



INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

THESE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

Spécialité : **MATERIAUX**

Présentée et soutenue publiquement

par

OUEDRAOGO Sountong-Noma Louis Arnaud

le 10 Mai 2022

Réf : 2iE/2022-03

CONFORT THERMIQUE ET ECOHABITAT UTILISANT AU MIEUX LES RESSOURCES LOCALES ET ADAPTEES AU CONTEXTE SAHELIEN

JURY

M. Abdoulaye OUEDRAOGO, Professeur Titulaire, UO JK-Z, Burkina Faso	Président
M. Dorothé Barthélémy AZILINON, Professeur Titulaire, Université Cheikh Anta DIOP, Sénégal	Rapporteur
M. Mohamed GIBIGAYE, Professeur Titulaire, Université d'ABOMEY-CALAVI, Bénin	Rapporteur
M. Adamah MESSAN, Maître de Conférences CAMES, Institut 2iE, Burkina Faso	Examineur
M. Bétaboalé NAON, Maître de Conférences CAMES, Université NAZI BONI, Burkina Faso	Examineur
M. Yézouma COULIBALY, Maître de Conférences CAMES, Institut 2iE, Burkina Faso	Directeur de thèse

**Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD)
Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE)**

Dédicace

À ma regrettée mère, Emilienne qui nous a quittés trop tôt

Remerciements

Comme on le dit souvent « toutes les histoires ont une fin, mais pour chaque fin il y a toujours un nouveau départ ». C'est avec beaucoup d'émotions que j'écris cette partie qui est l'une des plus importantes de ma thèse.

J'espère de tout cœur que ce travail participera à faire avancer la recherche et la réussite dans le secteur du bâtiment.

Mais cette réussite n'aurait pas pu être possible sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes.

À cette occasion, j'ai une pensée pour les nombreuses personnes sans l'aide ou les encouragements desquels rien de tout cela n'aurait pu être réalisé.

Avant tout propos, j'exprime ma reconnaissance à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). C'est à cet institut que je dois ma formation initiale d'Ingénieur (2007-2012), et c'est toujours dans ce cadre que j'ai évolué professionnellement en tant qu'Assistant d'Enseignement et de Recherche, depuis 2013, puis doctorant en 2016. C'est l'occasion d'adresser aussi ma reconnaissance au programme de bourses (DAAD) « Deutscher Akademischer Austauschdienst » pour leur soutien financier des travaux de cette thèse.

J'adresse ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Professeur Yézouma COULIBALY qui a assuré la direction de ces travaux. Merci de m'avoir fait confiance pour mener à bien cette thèse ainsi que pour tous les conseils et l'encadrement scientifique prodigués durant ces années. Votre encadrement a tout simplement été exemplaire. Merci de votre investissement en temps, en ressources et d'avoir mis à ma disposition le cadre et les moyens nécessaires pour la réussite et le bon déroulement de mes travaux. Vous avez été pour moi un modèle de rigueur scientifique, d'esprit critique, de clairvoyance. Infiniment merci de tout et surtout de cette grande patience que vous avez eue à mon égard.

Ma gratitude va aussi à l'endroit de mon Encadreur, Professeur Adamah MESSAN et Responsable de LEMHaD. Merci de m'avoir accueilli au sein du laboratoire et de m'avoir encadré tout le long de cette thèse. Votre encadrement m'a permis de m'épanouir et progresser en tant que chercheur. Merci de votre compréhension, votre esprit d'équipe, vos apports, votre sens critique. Merci du soutien, multiforme et inconditionnel, qui m'ont permis de mener à bien cette thèse. Je vous suis très reconnaissant.

Mes pensées vont droit à mon Encadreur, Professeur Daniel YAMEGUEU NGUEWO, grand merci de votre encadrement, vos conseils, votre bonne collaboration et votre aide toujours précieuse. Merci de votre complémentarité et vos conseils judicieux qui ont fortement contribué à cette thèse.

Aux membres du jury, je voudrais remercier Professeur Abdoulaye OUEDRAOGO, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Mes remerciements vont également à l'endroit des Professeurs Dorothé Barthélémy AZILINON et Mohamed GIBIGAYE d'avoir accepté d'évaluer ce travail en qualité de rapporteurs. Je remercie par ailleurs professeur Bétaoalé NAON d'avoir accepté d'examiner ce travail. Vos contributions ont permis d'améliorer ce manuscrit.

Je suis reconnaissant au Professeur Harouna KARAMBIRI, Directeur de la recherche et Professeur Wennd Kouni Igor OUEDRAOGO, Responsable de l'École Doctorale de 2iE (ED-2iE), qui ont été d'un grand soutien et source de conseils pour cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à mes collègues et mentors Dr Yasmine TRAORE, Dr Nafissatou SAVADOGO, Mme Marie Thérèse Marame MBENGUE, Mme Inès Gwladys OUEDRAOGO. Mme Professeur Abdou Lawane GANA, Dr Césaire HEMA, Dr Adjadi Lawani MOUNIROU, Dr Ousmane Roland YONABA, Dr Omar SORE, Dr Ibrahim NEYA, Dr Décroly DJOUBISSIE DENOUWE, Dr Philbert NSHIMIYIMANA, Dr Cheick ZOURE, Moussa Diagne FAYE, M. Moussa LO, Dr Christian RAMADJI, Dr Ousmane ZOUNGRANA, M. Salifou KABORE de vos encouragements.

Je remercie également mes collègues doctorants au sein des laboratoires LEMHaD de leurs soutiens moraux, Djidoula TAKO, Daniel Yawo ADUFU, Hassane SEINI MOUSSA, Mamadou Pousga Junior KABORE, Kader BANAOU DJIBO, Illiassou SALOU NOUHOUN et tous les doctorants de l'institut 2iE.

À tout le personnel du LEMHaD, je vous remercie de votre franche collaboration.

À mes amis proches, Serge Marc et Arthur, merci du soutien, mes frères.

Je tiens à remercier ma famille, parce que sans eux, rien n'aurait été possible.

À ma mère Emilienne TARPAGHA qui nous a quitté trop tôt, que Dieu puisse l'accueillir dans son infinie miséricorde, en ce moment aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours eu à ton égard. Que ton âme repose en paix maman.

À mon très cher père Marc OUEDRAOGO, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation. À mes frères et sœurs, Alice, Arsène et Aristide, merci du soutien indéfectible depuis le début de cette thèse.

Je garde aussi un sentiment de gratitude à l'endroit de mon épouse Olivia pour m'avoir soutenu durant ces années de thèse et surtout pendant les moments de stress.

À mes enfants : Naïs, Naelle et André pour leur compréhension.

Enfin, un grand merci à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté, d'une manière ou d'une autre, aide et soutien pour la réalisation de cette thèse...

Merci infiniment...

