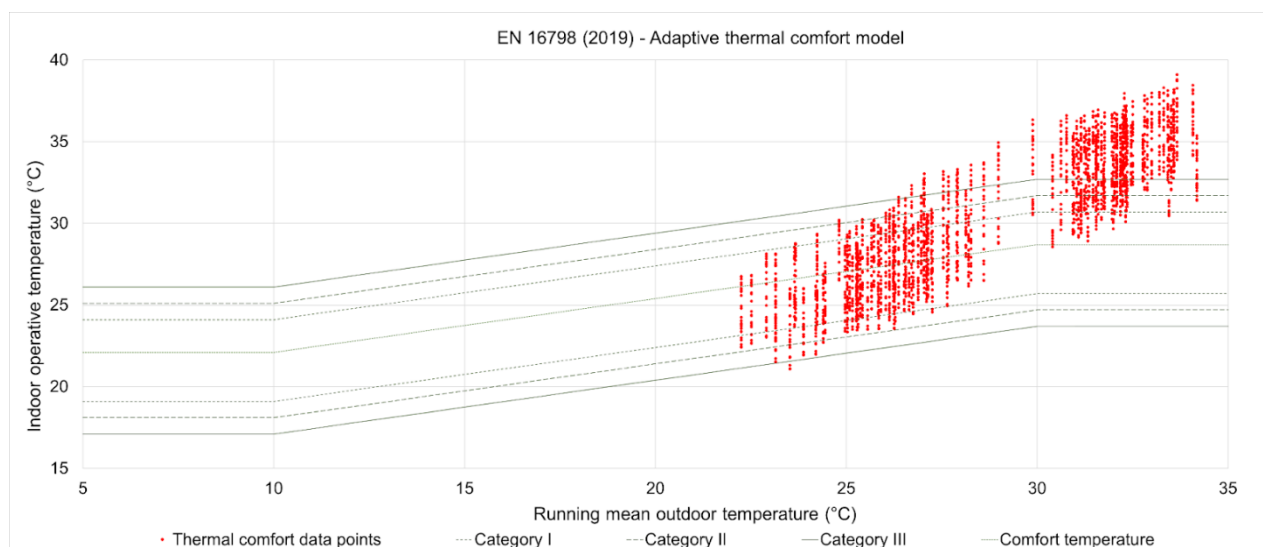


Figure 6-9 : Seuils de confort adaptatif d'après la norme EN 16798 (2019) pour l'Archétype 3

La Figure 6-10 présente les variations de température intérieure et extérieure tout au long de l'année pour l'Archétype 3. Durant la saison sèche de mars à mai, la majorité des températures intérieures dépassent l'intervalle de confort thermique prescrit par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019). Pendant plusieurs jours, même la nuit, la température intérieure ne descend pas en dessous du seuil maximal de confort défini par cette norme européenne.

Les températures intérieures varient entre 20,86 °C et 40,74 °C. À l'instar des archétypes 1 et 2, la forte inertie des murs en BTC permet d'atténuer les variations de température à l'intérieur de l'habitation. Un déphasage thermique est également observé, avec un délai entre les variations de température intérieure et extérieure.

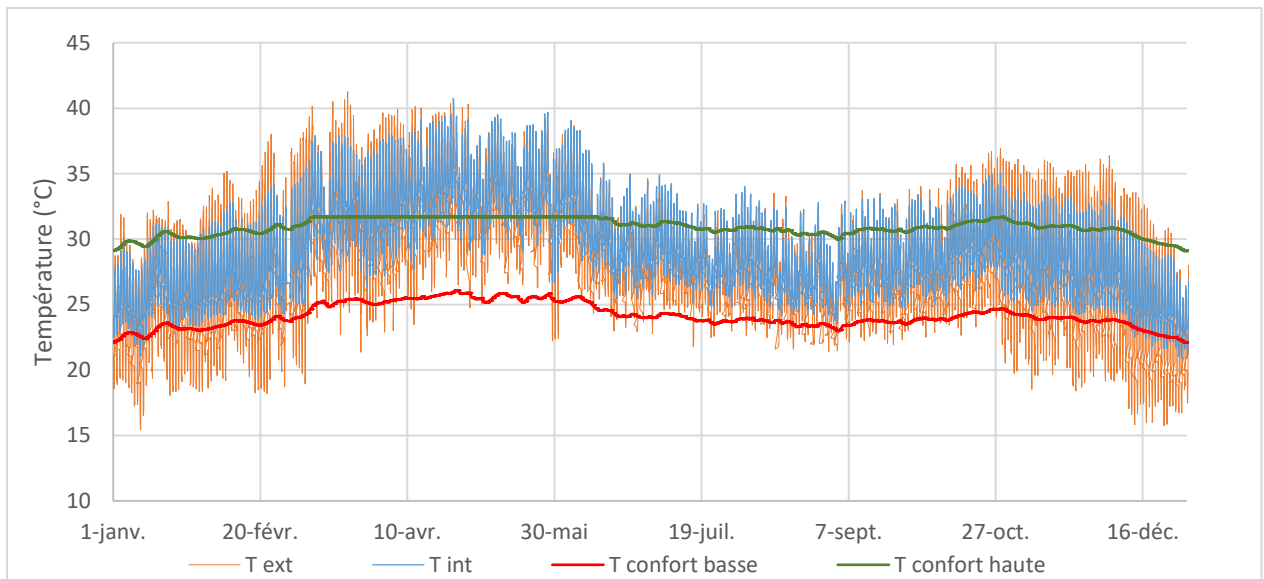


Figure 6-10 : Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) pour l'Archétype 3

Tout comme pour les Archétypes 1 et 2, il est crucial d'augmenter la vitesse du flux d'air pour améliorer le confort thermique de l'Archétype 3. L'ajout d'un brasseur d'air procurant une vitesse d'air de 1,2 m/s, permet d'augmenter le seuil de température haute de 2,2 °C selon la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019).

L'application de ce facteur correctif aux résultats de l'Archétype 3 est illustrée par la Figure 6-11. Avec un total de **1 065 heures d'inconfort** désormais réparties sur 12 % de l'année, on observe une réduction de plus de 50 % des heures d'inconfort. Avec une vitesse d'air de 1,2 m/s, l'Archétype 3 présente seulement **1987 °C.h** d'inconfort dont 1929 °C.h chaud, soit **une réduction de 66% des DH**.

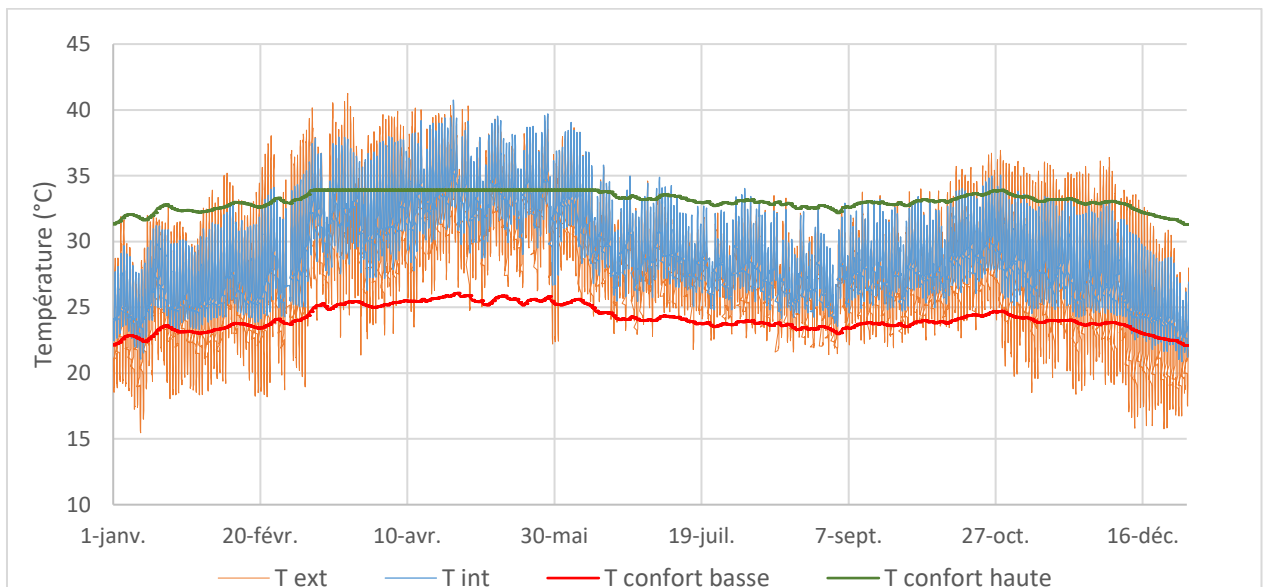


Figure 6-11: Confort thermique adaptatif EN 16798 (2019) à une vitesse d'air de 1.2 m/s pour l'Archétype 3

Le Tableau 6-3 synthétise les résultats obtenus précédemment.

Tableau 6-3 : Evaluation du confort thermique de l'Archétype 3

	Heures d'inconfort	DH_{chaud}	DH_{froid}	Heures d'inconfort	Ratio d'inconfort
Ventilation nocturne	5 804	5 746	58	2 578	25%
Brasseur d'air	1987	1 929	58	1 065	12%

Entre mars et juin, les surchauffes se concentrent entre 10h et 22h. Durant cette période, la température intérieure dépasse le seuil de confort thermique, bien que l'intérieur soit plus frais que l'extérieur entre 10h et 18h. En semaine, cette surchauffe peut être tolérable si les habitants ne sont pas présents durant la journée. En soirée, les espaces extérieurs permettent de profiter de la fraîcheur nocturne. Toutefois, pendant les week-ends, un système de rafraîchissement est nécessaire pour garantir un confort thermique acceptable en journée.

Tout comme pour les Archétypes 1 et 2, différents scénarios de conception ont été simulés afin d'analyser leur impact sur le confort thermique de l'Archétype 3. La Figure 6-12 présente les DH dépassant les limites de confort thermique adaptatif établies par la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019) pour chacune des propositions.

Le scénario de référence, étudié précédemment, correspond à une ventilation naturelle nocturne, présentant 5 746 °C.h au-dessus du seuil de confort thermique.

L'utilisation de la ventilation naturelle de jour comme de nuit ne montre pas de différences significatives par rapport au scénario de référence, avec les fenêtres laissées ouvertes pour profiter des courants d'air. Contrairement aux Archétypes 1 et 2, la ventilation naturelle continue n'est pas moins confortable thermiquement que la ventilation nocturne.

L'absence de ventilation naturelle fait augmenter les DH de 32 %, dépassant les 8 400 °C.h, un résultat similaire aux observations faites pour les Archétypes 1 et 2.

En doublant la surface vitrée, soit un ajout de 2.32 m², les DH augmentent de seulement 1 % par rapport au scénario de référence, ce qui montre une différence minime. Cette solution permet d'augmenter la ventilation naturelle, un résultat cohérent avec les observations faites pour les deux premiers archétypes.

L'ajout d'une couche d'isolation extérieure, visant à obtenir un coefficient U des parois de 1,1 W/m².°C, permet de réduire les DH de 107 % avec un total de 2780 °C.h. L'amélioration du confort thermique grâce à une isolation extérieure est bien plus significative que pour les Archétypes 1 et 2.