Résumé

En Afrique, les acteurs dans le secteur du bâtiment emploient parfois des matériaux de construction souvent inadaptés aux conditions climatiques et qui causent un réel problème de confort thermique intérieure. Cette thèse est une contribution dans la recherche d'amélioration du confort thermique dans les bâtiments peu coûteux en évolution libre, situés dans chaque région climatique du Burkina Faso. Pour ce faire, il est proposé un modèle adaptatif, basé sur une combinaison de paramètre telle que la température opérative, la nouvelle température effective et les paramètres de base du confort thermique. Elle a conduit à concevoir et définir des zones de confort thermiques sur le diagramme de l'air humide pour chaque région climatique du Burkina Faso et à les utiliser pour caractériser le confort thermique dans divers types de locaux d'habitation. Un indice de confort à long terme a été défini et permet d'évaluer le degré d'inconfort thermique pour divers types d'habitations. L'instrumentation des bâtiments pilotes, les enquêtes sur le terrain et les paramètres climatiques des trois régions climatiques ont permis de juger cette méthode d'évaluation de l'inconfort thermique. Celui-ci est de 82,7 %, 74,7 % et 76,6 % respectivement pour Dori, Ouagadougou et Bobo Dioulasso. Les expérimentations ont été essentiellement faites sur deux pilotes symbolisant l'habitat à faible coût rencontré en majorité dans le pays. Leurs niveaux d'inconfort évalués sont presque identiques et sont de 73,9 % pour le bâtiment en bloc de terre comprimé et 74,4 % pour le celui en parpaing alvéolé de ciment. Les enquêtes sur terrain réalisées uniquement dans la région de Ouagadougou ont permis d'interviewer au total 430 individus sur le confort thermique ressenti dans des bâtiments en évolution libre. Les résultats des votes ont révélé 45 % des occupants dans le confort et 55 % dans l'inconfort. Les résultats obtenus avec le nouvel outil d'évaluation du confort thermique mis en place sont de 51,6 % pour le confort et 48,4 % pour les occupants en inconfort. L'analyse des résultats d'enquête et des résultats de modélisation a permis de valider le nouvel outil d'évaluation avec une erreur relative de 13 %.

Mots-clés : Confort thermique, Température opérative, Nouvelle température effective, Zone de confort thermique, Indice de confort thermique.

Abstract

In Africa, the building sector uses building materials that are often unsuitable for climatic conditions which cause a real problem of indoor thermal comfort. This thesis contributes toward assessing and improving the thermal comfort, specific to each climatic region of Burkina Faso, in low cost buildings in free evolution. The study proposed a simple method based on the adaptive model which relies on a combination of parameters such as the operative temperature, the new effective temperature and the basic parameters of thermal comfort. It led to the design and definition of thermal comfort zones on the humid air diagram for each climatic region of Burkina Faso and to use them to characterize the thermal comfort in various types of dwellings. A long-term comfort index has been defined and makes it possible to assess the degree of thermal discomfort for various types of dwellings. The instrumentation of the pilot buildings, the field surveys and the climatic parameters of the three climatic regions made it possible to assess this method of evaluating the thermal discomfort. The results showed that the thermal discomfort is 82.7%, 74.7% and 76.6% respectively for Dori, Ouagadougou and Bobo Dioulasso regions. The experiments were mainly carried out on two pilot buildings representing the main types of low-cost housing encountered in the country. It showed that the levels of thermal discomfort are almost identical: 73.9% for the building whose wall masonry is made of compressed earth block and 74.4% for that made of cement block. The field surveys carried out only in the Ouagadougou region made it possible to interview a total of 430 individuals on their feeling of the thermal comfort in buildings in free evolution. The results of the surveys revealed that 45% of the occupants are in thermal comfort and 55% are in discomfort, with respect to the adaptative thermal assessment method. The results obtained with respect to the newly proposed thermal comfort assessment tool shows that 51.6% of the occupants are in comfort and 48.4% of the occupants are in discomfort. The analysis of the results from the survey and the proposed tool made it possible to validate the new thermal comfort evaluation tool with a relative error of 13%.

Keywords: Thermal comfort, Operative temperature, New effective temperature, Thermal comfort zone, Thermal comfort index.

Sommaire

Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	vi
Abstract	vi
Sommaire.....	viii
Liste des figures	xii
Liste des Tableaux.....	xiv
Liste des sigles et abréviations.....	xv
Liste des annexes	xv
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I. État de l’art sur le confort thermique	5
I-1. Introduction.....	6
I-2. Architecture bioclimatique.....	6
I-3. Le confort thermique.....	8
I-4. Interaction thermique entre le bâtiment et son milieu	8
I-5. Technique du refroidissement passif	9
I-5.1. Protection au rayonnement.....	9
I-5.2. Inertie thermique	10
I-6. Matériaux localement disponibles	11
I-7. Indices et définition du confort thermique	13
I-7.1. Indices de confort	13
I-7.2. Approche analytique du confort thermique.....	14
I-7.3. Approche empirique du confort thermique	17
I-8. Conclusion	19

CHAPITRE II. Climat et Habitats au Burkina Faso 20

II-1. Introduction	21
II-2. Climat du Burkina Faso	21
II-2.1. Données météorologiques	24
II-2.2. Climat de la région de Dori.....	26
II-2.3. Climat de la région de Ouagadougou.....	27
II-2.4. Climat de la région de Bobo Dioulasso	29
II-3. Habitat du Burkina Faso	31
II-3.1. Problèmes liés à l'urbanisation	31
II-3.2. Matériaux de construction.....	33
II-3.3. Typologie de l'habitat au Burkina Faso	35
II-4. Conclusion	36

CHAPITRE III. Méthodologie et dispositif expérimental 38

III-1. Introduction	39
III-2. Description des pilotes expérimentaux	39
III-2.1. Présentation de la plateforme.....	39
III-2.2. Présentation des bâtiments pilotes	40
III-3. Instrumentation des pilotes et méthodologie expérimentale	46
III-3.1. Instrumentation	46
III-3.2. Méthodologie expérimentale	49
III-4. Enquêtes sur site	51
III-4.1. Fiche d'enquêtes	51
III-4.2. Mode opératoire de l'enquête	52
III-4.3. Caractéristique de l'échantillon	52
III-5. Conclusion.....	54

CHAPITRE IV. Modèle d'évaluation du confort intérieur des bâtiments .55

IV-1. Introduction.....	56
-------------------------	----

IV-2. État de bien être thermique	56
IV-2.1. Le métabolisme	58
IV-2.2. Résistance thermique de l'habillement.....	58
IV-3. Les paramètres des modèles de confort	60
IV-3.1. La température moyenne mensuelle T_m	60
IV-3.2. Température de neutralité T_n	60
IV-3.3. Température opérative T_o	61
IV-3.4. La température effective ET	62
IV-3.5. La nouvelle température effective ET^*	63
IV-4. Calculs pratiques des indices de confort	65
IV-4.1. Coefficients d'échange thermique convectif h_c et radiatif h_r autour d'un corps humain.....	65
IV-4.2. Indice du confort à long terme	69
IV-5. Outil d'évaluation du confort thermique.....	69
IV-5.1. Modèle adaptatif de confort.....	69
IV-5.2. Outil d'aide à la décision du confort thermique	70
IV-6. Zones de confort des trois régions du Burkina Faso	71
IV-6.1. Zone de confort de la région de Dori	72
IV-6.2. Zone de confort de la région de Ouagadougou	73
IV-6.3. Zone de confort de la région de Bobo Dioulasso.	73
IV-7. Conclusion	75
CHAPITRE V. Mesure des sensations thermiques des ambiances et validation du modèle.	76
V-1. Introduction	77
V-2. Confort extérieur	77
V-3. Confort intérieur	82
V-4. Validation du modèle par les résultats d'enquête.....	85

V-5. Discussion	87
V-6. Conclusion.....	88
Conclusion générale et perspectives	90
Bibliographie.....	94
Annexes.....	I

Liste des figures

Figure I-1: Interaction entre l'homme et son milieu (Toby et al., 2017).....	9
Figure I-2 : Les rayonnements solaires (Bernard, 2020).....	10
Figure I-3: Réponse thermique de la propagation d'onde au travers un mur. (a) Amortissement de l'onde thermique extérieure à travers la paroi, (b) Déphasage thermique dû à l'inertie du mur. (HOUOT, 2018) (VERBEKE and AUDENAERT, 2018).	11
Figure I-4: Zone d'utilisation des matériaux latéritiques, observation sur le terrain (WYSS, 2005b).	12
Figure I-5: Représentation du PPD en fonction du PMV.....	15
Figure I-6: Zone de confort thermique développé par (GIVONI, 1992)	16
Figure I-7: Corrélation entre la température de neutralité et la température moyenne extérieure pour les bâtiments conditionnés et les bâtiments en évolutions libres (NICOL and HUMPHREYS, 2020).....	18
Figure II-1: Situation géographique du Burkina Faso (INSD, 2012).....	22
Figure II-2: Zones climatiques du Burkina Faso. Données obtenues auprès de l'Agence nationale de météorologie (ANAM-BF) du Burkina Faso.....	23
Figure II-3: Températures pluriannuelles maximales (a), minimales (b) dans les trois villes représentatives des zones climatique du Burkina Faso	25
Figure II-4: L'amplitude thermique des zones climatiques de Dori, Ouagadougou et Bobo Dioulasso.....	26
Figure II-5: Histogramme des températures annuelles de la région de Dori	27
Figure II-6: Fréquences journalières de : (a) Températures, (b) Humidité relative (c) Vitesse du vent de la région de Dori.....	27
Figure II-7: Températures annuelles de la région de Ouagadougou	28
Figure II-8: Fréquences journalières des Températures (a), Humidité relative (b), Vitesse du vent (c), Radiations globales (d) de la région de Ouagadougou	29
Figure II-9: Températures annuelles de la région de Bobo Dioulasso	30
Figure II-10: Fréquences journalières des Températures (a), Humidité relative (b), Vitesse du vent (c) de la région de Bobo Dioulasso	31
Figure II-11: Image aérienne montrant la polarisation sociale.....	32
Figure II-12: Les types de matériaux de construction (a) Bloc de terre comprimée (b), Les adobes, (c) Bloc de latérite taillée, (d) Parpaing de ciment.	34

Figure II-13: Constructions modernes rencontrées en zone urbaine (a) Bâtiment moderne en béton armé à plusieurs niveaux d'étages, (b) Bâtiment moderne réalisé en parpaing de ciment, (c) Bâtiment en voûte nubienne réalisé en adobe, (d) Bâtiment réalisé en BLT ou en BTC, (e) Bâtiment réalisé en adobe.	35
Figure II-14: Constructions rencontrées en zone rurale (WYSS, 2005c), (a) Bâtiment individuel en adobe, (b) Maison en terre avec toiture-terrasse, (c) solivage en bois local qui sert de support à la toiture-terrasse, (d) Case ovoïde d'adobe avec toiture en chaume sur natte, (e) Bâtiment avec enduit en terre à plusieurs pigments, (f) Charpente en bois importé qui sert de support à la couverture en tôle.	36
Figure III-1: Plateforme expérimentale	39
Figure III-2 : Plans architecturaux communs aux bâtiments pilotes, (a) vue en plan et vue en coupe, (b) les différentes façades.	42
Figure III-3 : Confection de parpaing de ciment et construction du bâtiment pilote N°1 (OUEDRAOGO, 2016).	43
Figure III-4 : Confection de blocs de terre comprimée et construction du bâtiment pilote N°2 (OUEDRAOGO, 2016).	44
Figure III-5 : Plan de masse des bâtiments pilotes sur le site expérimental.	45
Figure III-6 : Rayons d'incidence du soleil au lever et au coucher du soleil (OUEDRAOGO, 2016).	46
Figure III-7 : (a) Micropuces (Thermopuces et Thermohygropuces), (b) Appareil d'acquisition de paramètres climatiques.	47
Figure III-8 : Disposition des micropuces dans les pilotes	48
Figure III-9 : (a) présentation de l'instrument de mesure de Delta OHM de type HD 32.3 (b) disposition dans le pilote.	49
Figure III-10: Dispositif de collecte et de traitement des données des micropuces	50
Figure III-11: Dispositif de collecte et de traitement des données de la HD32.3	50
Figure III-12: Fréquences des jugements de l'enquête	53
Figure III-13: Souhaits de changement des conditions thermiques de l'ambiance par les votants	53
Figure IV-1: Échanges thermiques entre le corps et le milieu extérieur (ASHRAE, 2013; DJONGYANG et al., 2010).	57
Figure IV-2 : Courbes égales sensations thermiques effectives <i>ET</i> (AULICIEMS et al., 1997).	63

Figure IV-3: Courbes égales sensation ET^* sur le diagramme de Carrier	65
Figure IV-4 : Modèle simplifié du corps humain en convection libre ou forcée	66
Figure IV-5 : Droite de neutralité thermique (ASHRAE Standard 55, 2013).....	70
Figure IV-6: Outil d'aide à la décision du confort thermique.....	71
Figure IV-7 : Zone de confort thermique adapté à la ville de Dori.....	72
Figure IV-8 : Zone de confort thermique adapté à la ville de Ouagadougou.....	73
Figure IV-9 : Zone de confort thermique adapté à la ville de Bobo Dioulasso	74
Figure V-1: Courbe d'évaluation de Dori. (a) États climatiques et confort thermique de la région ; (b) Nombre d'heures et indice de confort et d'inconfort de la région.	79
Figure V-2 : Courbe d'évaluation de Ouagadougou (a) États climatiques et confort thermique de la région ; (b) Nombre d'heures et indice de confort et d'inconfort de la région.	80
Figure V-3: Courbe d'évaluation de Bobo Dioulasso (a) États climatiques et confort thermique de la région ; (b) Nombre d'heures et indice de confort et d'inconfort de la région.	81
Figure V-4: Courbe d'évaluation du pilote en BTC. (a) Représentation des états hygrothermiques du bâtiment BTC ; (b) Nombre d'heures de confort et d'inconfort du bâtiment en BTC.	83
Figure V-5: Courbe d'évaluation du pilote en parpaings de ciment. (a) Représentation des états hygrothermiques du bâtiment en bloc de parpaings de ciment ; (b) Nombre d'heures de confort et d'inconfort du bâtiment en bloc de parpaings de ciment.	84
Figure V-6 : (a) Sensation de confort thermique des occupants satisfaits de leur environnement ; (b) Prédiction en pourcentage des votes.	86

Liste des Tableaux

Tableau I-1: Constantes proposées pour la formule de régression linéaire de l'Eq. I-3.....	19
Tableau II-2: Récapitulatif des températures moyennes maximales et moyennes minimales.	25
Tableau III-1 : les caractéristiques physiques des matériaux	44
Tableau III-2 : Paramètres climatiques mesurés par l'appareil HD32.2 de Delta OHM.....	46
Tableau IV-1 : Métabolisme en fonction de l'activité (Auliciems et al., 1997).....	58
Tableau IV-2 : Résistance thermique de l'habillement	59
Tableau IV-3: Seuils de température du corps humain (Auliciems et al., 1997)	60
Tableau IV-4 : Segmentation du corps d'un individu moyen R. J. de Dear (de Dear et al., 1997)	67
Tableau IV-5: Les coefficients convectifs en fonction de chaque partie du corps.....	68