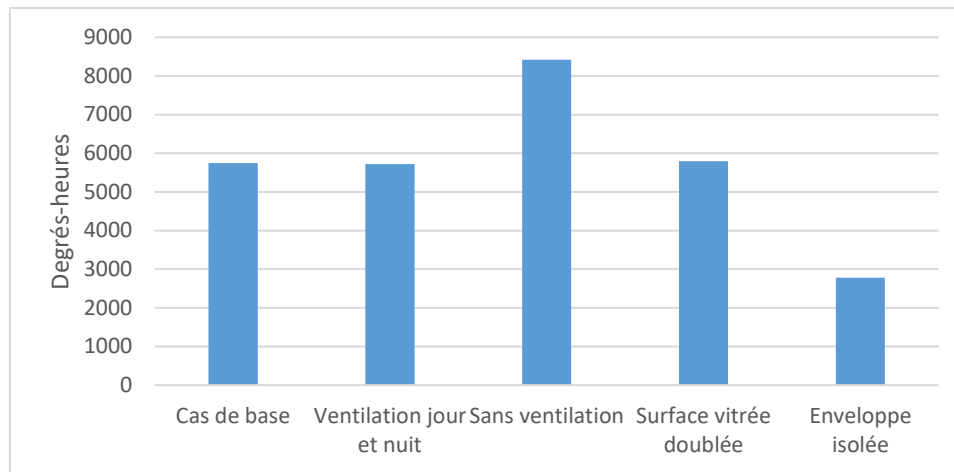


Figure 6-12 : Degrés-heures par scénario pour l'Archétype 3

6.5 Conclusion

Grâce à différentes simulations, cette étude a permis d'évaluer la performance thermique des trois Archétypes selon l'approche adaptative en se basant sur la norme EN 16798 (European committee for standardization, 2019).

Pour améliorer ce confort, des solutions sont proposées, notamment l'ajout de brasseurs d'air pour augmenter la vitesse du flux d'air qui s'avère être une solution performante. En moyenne, l'ajout d'un brasseur d'air **réduit les DH de 69%**.

. Les résultats obtenus sont synthétisés au Tableau 6-4.

Tableau 6-4 : synthèse de l'évaluation du confort thermique

		Confort adaptatif	
		Degrés-heures	Heures d'inconfort
A1	Ventilation nocturne	2 605 °C.h	1689 h
	Brasseur d'air	772 °C.h	724 h
A2	Ventilation nocturne	2 405 °C.h	1 622 h
	Brasseur d'air	636 °C.h	643 h
A3	Ventilation nocturne	5 804 °C.h	2 578 h
	Brasseur d'air	1 987 °C.h	1 065 h

Les degrés-heures de chacun des archétypes sont représentés à la Figure 6-13. On observe que **les Archétypes 1 et 2 sont considérablement plus confortables que l'Archétype 3** selon l'approche adaptative. **Les DH sont doublés entre les immeubles à appartements et la maison unifamiliale.** Avec ou sans brasseur d'air, l'habitation la plus confortable est l'Archétype 2, un immeuble à appartements de 3 étages.

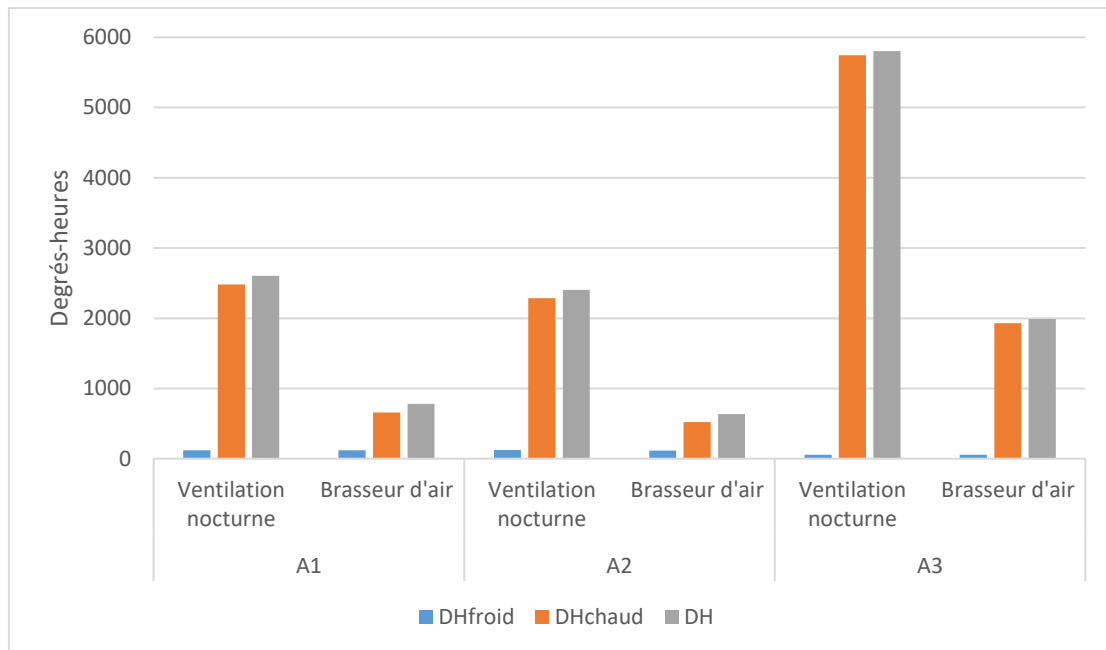


Figure 6-13 : Degrés-heures annuels pour les trois Archétypes

En outre, différents scénarios ont été envisagés pour comprendre les impacts de certains choix de conception sur le confort thermique. Les résultats montrent des similarités entre les trois Archétypes :

- La suppression de la ventilation nocturne augmente considérablement l'inconfort avec une hausse 36 % en moyenne.
- La ventilation continue jour et nuit augmente l'inconfort de manière significative uniquement pour l'archétype 2 ou elle augmente de 14% les DH.
- Pour tous les archétypes, doubler la surface vitrée augmente les DH de seulement 1%.
- L'isolation extérieure de l'enveloppe s'avère être la meilleure solution pour améliorer le confort thermique, réduisant de plus de moitié les DH dans les trois cas. Cette réduction est particulièrement marquée pour l'Archétype 3.

7 Discussion

Ce chapitre de discussion vise à interpréter les résultats issus des parties 4, 5 et 6 de cette étude en les mettant en perspective avec le contexte scientifique et professionnel. Dans cette optique, nous commençons par rappeler les objectifs initiaux de notre recherche, afin de mieux appréhender les conclusions qui en découlent.

Ensuite, les découvertes clés ainsi que les recommandations découlant de nos analyses sont mises en lumière. Puis, les points forts et les faiblesses mis en avant par nos résultats sont détaillés.

Enfin, nous discuterons de l'impact attendu de ces découvertes sur les pratiques futures dans le domaine étudié.

7.1 Rappel des objectifs de l'étude

La principale question de recherche abordée lors de ce travail est :

Comment concilier qualité architecturale et confort thermique en construction BTC ?

Le but de ce travail de recherche est d'encourager la population de Ouagadougou à construire en BTC. Afin d'améliorer l'image de ce matériau auprès de la population burkinabé, trois archétypes d'habitat bioclimatique et modulaire sont conçus. Ces bâtiments doivent être denses tout en intégrant des critères esthétiques, de durabilité, et de confort thermique.

Plusieurs objectifs en découlent :

- Produire des plans, des coupes et des perspectives d'habitat bioclimatique adaptées au contexte ouagalais,
- Définir les propriétés des BTC et du mortier à utiliser pour la construction de chacun des archétypes,
- Donner des recommandations pour une bonne stabilité des murs porteurs en BTC dans des constructions à plusieurs étages,
- Etudier le confort thermique fourni par chacun des archétypes et proposer des solutions pour l'améliorer.

7.2 Découvertes clés

Cette section vise à mettre en relation les résultats obtenus dans les Chapitres précédents en les replaçant dans leur contexte et à la lumière des résultats d'études similaires. Les découvertes clés sont mises en évidence à la suite de l'interprétation des résultats.

Ce travail de recherche montre qu'il est possible de concevoir des habitations bioclimatiques avec des murs porteurs en BTC de plusieurs étages, combinant qualité architecturale et confort thermique. Plusieurs solutions adaptées à différents foyers et quartiers de Ouagadougou ont été proposées :

L'Archétype 1 est un immeuble à appartements de cinq étages destiné aux quartiers du centre de Ouagadougou. Il comprend 15 logements de haut standing allant du F2 au F4 et des locaux commerciaux en relation avec la rue. Ce bâtiment intègre également des espaces partagés comme un parking, une buanderie, une cuisine extérieure et une terrasse en toiture. Bien que très innovant par la densité de logements qu'il propose, encore peu courante à Ouagadougou, cet archétype associe

les codes et pratiques sociales locales à une architecture occidentale jugée plus moderne par la population.

La durabilité et la stabilité du bâtiment sont assurées par une structure poteau poutre en béton armé au rez-de-chaussée et de mur porteur en BTC aux étages. Les BTC composant la maçonnerie doivent atteindre une résistance à la compression de **11 MPa**. Pour assurer une bonne cohésion, un **mortier de 10 MPa** est nécessaire. Actuellement, pour atteindre de telles résistances, les BTC et le mortier doivent être **stabilisés au ciment**, ce qui a un impact environnemental élevé. Cependant, les BTC sont dimensionnés « au plus contraignant », avec une résistance en compression calculée pour le niveau ayant la descente de charge la plus importante (R+1). Aux étages supérieurs, des BTC de résistance moins élevée peuvent être utilisés, permettant de limiter l'emploi de ciment en faveur de stabilisants à impact environnemental réduit. En outre, la mise en œuvre de BTC plus légères aux niveaux supérieurs permet de diminuer les charges transmises au R+1. Un équilibre est donc à atteindre entre la résistance de la BTC et sa densité.

En termes de performance thermique, l'Archétype 1 présente **2605 degrés-heures** (DH) en présence d'une ventilation naturelle nocturne. L'ajout d'un brasseur d'air à une vitesse de 1.2 m/s **réduit les DH de 70 %**, les ramenant à **779 °C.h**. L'installation de panneaux photovoltaïques sur la toiture peut alimenter les brasseurs d'air et offrir une indépendance du réseau électrique peu fiable. D'autant plus que lors des jours de forte chaleur, le rayonnement solaire est important. Les panneaux solaires pourront alors fournir l'énergie nécessaire à la bonne ventilation.

L'Archétype 2 est un immeuble à appartements de trois étages destiné aux quartiers du centre et du péricentre de Ouagadougou. Il comprend 9 logements de haut standing du F2 au F4. Tout comme l'Archétype 1, ce bâtiment inclut des locaux commerciaux et des espaces partagés tels qu'un parking, une buanderie, une cuisine extérieure et une terrasse en toiture. Inspiré par l'architecture occidentale, qui est appréciée par la population burkinabé, ce bâtiment associe de manière innovante les usages et coutumes locales afin de répondre aux besoins des utilisateurs.

Pour garantir la durabilité et la stabilité du bâtiment, la structure est composée de poteaux poutres au rez-de-chaussée et de murs porteurs en BTC aux étages. Des BTC de résistance en compression de **5.4 MPa** et un mortier de **4.4 MPa** sont nécessaires. Des BTC **stabilisées avec des résidus de carbure de calcium et des cendres de balle de riz** conviennent à cette application. Il s'agit de sous-produit à faible impact environnemental, disponible localement et à faible coût.

Concernant le confort thermique, l'Archétype 2 présente **2406 DH** avec une ventilation naturelle nocturne. L'ajout d'un brasseur d'air **réduit les DH de 73 %**, les ramenant à **636 °C.h**. Tout comme l'Archétype 1, des panneaux photovoltaïques peuvent être installés en toiture.

L'Archétype 3 est une villa de deux niveaux destinée aux quartiers de la périphérie de Ouagadougou. Ce logement de type F4 inclut également deux locaux modulables adaptés à une large gamme d'usages. D'architecture plus classique, ce bâtiment s'intègre aux quartiers périphériques de Ouagadougou.

Le bâtiment est constitué de murs porteurs en BTC surélevés par un soubassement en béton pour assurer sa durabilité et sa stabilité. La maçonnerie porteuse est constituée de BTC de résistance en compression de **1.7 MPa** et un mortier de **1.5**

MPa. Des BTC **stabilisées avec des résidus de carbure de calcium** sont parfaitement adaptées à ce type de bâtiment.

En matière de confort thermique, l'Archétype 3 présente **5804 °C.h.** L'ajout d'un brasseur d'air **réduit les DH de 66 %**, les ramenant à **1987 °C.h.**

En moyenne, pour les trois archétypes, **l'intégration d'un brasseur d'air diminue les degrés-heures d'inconfort de 69%**. Pour atteindre un meilleur niveau de confort thermique, un système de **refroidissement adiabatique** est envisagé. Ce système, peu coûteux et économe en énergie, réduit la température de l'air sans recourir à un fluide frigorigène, limitant ainsi l'impact environnemental. Cependant, il doit être associé à un **déshumidificateur** lorsque l'humidité relative est importante, principalement durant la saison des pluies. Ce système consomme beaucoup d'eau. Néanmoins, il est possible d'utiliser l'eau de pluie pour limiter le recours à de l'eau potable, il faudra alors prévoir des citernes pour stocker l'eau d'une saison à l'autre.

La performance thermique de l'Archétype 3, une **villa** unifamiliale, est nettement inférieure à celle évaluée pour les autres archétypes, des **immeubles à appartements**. Une **différence de DH de presque 60%** est observée entre ces deux types de bâtiment. Cet écart peut être expliqué en partie par l'absence de balcons et de volets, qui offrent une protection solaire significative dans les Archétypes 1 et 2. La présence de ces éléments n'est pas justifiée pour une habitation unifamiliale disposant déjà d'un espace extérieur privatif.

Les DH mesurés par Kaboré (2015) sont deux fois supérieurs à ceux obtenus pour les trois archétypes. Le standard ASHRAE55, utilisé dans l'étude de Kaboré (2015), tend à surestimer d'environ 10% les DH par rapport à la norme européenne pour le climat de Ouagadougou. L'écart significatif constaté avec nos résultats dépasse cet ordre de grandeur. Il peut être expliqué par la mise en œuvre de stratégies bioclimatique réduisant l'inconfort thermique.

L'impact de solutions passives sur le confort thermique a été étudié pour les trois Archétypes. Différents scénarios ont été envisagés pour mettre en évidence les effets de certains choix de conception sur le confort thermique. Les résultats montrent des similarités entre les trois archétypes.

Comme attendue, la suppression de la ventilation nocturne augmente l'inconfort avec une hausse des DH d'en moyenne de 36 %. La ventilation continue jour et nuit montre des résultats légèrement supérieurs à la ventilation nocturne. Une augmentation de seulement 5 % des DH est observée. La ventilation nocturne reste la meilleure solution, comme le souligne Hema (2020).

Lors de la conception des archétypes, un ratio recommandé par Kaboré (2015) entre surface vitrée et surface de la pièce a été respecté. Cependant, en présence de protection solaire efficace, l'ajout de vitrage améliore la ventilation naturelle sans impacter significativement le confort thermique. En effet, pour les trois Archétypes, doubler la surface vitrée n'augmente les DH de seulement 1 % en moyenne.

A contrario, l'isolation de l'enveloppe par l'extérieur a un impact significatif. Ajouter une couche d'isolant de coefficient U 1,1 W/m².°C conformément aux recommandations de l'UEMOA (2019) permet de réduire les DH de 42 % en moyenne. Cette solution est particulièrement efficace pour l'Archétype 3. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les façades de l'Archétype 3 ne bénéficient pas d'ombrage, contrairement aux deux autres modèles. L'isolation extérieure limite le transfert de chaleur, les murs en

BTC sont ainsi protégés des surchauffes diurnes. Cependant, cette solution est également avantageuse la nuit, car les BTC possèdent un déphasage thermique important. La chaleur restituée est donc moins importante grâce à l'isolation.

Concernant la mise en œuvre de murs porteurs en BTC sur plusieurs étages, il est primordial d'intégrer des chaînages horizontaux afin de limiter les phénomènes de flambement. Des chaînages verticaux et des raidisseurs reliés aux chaînages horizontaux sont également recommandés pour renforcer la stabilité de la structure.

Un **mortier de terre**, ayant une **résistance mécanique similaire à celle des BTC**, est à privilégier. Le **liant** utilisé dans la composition du mortier doit être **identique à celui des BTC** pour assurer la résistance et la durabilité de la maçonnerie.

En réponse au phénomène de dilatation thermique affectant les BTC, il est nécessaire de prévoir un **joint creux** continu sur toute la hauteur du mur pour éviter les fissurations de la maçonnerie. Ces fentes, d'un à deux millimètres, doivent être placées **tous les 5 mètres**. Les joints sont habituellement **positionnés au nu des ouvertures**.

7.3 Recommandations

Pour concevoir des habitations à Ouagadougou en murs porteurs en BTC, compatibles avec le contexte climatique local, plusieurs aspects doivent être pris en compte :

Protection des murs face aux intempéries

Il faut abriter les maçonneries en BTC des intempéries pour garantir leur résistance structurelle. Les murs en BTC doivent être surélevés avec une structure ne craignant pas l'eau, comme le béton. Ce dispositif fait office de rupture capillaire, protégeant du ruissellement et des projections des eaux pluviales. Le drainage aux abords des fondations est primordial afin d'évacuer les eaux. Les façades opposées et parallèles aux vents chargés de pluie doivent être abritées par des éléments en saillie comme des coursives ou débords de toiture.

Mortier

Le mortier utilisé avec les BTC doit être stabilisé avec le même liant que les BTC pour assurer une cohésion et une durabilité de la maçonnerie. Le mortier de terre est particulièrement recommandé, il doit avoir une résistance à la compression similaire à celle des BTC pour garantir la durabilité de l'ouvrage.

Limitation du Flambement

Pour limiter le flambement, il est indispensable d'utiliser des chaînages horizontaux intégrés dans la maçonnerie. L'ajout de chaînages verticaux raidisseurs reliés aux chaînages horizontaux permet également de renforcer la structure et d'assurer une meilleure stabilité.

Joints de Dilatation

Les murs en BTC doivent inclure des joints de dilatation au maximum tous les cinq mètres pour absorber les mouvements et éviter les fissurations. En présence de baies, les joints doivent être positionnés au nu de celles-ci.

Protections Solaires

Il est essentiel de mettre en place des protections solaires efficaces pour abriter les ouvertures, les murs et les toitures des surchauffes. Cela peut inclure des casquettes solaires, des loggias, des brise-soleil, ou encore des nacos (volet en persienne). Il est primordial d'intégrer ces éléments en priorité sur les façades les plus exposées au rayonnement solaire, notamment les orientations sud, ouest et est.

Ventilation Naturelle

Pour maximiser la ventilation naturelle, les logements doivent être traversants et orientés dans le sens des vents dominants. Cela permet de créer des courants d'air rafraîchissants qui améliorent le confort thermique intérieur. Privilégier la ventilation nocturne est crucial. Cette méthode permet de rafraîchir les espaces intérieurs en exploitant les températures plus basses de la nuit.

Inertie Thermique

Il faut privilégier des parois en BTC pour tirer parti de leur inertie thermique. L'inertie des BTC permet de stocker la fraîcheur nocturne puis de la diffuser en journée. Ce phénomène, couplé à un important déphasage, permet de réduire les variations de température.

Isolation Extérieure

Isoler la structure par l'extérieur améliore considérablement le confort thermique si les façades ne sont ombragées. Elle protège les murs en BTC de la surchauffe en limitant la transmission de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur.

Système de ventilation

L'utilisation de brasseurs d'air garantit le confort thermique durant les périodes chaudes. Pour une efficacité énergétique accrue, il est recommandé de coupler ces brasseurs à des panneaux photovoltaïques. Un système de refroidissement adiabatique peut également être envisagé, associé à un système de récupération et de stockage de l'eau de pluie pour limiter la consommation d'eau potable. L'ajout d'un déshumidificateur est conseillé pour améliorer le confort thermique lors de la saison des pluies.

7.4 Forces et limitations

L'une des grandes forces de ce mémoire réside dans son approche interdisciplinaire, incluant lors de la conception les aspects de confort thermique, de résistance structurelle et d'intégration des considérations sociales. Cette approche holistique a permis de concevoir des bâtiments qui non seulement répondent aux normes de confort, mais respectent aussi les habitudes et les besoins des populations locales. En second plan, un regard critique a été porté sur l'impact environnemental des bâtiments et des coûts de construction, renforçant ainsi la pertinence et la viabilité des solutions proposées.

Ce travail propose un concept novateur d'immeuble à appartements en BTC, inspiré de l'architecture occidentale moderne, qui plaît particulièrement aux classes moyennes burkinabé. Ces immeubles offrent un très bon niveau de confort, tout en intégrant les pratiques sociales et les besoins spécifiques des populations locales. De plus, l'utilisation de murs porteurs en BTC sur plusieurs étages, une technique encore très peu répandue et étudiée, représente une avancée significative dans le domaine de la construction durable au Burkina Faso.

L'originalité de ce travail repose non seulement sur des concepts innovants, mais également sur la méthodologie mise en œuvre. D'autres travaux développent des concepts d'habitat au Burkina Faso (Belinga Nko'o, 2006), mais cette étude se distingue par une évaluation rigoureuse et combinée du confort thermique et de la structure. Cette validation des modèles développés s'appuie sur une analyse structurée de simulations selon des standards reconnus.

Cette étude est renforcée par la rigueur apportée dans la section des données utilisées. Tout au long de ce travail de recherche, des sources variées et fiables sont utilisées. Les informations exploitées ont été recoupées et validées à travers des « focus groups » et des entretiens avec des experts spécialisés dans l'architecture burkinabé et les constructions en BTC. Éclairées par les réalités du terrain, les remarques issues de ces discussions ont permis d'enrichir la conception des archétypes. En outre, le travail a été rigoureusement revu par plusieurs chercheurs de l'Université de Liège, spécialisés dans différents domaines de la construction, assurant ainsi une grande fiabilité et une validation scientifique rigoureuse.

Pour garantir la reproductibilité de cette étude, les étapes méthodologiques sont expliquées de manière précise et quantifiée. Toutes les données utilisées sont disponibles et référencées. Les comptes rendus des « focus groups » et des entretiens effectués sont présentés à l'Annexe 1. Les simulations réalisées sur DIANA (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, 2024) et DesignBuilder (DesignBuilder Software Ltd, 2022) sont également précisées dans l'Annexe 3 et l'Annexe 4, permettant à d'autres chercheurs de recréer les modèles à l'identique. L'analyse des données issues des simulations est décrite avec précision, les tableaux de traitement des données sont disponibles en données permettant de reproduire les résultats obtenus. Cette démarche assure par ailleurs une possible application de la méthodologie à d'autres données, permettant sa mise en œuvre dans d'autres contextes.

Les performances des solutions proposées peuvent varier considérablement dans des conditions climatiques différentes. La conception des bâtiments a été spécifiquement adaptée au contexte climatique de Ouagadougou. Par conséquent, les résultats obtenus pourraient être différents si les conditions climatiques varient

significativement. Toutefois, dans des climats similaires et en respectant l'orientation choisie pour les archétypes, les résultats observés devraient être comparables à ceux obtenus lors de cette étude.

Une des difficultés majeures est le manque de données sur le confort thermique en Afrique de l'Ouest. Actuellement, il n'existe pas de normes spécifiques permettant d'évaluer le confort thermique dans ce type de climat. Les évaluations ont donc été réalisées en utilisant des normes européennes prenant en compte l'adaptation des utilisateurs aux températures des jours précédents. Cependant, il n'y a pas suffisamment de recherches pour confirmer que ces normes sont représentatives du ressenti des populations locales. De plus, l'humidité n'est pas prise en compte par l'approche adaptative. L'ajout d'un déshumidificateur garantit un bon confort thermique durant les périodes très humides.