Liste des sigles et abréviations

IEA	Agence Internationale de l’Energie « International Energy Agency »
ASHRAE	Société américaine du chauffage, réfrigération et conditionnement d’air “American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning”
BTC	Brique de terre compressée/comprimée
PC	Parpaing alvéolé de ciment
BLT	Bloc de latérite taillée
ISO	Organisation internationale de normalisation « International Organization for Standardization »
EN	Norme européenne “European norm”
BBC	Building BioClimatic Chart
PMV	Vote Moyen Prévisible « Predicted mean vote »
PPD	Pourcentage Prévisible d’Insatisfaits « Predicted percentage dissatisfied »
WBGT	Température au thermomètre globe humide « Wet Bulb Globe Temperature »
CVC	Climatisation-Ventilation-chauffage
MHU	Ministère de l’Habitat et de l’Urbanisme
DIN	Institut allemand de normalisation « Deutsches Institut für Normung »
NTC	Coefficient de Température Négatif « Negative Temperature Coefficient »
ABNORM	L’Agence Burkinabé de Normalisation, de la Métrologie et de la Qualité
ANAM-BF	L’Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso
INSD	Institut Nationale de la Statistique et de la démographie
DAAD	« Deutscher Akademischer Austauschdienst »

Liste des annexes

Annexe 1	Fiche d’enquête sur le confort thermique dans le bâtiment.
Annexe 2	Article publié en 2021 dans le « International Journal of Building Pathology and Adaptation ».

Introduction générale

L'Afrique subsaharienne connaît une forte croissance démographique. La population urbaine en particulier devrait atteindre 50% en 2020 et 65% en 2050 selon ONU Habitat (ONU-Habitat, 2020). Le Burkina Faso est un pays d'Afrique subsaharienne doté de ressources naturelles dont très peu sont exploitées. Son taux d'urbanisation était de 32% en 2016. Il est estimé à 34% en 2020 et atteindrait 59% en 2050 (ONU-Habitat, 2020). Le pays est situé dans une zone dont le climat est tropical et aride avec une intensité variable selon les saisons et les régions. Il a une superficie de 274 000 km² et est délimité par six états : le Mali, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo, le Bénin et le Niger. Il partage ses frontières avec ces six pays sur 3193 km. Le Burkina Faso est un pays plat avec pour point culminant le mont Tenakourou qui a une altitude de 747 m. Il possède un climat tropical avec une saison sèche et une saison pluvieuse. Dans ce contexte d'urbanisation galopante, il est nécessaire de soutenir cette croissance démographique en termes de logements pour les habitants aussi bien des villes que des villages dont l'habitat est le plus souvent à évolution libre c'est-à-dire sans climatisation. Pour cela, l'objectif visé dans ce contexte est de proposer des logements économiquement abordables et thermiquement confortables, c'est-à-dire adaptés aux conditions climatiques locales (HEMA et al., 2017; NEYA et al., 2020).

Au Burkina Faso les charges énergétiques pour le refroidissement des bâtiments publics augmenteraient de 99% d'ici 2080 (OUEDRAOGO et al., 2012). C'est pourquoi les stratégies passives de l'architecture bioclimatique représentent une réelle opportunité pour améliorer les conditions thermiques intérieures des bâtiments, tout en participant à la protection de l'environnement (NEYA, 2020).

Dans le secteur du bâtiment, les constructions modernes utilisent des matériaux tels que le ciment, le bois et l'acier qui ne sont pas toujours adaptés aux conditions climatiques chaudes et sèches du Burkina Faso. Ceci fait croître le coût de la climatisation (WYSS, 2005a) ou augmenter l'inconfort des bâtiments non climatisés.

Des études scientifiques sont menées depuis plusieurs décennies pour développer des standards d'évaluation du confort thermique afin de trouver une solution palliative au stress thermique. Ces études ont permis de mettre au point des modèles d'amélioration de l'environnement intérieur de l'habitat, le rendant plus confortable et plus adéquat aux activités des occupants. On peut citer entre autres les modèles ASHRAE (ASHRAE Standard 55, 2017), la norme européenne EN 15 251 (NF EN 15251, 2007), la norme ISO 7730 (ISO Standard 7730, 2006).

Des chercheurs ont également mis en place des modèles de confort thermique applicables à différents types de régions. Les travaux de Fanger ont mis au point une équation mathématique basée sur les échanges thermiques entre l'homme et son environnement et ont permis de prédire le confort thermique (FANGER, 1970). Cette méthode est reprise dans la norme ISO 7730 qui se base sur des bâtiments à air conditionné avec des règles à respecter (ISO Standard 7730, 2006).

Malheureusement, plusieurs études relèvent des limites à la méthode de Fanger lorsqu'elle est appliquée aux bâtiments en évolution libre, car elle surestime l'inconfort thermique pour des conditions variables (HUMPHREYS and NICOL, 2002; KIKI et al., 2020; NGUYEN et al., 2012) . Malgré les mesures de correction prises pour diminuer l'écart constaté notamment le facteur d'attente, l'environnement dans lequel cette méthode analytique dite stable doit être utilisée reste toujours discutable (FANGER and TOFTUM, 2002a; NICOL and HUMPHREYS, 2010). La méthode mise en place par Givoni conduit à une zone de confort thermique déterminée sur la base d'enquêtes utilisant le diagramme de l'air humide. Le diagramme de Givoni est un outil d'aide à la conception, mais ne permet pas de détailler la situation de confort dans un bâtiment. (VISITSAK and HABERL, 2016) font également remarquer que le diagramme ne prend pas en compte les variations de saison et donc les stratégies adaptées dans la conception bioclimatique.

Au Burkina Faso, les constructions modernes non adaptées au contexte climatique nécessitent parfois un conditionnement d'air pour maintenir le confort intérieur, augmentant ainsi le coût de l'électricité et l'exploitation des ressources fossiles. La population du pays majoritairement pauvre est contrainte de vivre dans des logements inconfortables pouvant causer d'énormes problèmes sanitaires. De là vient la question de recherche suivante : **« Quelle stratégie adopter pour une conception bioclimatique et un meilleur confort thermique intérieur des bâtiments ? ».**

L'objectif global de cette thèse est de contribuer à l'amélioration du confort thermique intérieur des bâtiments d'habitation par la mise en place d'un outil d'évaluation du confort thermique adapté à chaque contexte climatique.

Les objectifs spécifiques sont :

- 1- Faire l'état de l'art sur le confort thermique en général
- 2- Définir le confort thermique conduisant ainsi à une caractérisation de l'habitat dans le contexte sahélien

- 3- Étudier en site réel les logements afin de dégager les conditions de confort thermique acceptable.
- 4- Valider l'outil d'évaluation du confort thermique qui a été conçu.

La thèse est organisée en cinq chapitres. Le **premier chapitre** présente l'état de l'art sur le confort thermique avec un tour d'horizon sur les méthodes de prédiction et de définition du confort thermique. Le **deuxième chapitre** présente le climat et l'habitat du Burkina Faso ainsi que les caractéristiques des zones climatiques des trois régions du pays. Le **troisième chapitre** présente le dispositif expérimental, la description des pilotes expérimentaux de 2iE, la description des appareils de mesure ainsi que la méthode de collecte des paramètres climatiques. Le **chapitre quatre** traite des résultats expérimentaux et de conception du modèle d'évaluation du confort thermique. Le **cinquième chapitre** présente les résultats de l'outil d'évaluation et sa validation par les résultats d'enquête.