En outre, il n'existe pas de norme spécifique pour le dimensionnement et la mise en œuvre de murs porteurs en BTC. Cette étude s'est appuyée en partie sur des valeurs préconisées pour la maçonnerie en terre cuite. Mais le comportement des BTC est différent de ces dernières. En particulier en présence d'eau, la résistance des BTC est diminuée. Pour éviter ce phénomène, les BTC sont protégées des intempéries. Cependant, des expérimentations supplémentaires sont nécessaires pour valider les résultats des simulations. Ces travaux permettront à terme de définir des normes spécifiques aux BTC, renforçant ainsi la fiabilité et la sécurité de leur utilisation dans des constructions de plusieurs étages.

7.5 Impact sur les pratiques futures

Face à une forte augmentation de la population urbaine, Ouagadougou est confronté à un besoin urgent de logements. Cette tendance est vouée à s'intensifier dans les prochaines années. Le phénomène, combiné à un habitat majoritairement de plain-pied, entraîne un étalement urbain significatif, poussant les populations à s'installer toujours plus loin. En plus de provoquer l'artificialisation des sols, cet étalement complique la mobilité et rend difficile l'accès aux équipements publics.

Les archétypes développés lors de cette étude proposent une solution à l'étalement urbain en densifiant le bâti avec des habitats sur plusieurs niveaux. Cette architecture, encore peu répandue au Burkina Faso, intègre les besoins exprimés par la population, rendant ces bâtiments compatibles avec les habitudes sociales. Inspirés des constructions occidentales appréciées par la classe moyenne, ces archétypes proposent une réinterprétation de l'habitat burkinabé conventionnel.

De plus, contrairement à la majorité des constructions, l'architecture développée procure un bon confort thermique à l'aide de stratégies bioclimatiques et de solutions passives localement disponibles et abordables. De tels bâtiments sont à privilégier dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de restriction énergétique.

Ces archétypes serviront de références pour les populations et les constructeurs locaux, diffusant ainsi une image plus moderne du BTC. La multiplication de telles solutions permettra, à terme, de répondre à la forte demande en logements à Ouagadougou et dans d'autres grandes villes de la région.

La réalisation d'études complémentaires pour confirmer les résultats obtenus lors de ce travail de recherche est nécessaire pour faire progresser les connaissances sur la construction de tels bâtiments. En parallèle, il est primordial de diffuser les savoir-faire associés aux BTC à travers des formations destinées aux constructeurs. Pour encourager la diffusion de ces habitats, les pouvoirs publics devront soutenir la filière locale en valorisant une culture constructive en BTC et en sensibilisant la population aux avantages de ce matériau. Ils devront également élaborer des normes pour le dimensionnement de maçonnerie en BTC, garantissant ainsi leur fiabilité et leur durabilité.

7.6 Futurs travaux de recherche

Cette étude a permis de soulever un certain nombre d'interrogations, ouvrant des pistes de recherche intéressantes pour de futurs travaux.

Bien que les archétypes conçus répondent aux besoins de la population locale, ils se distinguent par leur caractère innovant, notamment par la densité d'habitat qu'ils proposent. Une étude d'acceptation sociale sera nécessaire pour déterminer si la population cible est prête à adopter ce type de construction.

Une démarche de frugalité a été suivie lors de la conception des archétypes, avec l'utilisation de matériaux locaux largement disponibles. Cependant, la construction de bâtiments sur plusieurs étages entraîne des coûts de construction significatifs. La mutualisation des dépenses dans le cadre d'habitats collectifs peut réduire ces coûts. Une analyse approfondie sera nécessaire pour déterminer si les solutions développées sont compatibles avec les revenus des ménages de la classe moyenne.

Le BTC est considéré comme un matériau écologique en raison de l'utilisation de ressources locales nécessitant peu d'énergie. Cependant, la stabilisation nécessaire à la durabilité des BTC peut impliquer l'utilisation de liants à fort impact environnemental, comme le ciment, ce qui pose la question de l'intérêt écologique de ce matériau. Des liants locaux moins énergivores sont disponibles, mais ils offrent des performances mécaniques moindres. La réalisation de bâtiments de plusieurs niveaux en murs porteurs BTC, comme les archétypes 1 et 2, nécessite des performances mécaniques élevées. Toutefois, la mutualisation des espaces dans les habitats collectifs permet de réduire les dépenses énergétiques. L'étude de l'impact environnemental des archétypes permettra de déterminer leur pertinence face aux enjeux de développement durable actuels.

Il existe actuellement peu de recherches portant spécifiquement sur le confort thermique dans les climats tropicaux de type soudano-sahélien. Dans cette optique, une étude approfondie sur le ressenti thermique des individus est primordiale pour évaluer l'adéquation du concept de confort adaptatif au contexte burkinabé. À long terme, il serait indispensable de définir un standard de confort thermique spécifique aux conditions climatiques de l'Afrique de l'Ouest.

8 Conclusions

Avec l'augmentation rapide de la population urbaine à Ouagadougou, la demande en logement connaît une forte croissance, ce qui entraîne un étalement urbain considérable. Malheureusement, les logements actuels ne sont pas conçus pour répondre efficacement aux conditions climatiques, rendant la vie quotidienne inconfortable pour de nombreux résidents. Les briques de terre comprimée (BTC) représentent une solution prometteuse, offrant de nombreux avantages thermiques et environnementaux. Toutefois, leur adoption reste limitée en raison de leur faible acceptation par la population locale.

Dans la littérature, différents travaux proposent des solutions pour améliorer les performances structurelles ou thermiques des murs en BTC mais aucun n'adopte une démarche interdisciplinaire à l'échelle du bâtiment.

L'objectif de ce travail de recherche est d'encourager la population de Ouagadougou à adopter les BTC pour construire des habitats plus denses et adaptés à leur environnement. Pour ce faire, nous avons conçu trois archétypes d'habitat bioclimatique en BTC.

Les archétypes conçus dans le cadre de cette étude proposent une architecture moderne, intégrant le contexte social et urbain de Ouagadougou. Ces modèles offrent des solutions adaptées à différentes tailles de parcelles urbaines et configurations familiales variées. La stabilité et durabilité des édifices sont assurées par un dimensionnement précis de la structure. Pour répondre aux exigences de performance, la composition des BTC et du mortier est définie, et l'utilisation d'éléments rigidifiant et de joints de dilatation sont spécifiés.

Les archétypes intègrent également des principes bioclimatiques visant à limiter la surchauffe dans les logements. L'orientation des bâtiments, l'utilisation de protections solaires, l'optimisation de la ventilation naturelle et l'emploi de matériaux à forte inertie contribuent à maximiser le confort thermique des habitants.

La construction de bâtiments en mur porteur en BTC est encore très peu documentée. Les résultats obtenus lors de cette étude permettent de mettre en évidence les constats suivants :

- Les murs porteurs en BTC doivent être protégés des remontées capillaires avec des soubassements ou une structure au rez-de-chaussée résistant à l'eau. La mise en œuvre de coursives ou de débord de toiture abrite les façades des intempéries.
- L'utilisation de chaînages horizontaux aide à limiter le flambement. Les chaînages verticaux et raidisseurs reliés aux chaînages horizontaux permettent de renforcer la structure.
- La mise en œuvre de joints de dilatation tous les 5 mètres évite la dégradation de la maçonnerie, de préférence positionnés au nu des murs.
- Les BTC doivent être dimensionnées en fonction des efforts qu'elles supportent. Différents stabilisants permettent d'atteindre des résistances de plus de 11 MPa, autorisant la réalisation de bâtiment de cinq étages en mur porteurs en BTC. Cependant, pour réduire l'impact environnemental, il est conseillé d'éviter l'utilisation du ciment comme stabilisant, limitant ainsi la résistance en compression des BTC à 7 MPa. Celles-ci conviennent pour des bâtiments de trois étages.

- Le mortier doit être stabilisé avec le même liant que les BTC et avoir une résistance en compression similaire.

En intégrant les stratégies bioclimatiques dans les constructions en BTC, il est possible de créer des habitats thermiquement performants. Les archétypes développés démontrent qu'elles permettent de réduire significativement les heures d'inconfort, avec des variations de température intérieure beaucoup moins prononcées que celles extérieures. De plus, l'utilisation de brasseurs d'air voir de systèmes de refroidissement permet de garantir un confort thermique optimal.

- Les bâtiments les plus performants sont les immeubles à appartements avec moins de 700 DH en présence de brasseurs d'air, tandis que la villa est nettement moins confortable avec presque 2000 DH, soit plus du double.
 - L'ajout d'un brasseur d'air permet une réduction d'en moyenne 69% des DH
- L'Archétype 2, un immeuble de trois étages, offre le meilleur confort avec seulement 636 degrés-heures d'inconfort en présence d'un brasseur d'air. Cette approche semble être la plus adaptée aux défis actuels de Ouagadougou, assurant un bon confort thermique tout en permettant de densifier le bâti avec des BTC à faible impact environnemental.

La réalisation d'habitations en mur porteur BTC sur plusieurs niveaux soulève d'autres questionnements : Quel impact environnemental ont ces bâtiments ? Seront-ils acceptés par la population ? Leur coût sera-t-il accessible aux foyers à revenu moyen ? Ces questions devront être explorées dans le cadre de futures recherches pour garantir la viabilité et l'acceptabilité de ces solutions de logement innovantes.

Dans les années à venir, des expérimentations sur l'utilisation de BTC en murs porteurs sur plusieurs étages et le confort thermique en climat tropical permettront d'approfondir les connaissances apportées par cette étude. Elles guideront l'élaboration de réglementations permettant de généraliser de telles solutions.

9 Références

- ABNORM. (2009). *Blocs de terre comprimée spécifications techniques pour les blocs de terre comprimée ordinaires* (NBF 02-003). ABNORM; Ouagadougou, Burkina Faso. <http://abnorm.bf>
- Africa vernacular architecture. (2024). *Burkina Faso*. Africa Vernacular Architecture. <https://www.africavernaculararchitecture.com/burkina-faso/>
- Architecture studio. (2024). *Le belvédère de Ouaga*. Architecturestudio. <https://architecturestudio.fr/projets/ogd3-le-belvedere-de-ouaga/>
- Art Terre Mayotte. (s. d.). *Les projets réalisés à Mayotte*. Art Terre Mayotte. Consulté 26 mars 2024, à l'adresse <https://www.art-terre-mayotte.org/copie-de-briqueteries>
- ART.TERRE Mayotte. (2018). *ATEX de Type A n°2588 : Ouvrages en maçonnerie de Blocs de Terre Comprimée*. CSTB; Mamoudzou, Mayotte. <https://doi.org/10.58079/nahg>
- ASHRAE. (2009). *2009 ASHRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta, Georgia, USA. <https://www.ashrae.org/>
- ASHRAE. (2020). *ASHRAE Standard 55 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (1041-2336). ASHRAE; Atlanta, Georgia, USA. <https://www.ashrae.org/>
- Attia, S., & Carlucci, S. (2015). Impact of Different Thermal Comfort Models on Zero Energy Residential Buildings in Hot Climate. *Energy and Buildings*. Liège, Belgique. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.017>
- Bakhteri, J., Makhtar, A., & Sambasivam, S. (2004). Finite Element Modelling of Structural Clay Brick Masonry Subjected to Axial Compression. *Jurnal Teknologi*, 41. <https://doi.org/10.11113/jt.v41.698>
- Bâtiment commercial à usage mixte au Burkina Faso—Zaca Ouagadougou*. (2018, septembre 4). ndfk. <https://ndfk.co/zaca-projet-mix-in-ouagadougou/>
- Belinga Nko'o, C. (2006). *Etudes prospectives pour le développement d'un habitat de qualité en adobe à Koudougou, Burkina Faso* [ENSA Grenoble]. Thèse, Grenoble, France. http://craterre.org/terre.grenoble.archi.fr/documentation/downloads/DSA_Christian_Belinga.pdf
- Boubeker, S., Houben, H., Doat, P., D'Ornano, S., Douline, A., Garnier, P., Guillaud, H., Joffroy, T., & Rigassi, V. (1998). *Compressed earth blocks : Standards (Guide Séries Technologies No. 11)*. CDI&CRATerre.; Brussels, Belgium. <https://doi.org/10.58079/nado>
- CGE Immobilier. (n.d.). *Liste des biens en vente*. CGE IMMOBILIER. <https://www.cgeimmobilier.com/fr/listing-vente.html>