CHAPITRE I. État de l’art sur le confort thermique

I-1. Introduction

Le confort thermique est la sensation de bien-être ressentie lorsqu'on est exposé à un environnement intérieur ou extérieur. L'interaction entre l'homme et son environnement a donc été mise en évidence et a été longtemps la matière de nombreuses études traitant de ce sujet. La présente étude traite du confort thermique dans le bâtiment et de ses enjeux multiples tels que la climatisation passive, les aspects sanitaires et socio-économiques en passant par l'efficacité énergétique dans le contexte du Burkina Faso. La complexité du confort thermique réside dans le fait qu'il dépend d'aspects psychologiques, physiologiques, physiques et culturels, et donc d'aspects subjectifs.

Les bâtis deviennent de vraies machines thermiques dont l'objectif est de maintenir un climat intérieur agréable pour l'occupant. Dans ce premier chapitre, un état de l'art est donc présenté pour mieux cerner les problèmes relatifs à l'inconfort thermique en rapport avec le bâtiment afin de cibler les rôles des différents paramètres.

I-2. Architecture bioclimatique

L'architecture bioclimatique est une conception architecturale d'un bâti qui vise à tirer profit des conditions d'un site et de son environnement tout en se protégeant des contraintes qu'ils induisent (Climat, relief, géographie et la morphologie du site). C'est une pratique qui vise à rechercher le confort thermique intérieur favorable à travers des solutions dites passives, c'est-à-dire en limitant le recours aux moyens techniques mécanisés et aux énergies extérieures au site tout en privilégiant les énergies renouvelables (Solaire, la géothermie et l'éolien). Le bioclimatisme est un ensemble de stratégies, techniques et systèmes de construction dont l'objectif est de rafraîchir, ventiler ou éclairer l'ambiance intérieure du bâti. Ces stratégies, techniques ou systèmes utilisent un savoir-faire traditionnel simple avec des matériaux disponibles localement, mais également un savoir-faire ou technique importé. Elle est souhaitable dans cette thèse, car dans les années à venir nos pays seront contraints de faire face à un défi majeur qui est celui de l'énergie. La quête de confort thermique contribue aux catastrophes écologiques telles que le réchauffement climatique dû à l'utilisation abusive de l'énergie dans le bâtiment en particulier. Nos économies sont fondées sur la croissance dopée par les énergies au premier rang desquelles les énergies fossiles. Pourtant, les prochaines décennies verront l'épuisement de ces ressources. L'enjeu environnemental actuel est de limiter à 2 °C en moyenne le réchauffement planétaire et de diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 à l'échelle mondiale (MARILLIER, 2007; *Rapport GIEC*, 2021). En

Afrique le bâtiment est l'un des secteurs qui consomment le plus les énergies commerciales telles que les hydrocarbures et l'électricité. Dans le bâtiment, la climatisation est de loin le poste de consommation le plus important (IEA, 2022). C'est donc la climatisation qui sera visée en premier lieu dans nos travaux. De là vient l'importance des études de climatisation passive et de confort thermique.

Un bâtiment bioclimatique ou à architecture bioclimatique est un bâtiment dont l'architecture s'adapte au mieux à son site de construction tout en prenant en compte les interactions entre le climat et l'écosystème. L'adaptation au milieu permet de profiter des bienfaits des phénomènes climatiques (confort thermique intérieure) et aussi de se protéger des aléas climatiques (froid/chaud, vent et pluies). En d'autres termes, l'architecture bioclimatique est un concept fondé sur l'harmonie entre l'homme, son environnement et son climat. Il permet une utilisation optimale des sources d'énergie comme le soleil et le vent pour créer des ambiances thermiques confortables (NEYA, 2020).

La conception de bâtiments passifs vise à limiter les apports de chaleur, ce qui permet de réduire l'utilisation d'équipement de refroidissement. Les concepts bioclimatiques visent en réalité à réduire la consommation d'énergie pour accroître le confort thermique intérieur des bâtiments et permettre une gestion rationnelle des ressources fossiles naturelles (IONA, 1982). Les conditions climatiques telles que la température ambiante, la température radiante, l'humidité et la vitesse du vent sont optimisées pour améliorer l'environnement interne du bâti et le rendre acceptable. Les stratégies passives en climat chaud et sec permettent d'exploiter l'énergie solaire pendant les périodes froides tout en limitant ses flux thermiques pendant la saison chaude, ce qui permet de maintenir une température intérieure confortable. De nos jours, l'architecture bioclimatique s'inspire en grande partie des principes de l'architecture traditionnelle sans pour autant renier la technologie moderne. C'est ainsi que certains matériaux en terre crue sont améliorés pour accroître leur résistance à la compression tout en optimisant leurs caractéristiques hygrothermiques. C'est le cas pour la BTC. Les travaux de thèse de Hema (HEMA, 2020) ont montré que les murs en BTC permettent de réguler de façon optimale les flux de chaleur et l'humidité vers l'intérieur du bâti et peuvent ainsi améliorer le confort thermique intérieur des habitats. L'étude menée dans la thèse de Kaboré (KABORE, 2015) met en évidence une forte amélioration des performances énergétiques des éléments de toiture métallique par l'application d'une couche réfléchissante à pigment blanc. Cette méthode protège le toit contre le rayonnement solaire et permet de réduire l'inconfort thermique de 50 %

du temps d'occupation des bâtiments à ventilation naturelle à toiture sans comble, et de 38 % pour ceux avec comble.

I-3. Le confort thermique

Le confort thermique est défini comme une condition physiologique exprimant une satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Le confort thermique est obtenu lorsque les températures et humidités ambiantes sont maintenues dans des fourchettes de valeurs étroites, et que l'effort de régulation physiologique est minimisé (ASHRAE, 2013). C'est la situation dans laquelle un individu ne ressent ni froid ni chaud. On parle alors de Neutralité thermique. Le concept de confort thermique peut être caractérisé pour un individu donné, par l'état de satisfaction ressenti dans un environnement thermique donné (ASHRAE, 2009). Cette satisfaction est traduite par l'impossibilité pour le sujet de préciser s'il préfère un environnement plus « froid » ou plus « chaud ». Bien sûr, les individus sont différents biologiquement et physiquement, et même si des individus se trouvent soumis aux mêmes environnements, il n'est normalement pas possible de les satisfaire tous. Toutefois, on peut créer un climat optimal dans une pièce, c'est-à-dire des conditions dans lesquelles un pourcentage élevé d'individus sera dans un état de confort thermique (DEVAL, 1984).

I-4. Interaction thermique entre le bâtiment et son milieu

Le confort thermique étant un concept subjectif, chaque personne a son confort propre à elle. Cette section présente les interactions entre l'homme et son bâtiment comme le montre la Figure I-1, affectant l'environnement thermique intérieur et par conséquent les conditions de confort. Il existe plusieurs configurations : soit, le bâtiment influence l'occupant, soit l'occupant agit sur le bâtiment ou soit le bâtiment et l'occupant s'influencent mutuellement (NICOL, 2007).

Le confort thermique intérieur où les performances énergétiques sont directement liées aux caractéristiques opérationnelles du bâtiment et également liées au comportement de l'occupant qui s'adapte à son environnement afin d'augmenter sa plage de confort thermique. L'ajustement adaptatif prend en compte les comportements conscients tels que la modification des vêtements, de la posture, des horaires ou des niveaux d'activité physique, l'alimentation, la ventilation et la température locale.