- Chamodat, M., Crété, E., Misse, A., Hubert, A., & Rakotomamonjy, B. (2021). *Guide de conception et de construction*. Sevrans, France. https://www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2021/06/CycleT_Guide-de-conception-et-construction_COMPLET_BD.pdf
- Climate OneBuilding. (2024). *WMO Region 1—Africa*. Climate.OneBuilding. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_1_Africa/default.html
- Commission générale de normalisation du bâtiment. (1992). *BAEL 91 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions* (BAEL 91). Centre scientifique et technique du bâtiment; Paris, France. <https://www.cstb.fr/fr/>
- de Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE Transaction*, 104, part 1. [https://doi.org/SF-98-7-3\(4106\)\(RP-884\)](https://doi.org/SF-98-7-3(4106)(RP-884))
- Dejeant, F., Garnier, P., & Joffroy, T. (2021). *Matériaux locaux, matériaux d'avenir : Ressources locales pour des villes et territoires durables en Afrique*. Villefontaine, France.
- Dejeant, F., & Joffroy, T. (2021). *Matériaux locaux, matériaux d'avenir : Ressources locales pour des villes et territoires durables en Afrique*. France. <http://archive.org/details/materiaux-locaux>
- DesignBuilder Software Ltd. (2022). *DesignBuilder* (7.0.2.006) [Logiciel]. <https://designbuilder.co.uk/download/release-software>
- Deverin, Y. (1999). De la concession rurale à la parcelle urbaine. Mutations de l'habitat en pays Mossi (région de Ouagadougou, Burkina Faso). *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 85(1), 132-139. <https://doi.org/10.3406/aru.1999.2291>
- European committee for standardization. (2007). *EN 15251* (EN 15251:2007). European committee for standardization; Brussels, Belgium. www.cen.eu
- European committee for standardization. (2013). *EN 1996 Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie* (EN 1996). European committee for standardization; Brussels, Belgium. www.cen.eu
- European committee for standardization. (2019). *EN 16798 : Energy performance of buildings—Ventilation for buildings* (EN 16798-1:2019). European committee for standardization; Brussels, Belgium. www.cen.eu
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort : Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen : Danish Technical Press; Copenhagen, Denmark. <http://archive.org/details/thermalcomfortan0000fang>
- Folkers, A. S., & van Buiten, B. A. C. (2019). Popular Housing in Ouagadougou. In A. S. Folkers & B. A. C. van Buiten (Éds.), *Modern Architecture in Africa : Practical Encounters with Intricate African Modernity* (p. 82-116). Springer International Publishing; Amsterdam, The Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01075-1_4

- Geetha, N., & Velraj, R. (2012). Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—A review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 29(2). Chennai, India. <https://doi.org/913-946>
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11-23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- Hema, C. (2020). *Optimisation des propriétés thermiques des parois dans les habitations en briques de terre comprimée au Burkina Faso* [Université de Louvain la Neuve]. Thèse, Louvain la Neuve, Belgique. <https://tinyurl.com/49da4wrz>
- INSD. (2022). *Résultats du 5E Recensement Général de la Population et de l'Habitation*. Rapport, Burkina Faso. <https://www.insd.bf/index.php/fr/resultats>
- Joffroy, T., Misse, A., Celaire, R., & Rakotomalala, L. (2017). *Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal*. Rapport, Grenoble, France. <https://hal.science/hal-02025559>
- Kaboré, M. (2015). *Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne* [Université Grenoble Alpes; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement]. Thèse, Grenoble, France.
- Kéré Architecture. (2024a). *Kéré | Work*. Kéré Architecture. <https://www.kerearchitecture.com/work>
- Kéré Architecture. (2024b). *Opéra Village*. Kere Architecture. <https://www.kerearchitecture.com/work/building/opera-village>
- Kolawole, J. T., Olalusi, O. B., & Orimogunje, A. J. (2020). Adhesive bond potential of compressed stabilised earth brick. *Structures*, 23, 812-820. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.12.024>
- Kordjamshidi, M. (2011). Thermal Comfort. In *House Rating Schemes: From Energy to Comfort Base* (p. 31-51). Springer; Heidelberg, Germany.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Lenoir, A., Baird, G., & Garde, F. (2012). Post-occupancy evaluation and experimental feedback of a net zero-energy building in a tropical climate. *Architectural Science Review*, 55(3), 156-168. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.702449>
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736-755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Monnier, R., Leroy, B., Lemonsu, A., Ouvrier Bonnaz, O., Francois, E., Wurtz, E., Ziv, N., Selouane, K., Serodio, E., Thiers, S., Schalbart, P., & Peuportier, B. (2022, mai). Etude prospective sur la résilience des bâtiments face aux canicules. *Conférence*

- IBPSA France 2022. Chalons en Champagne, France. <https://hal.science/hal-03801428>
- Nations Unies. (2023). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. Nations Unies. <https://sdgs.un.org/fr/goals>
- Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. (2024). *DIANA FEA (10.8)* [Logiciel]. <https://dianafea.com/diana-downloads/>
- Nicol, F., & Humphreys, M. (2002). Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. *Energy and Buildings*, 34, 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- 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* [Université de Liège]. Thèse, Liège, Belgique. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/247797>
- Ouedraogo, S.-N. L. A. (2022). *Confort thermique et ecohabitat utilisant au mieux les ressources locales et adaptees au contexte sahelien* [Institut 2iE]. Thèse, Ouagadougou, Burkina Faso. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=4012
- Pachta, V., Triantafyllaki, S., & Stefanidou, M. (2018). Performance of lime-based mortars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 189, 576-584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.027>
- Perrot, A., Rangeard, D., Menasria, F., & Guihéneuf, S. (2018). Strategies for optimizing the mechanical strengths of raw earth-based mortars. *Construction and Building Materials*, 167, 496-504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.055>
- P'Kla, A. (2002). *Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : Application aux maçonneries « BTC-Mortier de terre »* [These de doctorat, Lyon, INSA]. <https://theses.fr/2002ISAL0037>
- P'Kla, A., Mesbah, M. A., Rigassi, V., & Morel, J.-C. (2003). Empirical comparison of testing methods on measurements of the mechanical characteristics of soil mortars. *Materials and Structures*, 36, 108-117. <https://doi.org/10.1007/BF02479524>
- Pouffary, S., & Delaboulaye, G. (2015). *Guide du bâtiment durable en régions tropicales— Tome 1*. IFDD. <https://www.ifdd.francophonie.org/publications/guide-du-batiment-durable-en-regions-tropicales-tome-1/>
- PROFEEL. (2021). *Les solutions de rafraichissement adiabatique dans les bâtiments tertiaires en rénovation*. Agence Qualité Construction. <https://www.proreno.fr/documents/guide-rafraichissement-adiabatique-dans-les-batiments-tertiaires-en-renovation>
- Rigassi, V., & CRATerre-EAG. (1995a). *Volume I : Manuel de production*. Friedrich Vieweg & Sohn; Eschborn, Allemagne.

- Rigassi, V., & CRATerre-EAG. (1995b). *Volume II : Manuel de conception et de construction*. Friedrich Vieweg & Sohn; Eschborn, Allemagne.
- Rincón, L., Carrobé, A., Martorell, I., & Medrano, M. (2019). Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design. *Journal of Building Engineering*, 24, 100732. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100732>
- Sajanathan, K., Balagasan, B., & Sathiparan, N. (2019). Prediction of Compressive Strength of Stabilized Earth Block Masonry. *Advances in Civil Engineering*, 2019, e2072430. <https://doi.org/10.1155/2019/2072430>
- Sandoval, C., & Roca, P. (2012). Study of the influence of different parameters on the buckling behaviour of masonry walls. *Construction and Building Materials*, 35, 888-899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.053>
- Séré, S. S. (2020). *L'accès au logement des jeunes adultes à Ouagadougou (Burkina Faso) : Pratiques et stratégies résidentielles* [Phdthesis, Université Rennes 2 ; Université Joseph Ki-Zerbo]. Thèse, Ouagadougou, Burkina Faso. <https://theses.hal.science/tel-02553225>
- Tand'M Architectes. (s. d.). *Dago Lajou*. Tand'M Architectes. Consulté 26 mars 2024, à l'adresse <https://www.tand-m-architectes.com/projet/dago-lajou>
- Thys, P. (2019, septembre). *Burkina Faso*. Habitat Worldmap. <https://habitat-worldmap.org/pays/afrique/burkina-faso/>
- UEMOA. (2019). *Directive n° 05/20207CM/UEMOA fixant des mesures d'efficacité énergétique dans la construction de bâtiments dans les états membres de l'UEMOA*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Wyss, U. (2005). *La construction en « matériaux locaux »*. Swiss Agency for Development and Cooperation; Rapport, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Zoungrana, O. (2021). *De « Bancoville » à la Construction postmatérialiste : Etude Socio-anthropologique des conditions de popularisation de la Brique en Terre Comprimée (BTC) à Ouagadougou (Burkina Faso)* [Université de Liège]. Thèse, Ouagadougou, Burkina Faso. https://searchworks-lb.stanford.edu/articles/edsorb__edsorb.265068

Annexe 1 – Focus group et entretien

Les comptes rendus des focus groups et entretiens effectués au cours de ce travail de recherche sont détaillés dans cette section. Les participants ont donné leur consentement pour que les informations divulguées lors des entretiens soient utilisées dans le cadre de ce travail de recherche.

Focus group réalisé le 27 octobre 2023 avec Claudia Malgoubri et Simon-Pierre Joy Salassi

La définition du programme des archétypes a été évoqué, les informations suivantes sont énoncées :

- Les parcelles font couramment 20x30 m.
- Les bâtiments sont prévus en R+4/6. La proposition en R+6 reste à démontrer face aux défis de stabilité et de protection des intempéries.
- Le RDC est dédié à une activité commerciale, Claudia doit se renseigner sur la possibilité d'y implanter un restaurant/petit commerce (coiffeur, supérette, fleuriste, ...) ou profession libérale (docteur, avocat, comptable, ...).
- Les appartements se répartiront du T2 au T4.
- Il faut prévoir un espace extérieur commun (cuisine, buanderie, ...)
- Les balcons sont optionnels mais agréables.

Concernant la structure et l'enveloppe :

- Les fondations seront des semelles filantes.
- Le plancher est prévu en béton, d'autres options comme les planchers mixtes bois/béton ou acier/béton permettraient d'alléger la structure mais il faut étudier la disponibilité de ces matériaux. Les planchers en béton de terre (réalisé au Maroc) ont été évoqué par Simon.
- L'impact de l'eau sur le BTC devra être pris en compte dans les calculs de résistance de la structure BTC.
- L'épaisseur des murs porteur est estimé à 30cm sachant que la taille standard d'une BTC est de 14x9cm. Une double voir une triple rangée de briques est envisagée avec possibilité de laisser un jour entre les rangées.
- La présence d'isolant reste à déterminer en fonction de l'état de l'art. La possibilité d'utiliser de la paille entre les rangées de briques a été évoqué (ses avantages étant son coût faible et sa disponibilité)

Focus group réalisé le 23 novembre 2023 avec Claudia Malgoubri et Simon-Pierre Joy Salassi

Dans un premier temps les prototypes d'habitat bioclimatique en BTC sont présentés. Puis les participants émettent des remarques et des pistes d'amélioration :

- Un espace sur la parcelle pour garer les voitures de manière sécurisée doit être prévu.
- La distance entre les murs porteurs est limitée à 4 m pour restreindre la portée des dalles et l'excentricité des charges.
- Les appartements traversants sont à privilégier.