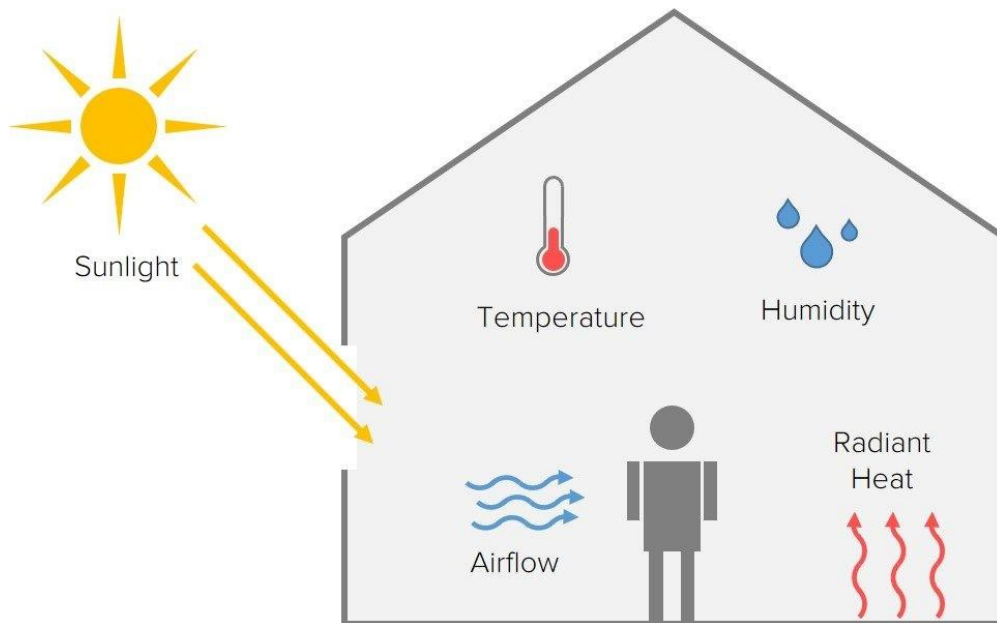


Figure I-1: Interaction entre l'homme et son milieu (TOBY et al., 2017).

I-5. Technique du refroidissement passif

La majeure partie de la population du Burkina dispose de faibles ressources financières qui ne peuvent leur permettre d'avoir des installations de climatisation- ou de ventilation dans leurs habitations. Dans ces conditions, le confort thermique ne peut être obtenu que par une bonne conception du bâtiment, respectant les normes de la climatisation passive. Améliorer la conception d'un bâtiment passe en premier lieu par le choix de matériaux appropriés et ensuite par l'utilisation judicieuse de solutions passives.

La difficulté principale est de pouvoir rééquilibrer les facteurs influençant le confort thermique et visuel, à savoir le rayonnement solaire, la ventilation, l'inertie thermique des murs, l'utilisation de l'éclairage naturel (NDOUTOUM et al., 2015). Dans les lignes suivantes, plusieurs stratégies proposées permettent de minimiser l'inconfort thermique. Quelques-unes de ces stratégies sont, l'isolation thermique, les casquettes, les parois à forte inertie, les toitures réfléchissantes, les doubles vitrages.

I-5.1. Protection au rayonnement

Le rayonnement solaire est composé d'ondes électromagnétiques. Ce rayonnement arrivant sur le bâtiment ou tout autre corps peut être absorbé, réfléchi ou transmis. Un bâtiment placé au soleil aura tendance à s'échauffer sous l'effet de ce rayonnement.

On peut distinguer deux grandes familles de phénomènes radiatifs dans les bâtiments : l'absorption du rayonnement solaire incident et de courtes longueurs d'onde par le bâtiment, et l'émission du rayonnement de fortes longueurs d'onde par le bâtiment lui-même. Le rayonnement solaire est composé d'un spectre visible, du rayonnement infrarouge proche et de l'ultraviolet. Une illustration du spectre solaire est représentée par la figure I-2.

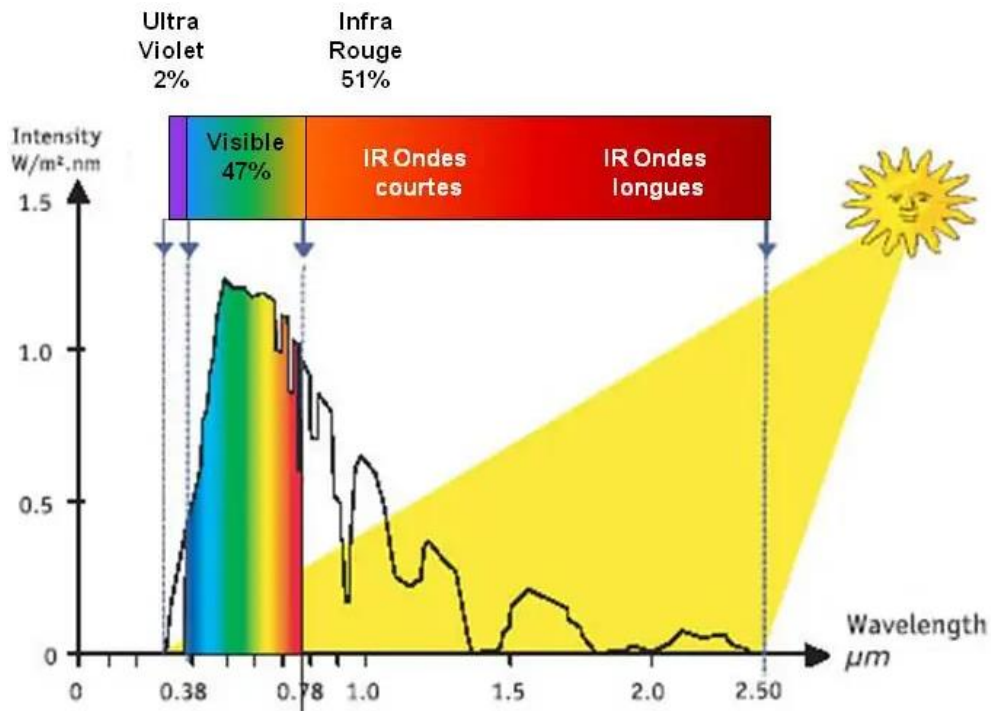


Figure I-2 : Les rayonnements solaires (Bernard, 2020)

Le rayonnement solaire a un impact négatif sur le confort thermique dans les pays tropicaux. Les protections solaires permettent de minimiser le réchauffement intérieur des bâtiments dû à l'effet néfaste du rayonnement solaire réchauffant les murs ou pénétrant le bâtiment à travers les ouvertures. Plusieurs techniques existent comme les débords (toiture ou auvent), les stores, les masques, les casquettes (DAEMEI et al., 2019) pour protéger le bâtiment contre le rayonnement solaire.

I-5.2. Inertie thermique

L'inertie thermique est fonction des propriétés thermiques telles que la densité du mur, le volume et la chaleur spécifique. Le facteur d'amortissement et le déphasage sont les deux paramètres permettant de mesurer l'effet de l'inertie thermique. Le facteur d'amortissement ou l'écèlement donne la capacité du matériau à amortir les flux de chaleurs. Le déphasage est le

temps que met l'onde thermique à traverser les deux faces de la paroi du matériau. L'une des qualités d'une bonne inertie thermique est la capacité des matériaux à absorber les gains thermiques dus à la température extérieure et aux flux solaires. L'idéal est que les pics de températures journalières n'influencent l'intérieur des bâtiments que lors de l'occurrence des températures minimales extérieures (NEYA, 2020). Brambilla et al ont étudié deux types de bâtiments (inertie faible et forte inertie thermique) et ont montré que dans un bâtiment à forte inertie, la température interne reste stable avec une diminution de 3 °C de la température comparativement au bâtiment à faible inertie (BRAMBILLA and JUSSELME, 2017). La Figure I-3 montre que l'effet de l'inertie thermique se traduit par une réduction du flux thermique à travers un mur et est mesurable par les valeurs de l'amortissement et du déphasage.