- La possibilité d'implanter un petit commerce ne procurant pas de nuisance ou une profession libérale au RDC est confirmé.
- Concernant les planchers en béton de terre, la documentation scientifique sur le sujet n'est pas conséquente. Il est préférable de ne pas le mettre en œuvre dans les archétypes
- La validation structurelle se fait sur base d'expérimentations en laboratoire. Etant donné qu'aucune expérimentation n'est faite pour le moment, nous partirons sur base de valeurs et hypothèses tirées de la littérature. Pour la simulation, nous convenons que le calcul par éléments est le plus adapté.

Entretien réalisé le 30 avril 2024 avec Christian Belinga Nko'o

Une présentation du travail effectué est présentée pendant les 30 premières minutes. Puis M. Belinga Nko'o a commenté la présentation, les principales remarques sont détaillées dans les paragraphes suivants.

Pour cadrer correctement le besoin des utilisateurs, il faut présenter une étude sociologique sur les modes d'habitat au Burkina Faso afin de mieux comprendre la façon de vivre des Burkinabés.

Le contexte urbain doit être introduit avec l'organisation spatiale de la ville de Ouagadougou. Il existe deux genres de quartier. Le centre de Ouagadougou est caractérisé par des quartiers construits entre les années trente et soixante. Il s'agit de la ville à quadrillage. Elle est caractérisée par un maillage avec des grands axes de circulation délimitant des îlots d'habitations. Plus récemment, des quartiers spontanés apparaissent au pourtour de la ville dans le grand Ouaga, ils sont appelés quartiers « non lotis ». Il préconise aussi de préciser dans quel genre de quartiers les archétypes s'intégreront et de montrer graphiquement son positionnement. Cette localisation pourra justifier les dimensions de la parcelle utilisée et les fonctions qui y seront accueillies.

De même, il est important de bien cibler le type de famille et leurs usages pour proposer des espaces fonctionnels correspondant à leurs besoins. Les interactions au sein de la concession, l'espace d'unité familiale ou plurifamiliale doivent être documentés. Dans les îlots, plusieurs familles partagent des espaces communs pour y garer un vélo, une moto, une voiture, une charrette. De nombreuses activités sociales et familiales prennent place dans la cour en particulier dans la cuisine extérieure. La structuration de ces îlots est très importante, en particulier l'organisation des espaces privés, semi-privés et public. Les habitations sont généralement protégées par une clôture, avec une mise en retrait de la vie familiale liée à des aspects sociaux et religieux. Il est important de mettre en valeur ces éléments lors de la présentation du contexte et de montrer comment ils ont été intégrés aux archétypes.

La question du bioclimatique a ensuite été abordée. En particulier, les conditions climatiques locales avec leurs contraintes sont évoquées. Le Burkina Faso est en Afrique de l'Ouest, il s'agit d'un pays enclavé, en zone sahélienne avec un climat tropical chaud et sec pour lequel il y a souvent beaucoup de poussière. L'Harmattan est le vent dominant lors de la saison sèche, il est orienté nord-est, sud-ouest. Il en découle des stratégies bioclimatiques permettant aux bâtiments de s'adapter au climat. Ces stratégies doivent être mieux mises en valeur dans la présentation et les éléments graphiques. Par exemple, la ventilation naturelle peut être optimisée en

plaçant des « nacos » aux fenêtres. Ces brises soleil en persienne permettent la circulation de l'air tout en protégeant l'habitation de la poussière et des intrusions. La cage d'escalier est un bon élément pour la ventilation naturelle, elle fait effet venturi avec un tirage d'air chaud du bas vers le haut. À l'intérieur des logements, les espaces devront être plus ouverts pour permettre la circulation de l'air tout en respectant l'intimité des occupants. En effet, les portes permettant une ventilation traversante seront très souvent fermées pour préserver l'intimité de chaque pièce ce qui empêchera une bonne circulation de l'air. L'utilisation de claustra est une solution facilement envisageable dans les archétypes. De même l'ajout d'une trappe de ventilation dans la cuisine permettrait une meilleure circulation de l'air. Les fenêtres pourraient être agrandies en particulier dans le séjour où l'apport de lumière est très apprécié. L'architecture coloniale est un bon exemple des stratégies bioclimatiques, on y retrouve de grands volumes et de hautes ouvertures qui permettent à l'air chaud de s'évacuer. Ce genre de bâtiment possède également des espaces extérieurs couverts comme des vérandas permettant des usages extérieurs. Les balcons favorisent l'accélération de l'air augmentant ainsi le renouvellement de l'air à l'intérieur. Les espaces extérieurs privatifs devront être plus généreux pour permettre des activités extérieures, par exemple, beaucoup de Burkinabé dorment à l'extérieur durant la saison chaude. Les balcons pourraient être agrandis à certains endroits pour permettre ce genre de pratique. De plus, étant en hauteur, ils garantissent une sécurité et une intimité par rapport à la rue. La grande terrasse générée sous la toiture est un espace intéressant qui pourrait être utilisé aussi bien pour des événements ponctuels que dans la vie quotidienne. En particulier, les Burkinabés apprécient ce genre d'espace le soir quand l'air circule, pour se reposer « à la fraîche ».

La norme d'efficacité énergétique des bâtiments a été évoquée avec la possibilité d'ajouter des panneaux photovoltaïques ou des chauffe-eau solaires en toiture.

La nécessité d'une étude des coûts a été soulevée. En particulier, l'accessibilité des trois archétypes par des foyers à revenu moyen a été questionnée.

La possibilité d'utiliser d'autres techniques de construction en terre comme l'adobe ou des BTC non stabilisées a été évoquée. En effet, des briques moins résistantes pourraient être utilisées aux niveaux supérieurs, supportant moins de charges.

Concernant la structure, les chaînages horizontaux sont nécessaires. Ils supportent les poutres en béton noyé dans la dalle pour les balcons et des planchers des étages. L'utilisation d'un revêtement en néoprène entre le chaînage et la dalle en béton a été évincée, n'étant pas dans une région au risque sismique important. L'utilisation de BTC stabilisées au ciment pour obtenir des résistances importantes a été questionnée. Leur impact sur l'environnement étant similaire au parpaing. La durabilité et la disponibilité du carbure de calcium ont également été évoquées.

« Aujourd'hui, avec 40 000 nouveaux urbains par jour dans les villes africaines et une explosion démographique qui est prévue pour 2050, il faut se poser les bonnes questions en termes d'utilisation de l'espace en termes de besoins d'énergie, en termes de mode d'habiter, en termes de mode de déplacement dans les villes et en termes de l'efficacité énergétique. »

Des références d'architecture ont été évoquées comme le bâtiment de la commission justice et paix à Ouagadougou. Le travail du Locomat a également été cité comme référence de l'architecture en BTC.

Concernant le choix des mortiers, il est conseillé d'utiliser les mêmes matériaux et à peu près la même résistance à la compression que la brique elle-même. Ainsi, quand le mur va se corroder avec l'abrasion du vent, du frottement humain, les deux matériaux doivent pouvoir s'user de manière uniforme. « Lorsque l'on utilise des briques très stabilisées, on peut augmenter un tout petit peu la stabilisation, donc le pourcentage de stabilisation du mortier pour que l'un soit comprimé et l'autre soit simplement posé à l'État plastique pour qu'il puisse avoir environ la même résistance que la brique elle-même. »

Concernant les joints de dilatation, la pratique la plus répandue est d'effectuer des joints creux sur les retombées d'ouvertures. Il s'agit d'une fente d'un à deux millimètres entre les briques pour laisser de l'espace entre un grand et un petit trumeau. Deux joints sont effectués au nu des fenêtres, cela permet de séparer les trumeaux qui peuvent librement se dilater.

Annexe 2 – Analyse du climat par le diagramme de Givoni

Les conditions climatiques extérieures sont analysées à l'aide du diagramme de Givoni (Givoni, 1992) adapté par Lenoir et al (2012). Il est présenté à la Figure 10-1.

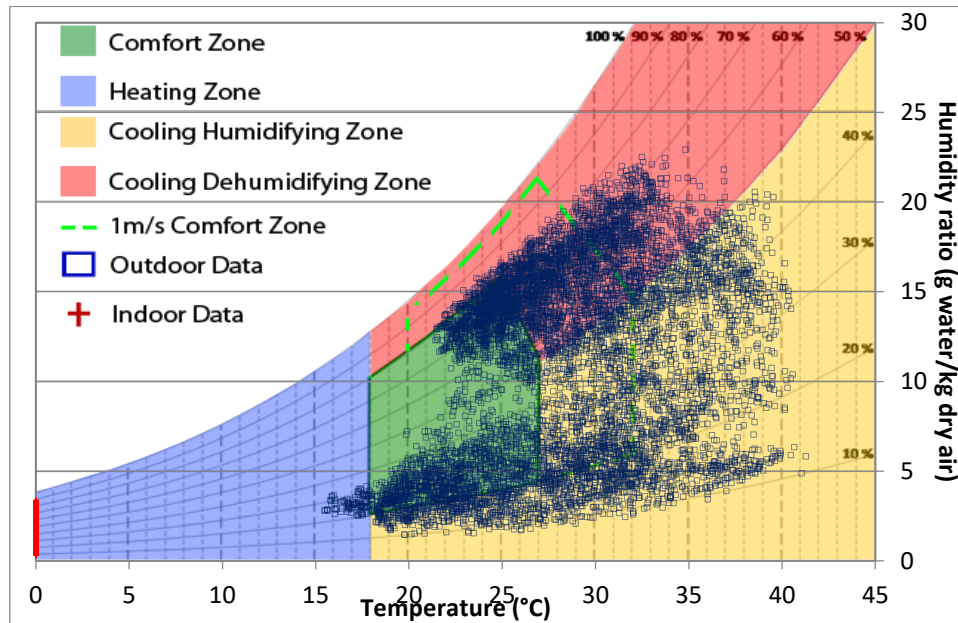


Figure 10-1: Diagramme de Givoni adapté par Lenoir et al (2012)

L'objectif du diagramme de Givoni est d'identifier les mesures à prendre pour favoriser le confort thermique. Différentes zones de sensation thermique sont représentées et associées à des stratégies limitant l'inconfort :

- Très peu de points sont dans la zone en bleu, indiquant une zone d'inconfort froid.
- 27% des points se situent dans la zone de confort en vert.
- 56% des points sont dans la zone en pointillés verts indiquant le besoin d'un brasseur d'air avec une vitesse de l'air de 1 m/s.
- 22% sont dans la zone jaune où un système de refroidissement par humidification est nécessaire pour améliorer le confort des utilisateurs.
- 16% des données se trouvent dans la zone rouge. Il faudra prévoir un système de rafraîchissement par déshumidification pour cette période.

Annexe 3 – Simulation structurelle

Cette section détaille la simulation par éléments finis effectuée par Salassi Simon Pierre Joy sur le logiciel DIANA FEA (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, 2024). Les stratégies de modélisation, les paramètres encodés et les hypothèses prises sont décrites.

Stratégie de modélisation

La modélisation d'un ouvrage en maçonnerie dans le présent projet peut se faire suivant trois stratégies : la micro-modélisation détaillée ; la micro-modélisation simplifiée (ou méso-modélisation) et la macro-modélisation. Les micro-modélisations permettent d'avoir une grande précision des résultats contrairement à la macro-modélisation est beaucoup moins précise. Cependant, son principal avantage est la rapidité des calculs et la demande en ressources informatiques relativement faible par rapport aux deux premières stratégies.

Il revient donc à l'analyste au regard des moyens à sa disposition, du temps mais surtout des paramètres et du niveau de précision recherchés, de choisir une stratégie parmi les trois sus citées. Pour la présente étude, et après prise en compte de tous ces critères, la modélisation est effectuée à l'échelle macro. La maçonnerie sera considérée comme un ensemble homogène avec des propriétés physico mécaniques prises en homogénéisant les propriétés des briques et des mortiers.