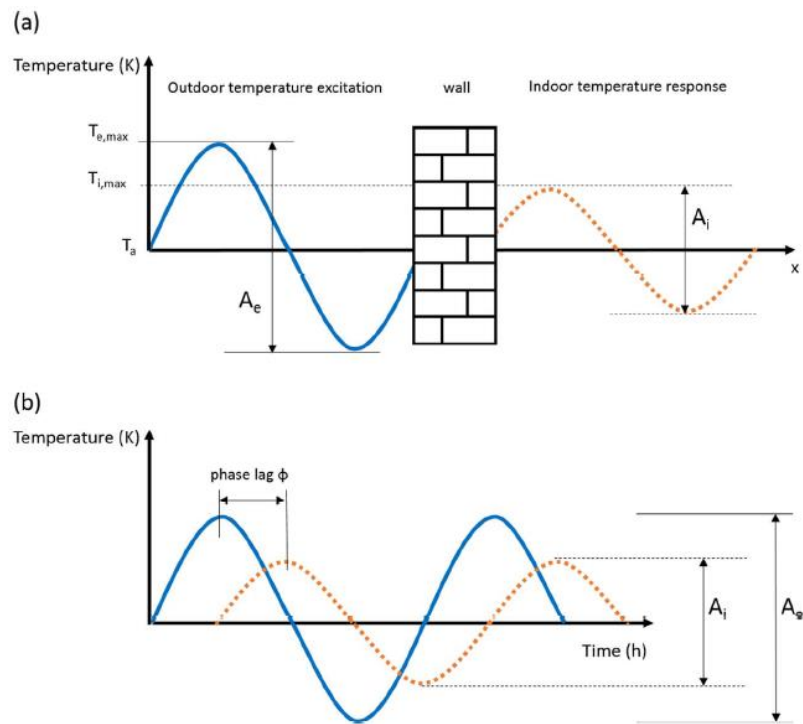


Figure I-3: Réponse thermique de la propagation d'onde au travers un mur. (a) Amortissement de l'onde thermique extérieure à travers la paroi, (b) Déphasage thermique dû à l'inertie du mur. (HOUOT, 2018) (VERBEKE and AUDENAERT, 2018).

I-6. Matériaux localement disponibles

Au Burkina Faso, différents matériaux de construction sont utilisés. L'architecture dépend de la situation géographique, des moyens financiers, des préférences personnelles, du savoir-faire local et des valeurs culturelles (KERE, 1995). Selon l'institut national de la statistique et la démographie (INSD) du Burkina, pour l'année 2009, au niveau national, la terre crue représente

le matériau de construction le plus usité (79 %) pour la construction des murs des logements, suivi de de construction en matériaux classiques (17 %), de la paille (2,5 %) et de la pierre (1,2 %) (Annuaire statistique, 2017). Le matériau paille ou chaume est très utilisé comme isolant et pour la toiture des cases du fait de sa simplicité de confection et de mise en œuvre. La paille qui le compose est coupée puis tressée pour en faire un matériau de construction. La terre crue ou banco (les deux termes utilisés pour désigner la terre utilisée) très répandue, et nécessitant peu de transformation pour la confection des adobes est disponible en grande quantité et est utilisée pour la construction des habitations en zone rurale. Une étude menée par (WYSS, 2005b) permet de dresser la carte présentée par la Figure I-4 qui répertorie les pôles d'utilisations des matériaux latéritiques tels que la BTC (brique de terre comprimés) et le BLT (bloc de latérite taillé). Les matériaux tels que les parpaings de ciment sont moins répandus au niveau rural en particulier. La carte montre qu'excepté la partie Nord désertique et l'extrême Est du pays, les latérites sont répandues dans tout le reste du pays. Son utilisation comme matériaux de construction est bien connue dans les zones rurales et urbaines. La disponibilité des matériaux naturels répartis sur le territoire burkinabè est synthétisée sur la Figure I-4.

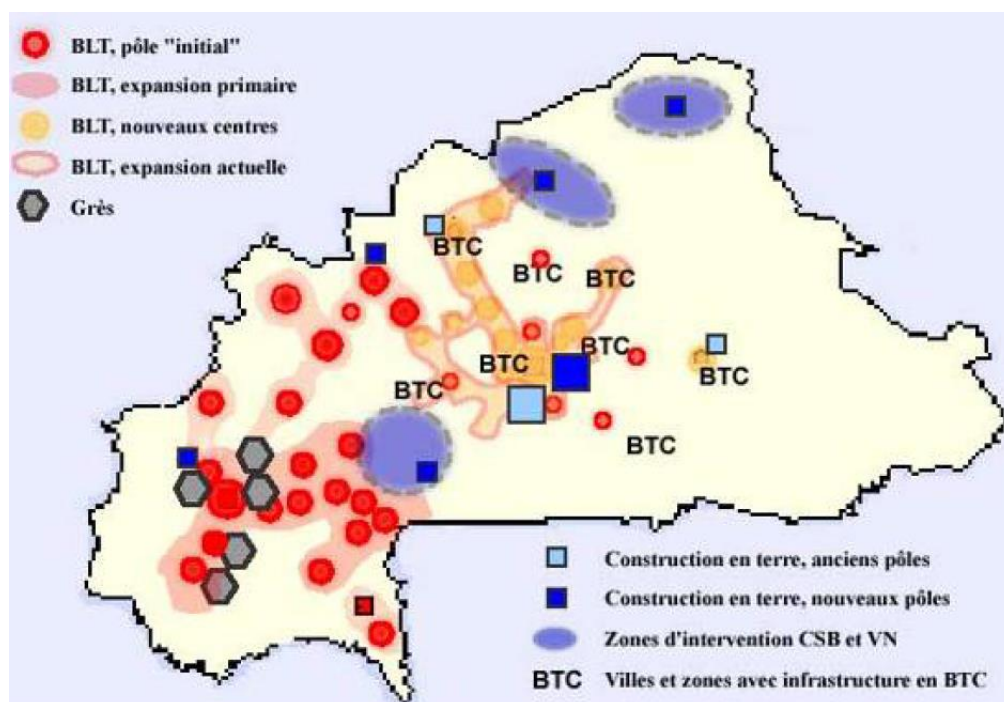


Figure I-4: Zone d'utilisation des matériaux latéritiques, observation sur le terrain (WYSS, 2005b).