Matériaux

Comme présenté au Chapitre 0, les structures des archétypes sont essentiellement composées de murs porteurs et de planchers en béton armé. Deux matériaux ont été utilisés dans ladite modélisation :

- La maçonnerie : composée de briques de terre comprimée crues du Burkina Faso et hourdés par un mortier non spécifié. L'ensemble est considéré comme homogénéisé en un seul élément de maçonnerie détaillé par le Tableau 10-1 : Paramètres de la maçonnerie. Pour la macro-modélisation, DIANA FEA offre trois types de modèles :
 - "Multi-directional fixed crack model",
 - "Engineering Masonry model",
 - "the plasticity models to simulate cracking and crushing respectively".Selon la documentation du logiciel, le modèle dit « The anisotropic Rankine Hill plasticity model » est le plus approprié pour la maçonnerie. C'est pourquoi il a été employé dans le présent projet.
- Le béton : les éléments en béton armé sont les planchers (dalles et poutres), les poteaux supports du Rez-De-Chaussée et les escaliers. Les caractéristiques du béton utilisé dans le présent modèle sont présentées dans le Tableau 10-2.

- Les interfaces : les jonctions entre les différents matériaux ont été faites par des éléments d'interface. Pour la jonction entre poteaux et poutres, l'interface de type rigide a été utilisé. Pour les connections entre poutres et dalles, l'interface dite « Hinge » a été utilisée. Et enfin, la jonction entre les murs et les planchers a été assurée par les interfaces de type « Hinges ».

Tableau 10-1 : Paramètres de la maçonnerie

Classe	Paramètres	Unités	Valeurs
Elasticité	Module de Young E_x	N/m ²	$E_x = 3.10^9$
	Module de Young E_y		$E_x = 6.10^9$
	Module de cisaillement	N/m ²	$1.87.10^9$
	Masse volumique	Kg/m ³	1850
Fissures	Type de ruine des joints verticaux	Diagonal Stair-case cracks	
	Résistance à la traction des joints de pose	N/m ²	15.10^4
	Energie de rupture en traction (mode I)	N/m	35
	angle entre la fissure diagonale en escalier et les joints de pose	°	29.68
Paramètres de broyage	Résistance à la compression	N/m ²	8.10^6
	Energie de fracture en compression	N/m	5000
	Facteur de déformation au pic	-	4
	Facteur de déchargement 1=sécant ; 0=linéaire	-	1
Paramètre de cisaillement	Angle de frottement	°	30
	Cohesion	N/m ²	4.10^5
	Energie de fracture en cisaillement	N/m	20
Largeur de bande des fissures	Modèle de la largeur de fissures	Rots	

Tableau 10-2: Paramètres du béton selon l'EC2

Classe	Paramètres	Unités	Valeurs
Elasticité	Classe de béton		C20
	Type de ciment		Normal et prise rapide
Direct input	Type d'agrégats		Quartzite
	Module de Young	N/m ²	3.10^{10}

	Coefficient de Poisson	-	0.25
	Densité	Kg/m ³	2500
	Résistance à la compression	N/m ²	20

Chargements

Les cas de charge décrites dans la présente étude sont définis suivant deux groupes : les cas de charges permanents et les cas de charges variables.

Les cas de charges permanents sont pris suivant les matériaux qui sont couramment utilisés au Burkina Faso et les cas de charge variables sont pris selon l'utilisation future de l'ouvrage (dans notre cas usage d'habitation). Les valeurs sont considérées suivant les recommandations du BAEL 91/99 (Commission générale de normalisation du bâtiment, 1992). Le Tableau 10-3 précise les cas de charge. Les chargements hors plans tels que le vent ou encore, les chargements de neige n'ont pas été considérés.

Deux combinaisons de charge ont été faites : la combinaison à l'état limite ultime et la combinaison à l'état limite de service. Les combinaisons accidentelles n'ont pas été considérées.

Combinaison ELU : $P = 1.35G + 1.5Q$

Combinaison ELS : $P = G + Q$

Avec P : la charge de calcul ;

G : la charge totale permanente ;

Q : la charge totale d'exploitation.

Tableau 10-3: Valeurs des charges considérées

Surcharges permanente sur dalle	Epaisseur	Unités	Valeurs unitaire kN/m ²	Valeur totale kN/m ²
Chape en mortier de ciment par cm	5cm	kN/m ²	0.2	1
Carrelage scellé 9mm	9mm	kN/m ²	0.6	0.6
Distribution cloisons sur plancher	-	kN/m ²	1	1
Sous-toiture par cm	5 cm	kN/m ²	0.09	0.45
TOTAL CHARGE PERMANENETE G				3.05 kN/m ²
CHARGE D'EXPLOITATION POUR HABITATIONS				1.5kN/m ²

Analyse

L'analyse performée dans la présente étude est une analyse linéaire statique, bien que le logiciel DIANA offre des analyses plus rigoureuses (analyse non linéaire). Ce choix est basé sur la demande en mémoire relativement basse. La résolution des équations s'est faite suivant la méthode PARDISO (Parallel Direct Sparse Solver). Les paramètres de sortie sont les contraintes de Cauchy totales et locales.

Annexe 4 – Simulation thermique

L'archétype détaillé au Chapitre 0 est modélisé dans le logiciel DesignBuilder (DesignBuilder Software Ltd, 2022) pour effectuer des simulations Energisplus. Elles permettent d'obtenir des estimations fiables sur la performance thermique des archétypes. Différents facteurs sont pris en compte tels que les conditions climatiques, la volumétrie, la composition des parois, les charges internes, les scénarios de ventilations, ils sont détaillés ci-dessous.

Données climatiques

Le fichier TMY de Ouagadougou (Climate OneBuilding, 2024) est utilisé pour simuler les données climatiques. Le fichier est encodé avec les coordonnées géographiques de Ouagadougou.

Volumétrie

Les archétypes sont modélisés d'après les plans, coupes et perspectives présentés au chapitre 0. Les maquettes sont imagées à la figure

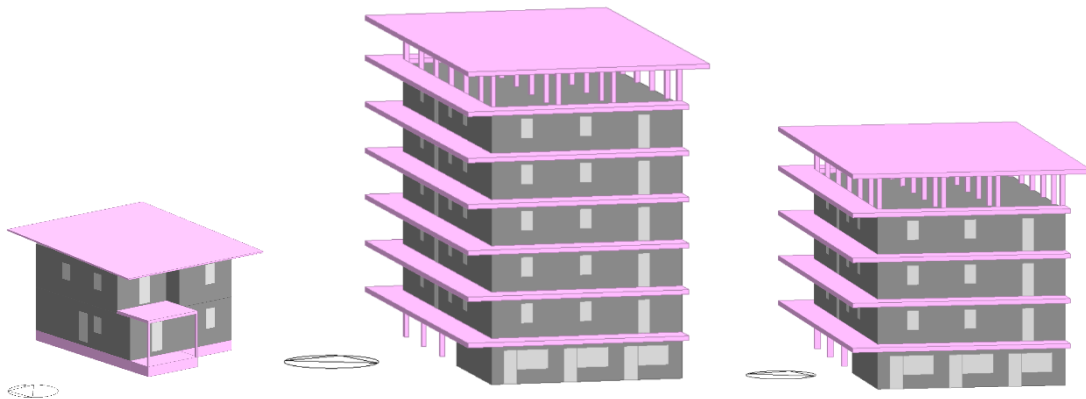


Figure 10-1 : Modèle numérique des archétypes

Composition de parois

Les matériaux encodés dans le logiciel sont détaillés au Tableau 4-1 : Propriétés des matériaux utilisés.

Nous faisons l'hypothèse que le taux d'infiltration est de 0.7 vol/h et qu'il est tout le temps actif. Les caractéristiques des vitrages sont présentées au Tableau 10-1.

Tableau 10-1 : Caractéristiques des vitrages

	Solaire	Visible
Transmission	0.74	0.82
Facteur de réflexion extérieur	0.09	0.11
Facteur de réflexion intérieur	0.1	0.12

Le facteur d'émissivité extérieur des vitrages est de 0.84 et de 0.2 pour l'émissivité intérieur.

Les protections solaires sont actives, il s'agit de store à lamelle à l'extérieur des fenêtres. Leurs caractéristiques sont détaillées à la Figure 10-2 : Caractéristiques des stores

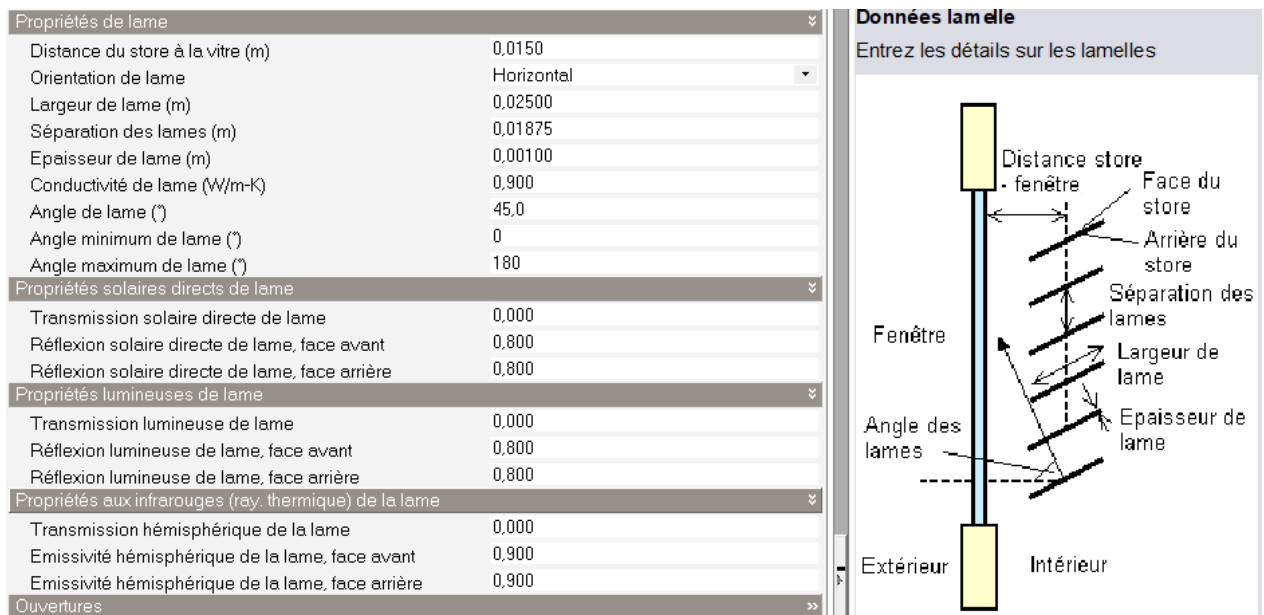


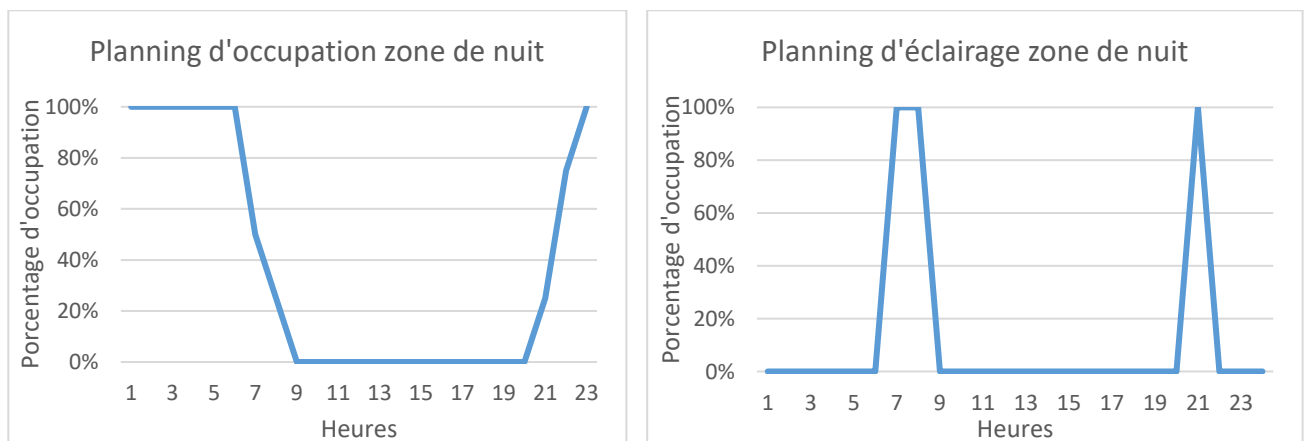
Figure 10-2 : Caractéristiques des stores

Charges internes

Les archétypes sont partagés en zone :

- Zone de vie : cuisine, séjour
- Zone de nuit : chambres
- Zone de passage : couloir, WC, salle d'eau

Les plannings d'utilisation et d'éclairage sont illustrés par la Figure 10-3.



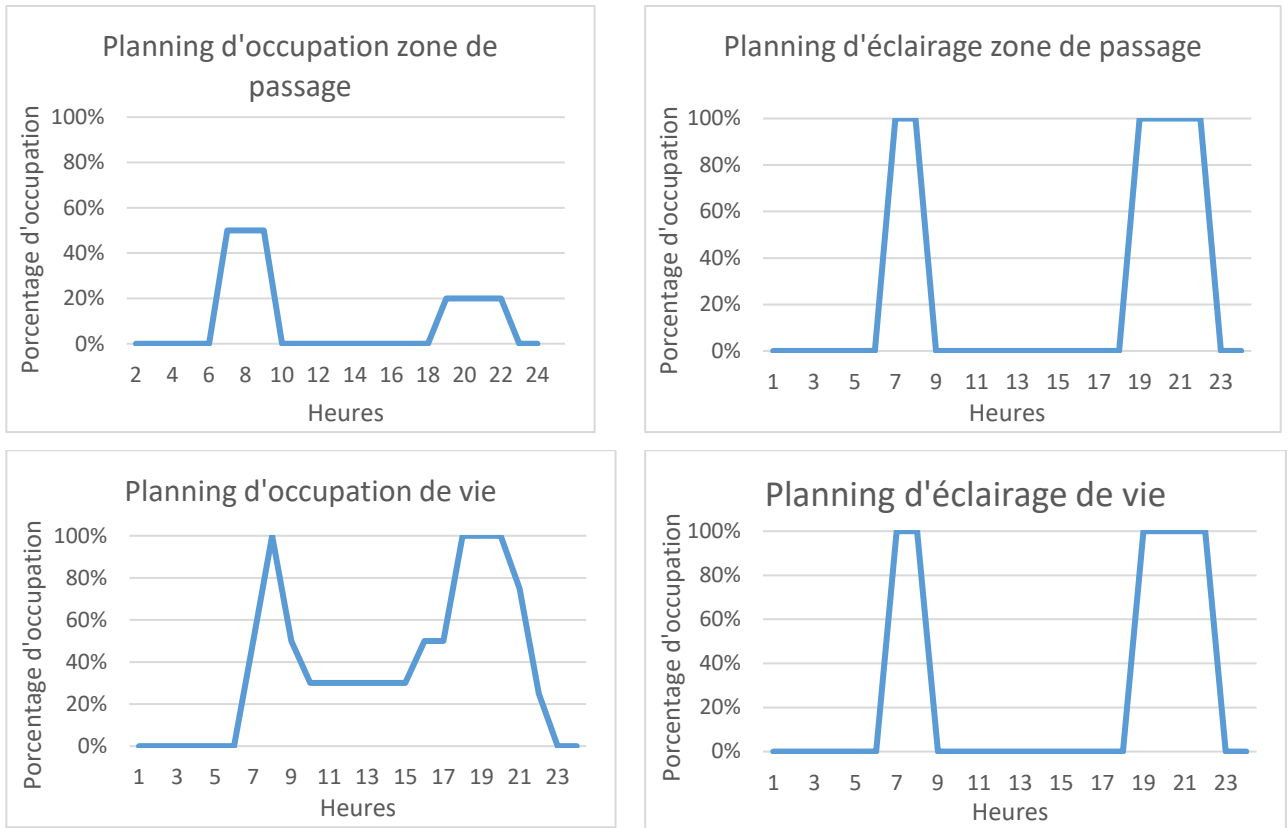


Figure 10-3 : Plannings d'occupation et d'éclairage

L'éclairage général est le seul actif, il est effectué par des luminaires suspendus ayant une densité de puissance normalisé de 5 W/m².100 lux. Les paramètres de ces éclairages sont décrits au Tableau 10-2 : Caractéristiques de l'éclairage. Aucun autre équipement électrique n'est simulé.

Tableau 10-2 : Caractéristiques de l'éclairage

	Radiante	Visible	Convective
Fraction	0.42	0.18	0.4

Scénario de ventilation

La ventilation naturelle est modélisée avec un débit de dimensionnement de 0.1 m³/s.

Dans la version originale des archétypes, la ventilation naturelle est active entre 22h et 8h. Dans le scénario de ventilation continue, elle est active 24h/24.

La version originale des archétypes n'inclus pas de système de refroidissement ni de chauffage. De plus même, l'eau chaude sanitaire et le contrôle de l'humidité n'est pas simulé.

Annexe 5 – Tableurs de traitement des données

Les données issues des simulations thermiques sur DesignBuilder (DesignBuilder Software Ltd, 2022) sont compilées dans trois fichiers différents. Chacun de ces fichiers est consacré à un archétype. Ils permettent l'analyse des données et le calcul des performances thermiques des archétypes.

Les fichiers sont nommés : « TFE_Marie_Hervier_2024_Archétype1 », « TFE_Marie_Hervier_2024_Archétype2 », « TFE_Marie_Hervier_2024_Archétype3 ».

Annexe 6 – SBD Lab poster



Conception d'archétypes d'habitat bioclimatique en briques de terre comprimée à Ouagadougou, Burkina Faso

Authors: Marie Hervier

E-mail: Marie.hervier@student.uliege.be
Address: Sustainable Building Design Lab
Quartier Polytech 1
Allée de la Découverte 9
4000 Liège, Belgium
www.sbd.ulg.ac.be
Tel: +32 43.66.91.55
Fax: +32 43.66.29.09

RÉSUMÉ

Ce travail vise à concevoir des archétypes d'habitat bioclimatique de plusieurs niveaux à Ouagadougou. Pour ce faire, une étude approfondie des conditions climatiques, du contexte urbain et social ainsi que des propriétés des briques de terre comprimée (BTC) a été réalisée afin de proposer une architecture adaptée à son environnement. Une évaluation structurelle et thermique permet d'analyser les performances des solutions développées. Cette étude met en avant les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour la construction de logements en BTC et contribue à améliorer l'image de ce matériau auprès de la population.

MOTS CLÉS

BTC, terre crue, refroidissement passif, bâtiment durable, confort thermique, construction écologique, design solution, simulation

PROBLÉMATIQUE

Ouagadougou, est marquée par une forte demande en logement accompagnée d'un étalement urbain important. La construction d'habitations en BTC sur plusieurs étages offre une solution durable et résiliente. Malgré ces avantages, la BTC est perçue négativement et peu utilisée. Associée aux constructions de bas standing, la population lui préfère des matériaux et une architecture d'inspiration occidentale qui ne sont pas adaptés aux conditions climatiques locales. Promouvoir la BTC, intégrée à une architecture bioclimatique, pourrait améliorer les conditions de vie tout en utilisant des ressources locales.

OBJECTIFS

Le but de ce travail est d'encourager la population de Ouagadougou à construire en BTC, il se traduit en 3 objectifs :

- Concevoir 3 archétypes d'habitat bioclimatique
- Etudier la résistance de murs porteurs en BTC
- Evaluer le confort thermique d'habitat en BTC

AUDIENCE

Concepteurs, communauté scientifique, promoteurs immobiliers, population et pouvoir public burkinabé

QUESTION DE RECHERCHE

Comment concilier qualité architecturale et confort thermique en construction BTC ?

- Comment intégrer les stratégies développées autour de la construction « dense » et bioclimatique dans des archétypes adaptés au contexte de Ouagadougou ?
- Dans quelle mesure les BTC sont compatibles avec la construction d'habitations de plusieurs niveaux ?
- Dans quelle mesure une habitation en BTC est confortable thermiquement ?

INNOVATION

L'une des grandes forces de ce travail est son approche interdisciplinaire, intégrant le confort thermique, la résistance structurelle et les pratiques sociales locales dans la conception des bâtiments. Cette étude propose un concept novateur d'immeuble à appartements en BTC. L'utilisation de murs porteurs en BTC sur plusieurs étages marque une avancée dans la construction durable au Burkina Faso. Enfin, l'étude se distingue par une évaluation combinée et rigoureuse du confort thermique et de la structure, validée par des simulations.

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie s'articule en plusieurs étapes. Tout d'abord, une collecte et une analyse du contexte Ouagalais sont réalisées pour guider la conception. Par la suite, des prototypes d'archétypes sont développés avec l'aide d'experts en architecture de terre crue burkinabé, aboutissant à la production de documents et de maquettes numériques. Enfin, la validation structurelle est effectuée à l'aide de simulations par éléments finis, suivies d'une évaluation du confort thermique grâce à des simulations sur le logiciel EnergyPlus.

RESULTATS

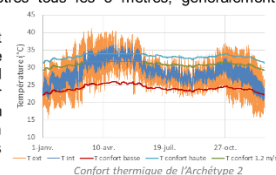
Ce travail présente la conception de trois archétypes d'habitations bioclimatiques à Ouagadougou répondant aux besoins des populations locales :

	Typologie	Résistance en compression des BTC	Degrés heures d'inconfort
Archétype 1	Immeuble R+5	11 MPa	779 °C.h
Archétype 2	Immeuble R+3	5,4 MPa	636 °C.h
Archétype 3	Villa R+1	1,7 MPa	1987 °C.h

Les BTC des archétypes 1 et 2 sont stabilisées avec des liants à faible impact environnemental contrairement à ceux de l'archétype 3 nécessitant du ciment. Il est recommandé d'utiliser un mortier de terre de résistance similaire et stabilisée avec le même liant que les BTC.

Pour la mise en œuvre de murs porteurs en BTC sur plusieurs étages, l'intégration de chaînages horizontaux, verticaux et de raidisseurs est essentielle pour limiter les phénomènes de flambement. De plus, il faut prévoir un joint de dilatation continu sur toute la hauteur du mur, avec des fentes de 1 à 2 millimètres tous les 5 mètres, généralement placés au nu des ouvertures.

En termes de confort thermique, l'archétype 2 est le plus performant, avec 636 DH d'inconfort lorsqu'un brasseur d'air est utilisé. L'ajout d'un brasseur d'air réduit en moyenne les degrés-heures d'inconfort de 69%.



L'archétype 3 est nettement moins confortable que les archétypes 1 et 2, avec deux fois plus de degrés-heures d'inconfort. En effet l'archétype 3 est dépourvu de balcon, qui offre un ombrage aux façades des immeubles à appartement.

CONCLUSION

Cette étude propose trois archétypes adaptés à divers quartiers et types de foyers. La stabilité et la durabilité des édifices sont assurées par un dimensionnement précis de la structure. L'intégration de principes bioclimatiques aide à limiter la surchauffe dans les logements. Parmi eux, l'archétype 2, un immeuble à appartements en R+3, semble être la solution la plus adaptée aux problématiques actuelles de Ouagadougou. Tout en garantissant un bon confort thermique, il permet de densifier le bâti avec des BTC à faible impact environnemental.

RÉFÉRENCES

Kaboré, M. (2015). *Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne* [Université Grenoble Alpes; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement]. Thèse, Grenoble, France.
Sajanthan, K., Balagasan, B., & Sathiparan, N. (2019). Prediction of Compressive Strength of Stabilized Earth Block Masonry. *Advances in Civil Engineering*, 2019, e2072430.