I-7. Indices et définition du confort thermique

I-7.1. Indices de confort

Depuis longtemps plusieurs standards nationaux sont développés dans le but d'évaluer le confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment par des indices dits de confort. On peut citer entre autres le modèle (ASHRAE Standard 55, 2013), la norme (ISO Standard 7730, 2006), la norme (NF EN 15251, 2007). Ces études ont permis de mettre en avant une multitude d'indices et de méthodes permettant l'évaluation du confort. Ces indices et méthodes ont souvent été établis dans un contexte précis, avec des moyens de mesures particulières et une méthodologie bien définie. Une mauvaise estimation de la perception du confort peut donc avoir des effets négatifs sur la conception d'un bâtiment. La définition d'une plage de confort à partir des températures et humidités est donc une des premières étapes dans la conception d'un bâtiment, et fait souvent partie des standards nationaux qui définissent la référence en termes de confort thermique. Dans sa revue, (CARLUCCI and PAGLIANO, 2012) présentent un certain nombre de paramètres définis par les termes d'indice d'inconfort, indice de stress ou indice de chaleur, pour décrire la perception thermique humaine à laquelle un individu ou un groupe d'individu est exposé. La plupart de ces indices synthétisent les performances thermiques d'un bâtiment en une seule valeur. En Afrique de l'Ouest, Kiki et al. (KIKI et al., 2020) proposent les deux modèles adaptatifs de (LOPEZ-PEREZ et al., 2019) et de (INDRAGANTI et al., 2014) pour l'évaluation du confort intérieur des bâtiments au Bénin et obtiennent des résultats probants. (RINCON et al., 2019a) dans sa recherche d'évaluation du confort, propose un système alternatif de construction en terre à faible coût avec la technique de « Earthbag » et la construction classique en terre, et utilise deux indicateurs de confort annuels, à savoir les « heures annuelles d'inconfort » correspondant à la zone de confort à 80 % de satisfaction et les « degrés-jours d'inconfort ». Ce dernier indicateur d'inconfort est appliqué en tant que méthode complémentaire pour évaluer le degré d'inconfort pour chaque heure de l'année simulée. Il permet également de donner des informations sur le degré d'inconfort atteint au cours d'une heure donnée. Dans la littérature, la problématique du confort thermique a longtemps été étudiée pour définir un environnement apprécié par les individus. Plusieurs auteurs ont défini et utilisé divers indices de confort thermique. On dénombre plus de 160 indices de confort thermique définis pour l'évaluation du confort (DE FREITAS and GRIGORIEVA, 2015). Les indices de confort peuvent être classés en deux grandes catégories : suivant une approche dénommée approche rationnelle (aussi qualifiée d'approche analytique ou de déterministe)

basée sur le bilan thermique du corps humain et une autre dite approche adaptative (également appelée approche empirique) basée sur des enquêtes in situ et prenant en compte l'acclimatation (AULICIEMS et al., 1997; DJONGYANG et al., 2010). Chacune de ces approches est décrite et explicitée dans les paragraphes suivants.

I-7.2. Approche analytique du confort thermique

I-7.2.1. La méthode de Fanger

Le confort thermique par approche analytique est décrit et gouverné par l'équation algébrique du bilan thermique du corps humain. Cette équation indique que pour une personne isolée dans un environnement donné, le bilan des échanges de chaleur conduit à un gain ou une perte calorifique. Durant plusieurs décennies ce modèle de prédiction a été la référence pour évaluer le confort thermique pour les espaces climatisés. Pour que l'homme soit dans un état de confort thermique, il faut que le bilan thermique des échanges dans l'organisme soit nul. C'est l'assertion qui a permis à P. O. FANGER de définir son célèbre indice de confort complexe, le PMV (équation Eq. I-1) qui peut être traduit par vote moyen prédictible. À cet indice est associé le PPD (équation Eq. I-2) quantifiant le pourcentage de personnes insatisfaites de l'ambiance thermique mesurée et donnée par le PMV par exemple. Le modèle PMV-PPD est établi sur la base d'un équilibre thermique entre l'homme et son environnement considéré dans des conditions stationnaires (FANGER 1970). Le modèle conduit à la relation suivante :

$$PMV = [0,303 \times \exp(-0,036 \times M) + 0.028] \times L$$

$$L = \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58.15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \\ \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad \text{Eq. I-1}$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Eq. I-2}$$

Le PMV peut être le résultat d'une enquête qui conduit nécessairement à l'utilisation de l'échelle à 7 points d'ASHRAE. Il peut aussi être le résultat d'un calcul théorique à partir de la norme (ISO Standard 7730, 2006). Il conduit à une forme analytique qui découle du bilan thermique du modèle à deux nœuds utilisant les six paramètres que sont : la température

ambiante t_a , la température moyenne radiante t_r , l'humidité relative HR , la vitesse de l'air V_a , le métabolisme de l'individu symbolisé par Met et la résistance thermique de l'habillement symbolisée par le Clo . Le modèle PMV prédit une bonne sensation thermique des bâtiments climatisés, mais malheureusement des études de terrain effectuées sur des bâtiments à ventilations naturelles ont montré qu'il prédit une sensation thermique plus chaude que celle ressentie par les occupants (DE DEAR, 1998). C'est ainsi que (FANGER and TOFTUM, 2002b) propose un facteur correctif appelé facteur d'espérance ou attente pour réduire voire supprimer cette différence entre les deux indices de PMV mesurés et réels. Le choix du facteur est fait suivant la zone d'étude, mais malgré des mesures de corrections prises pour diminuer l'écart constaté, cette méthode du PMV dite stable reste toujours discutable (FANGER and TOFTUM, 2002a; KIKI et al., 2020; NICOL and HUMPHREYS, 2010).

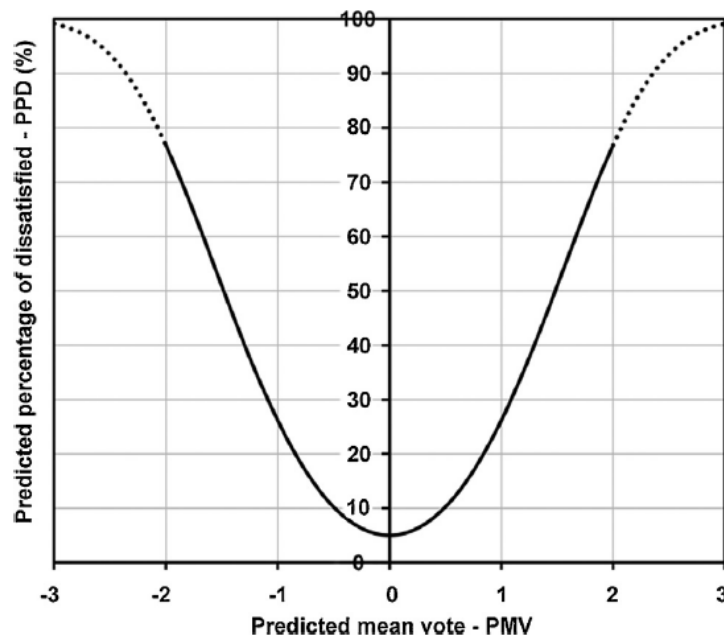


Figure I-5: Représentation du PPD en fonction du PMV

La figure I-5 donne une représentation du niveau d'insatisfaction en fonction du PMV. Le PMV de 0 correspond à l'état de sensation du confort thermique. Les votes in situ montrent que même dans cet état près de 5% des personnes interrogées se diront dans l'inconfort. Ce résultat montre le degré de subjectivité de la notion de confort thermique.

I-7.2.2. Modèle de GIVONI

Le diagramme bioclimatique du bâtiment développé par Givoni (Building Bioclimatique Chart ou BBC) est une approche couramment utilisée par le monde professionnel pour caractériser une ambiance. Le diagramme de Givoni est la définition d'une zone de confort élaborée sur le diagramme psychrométrique et publié en 1969 (GIVONI, 1992). Il est présenté par la figure I-7. Les limites de la zone de confort et les différentes stratégies de conception pour assurer le confort intérieur, délimitées sur les diagrammes BBC sont basées sur les températures intérieures attendues dans les bâtiments sans climatisation artificielle (GIVONI, 1998). Différentes limites sont indiquées pour le climat tempéré et pour le climat chaud. Les limites du confort aux humidités basses et moyennes sont indépendantes du niveau d'humidité absolue, car dans cette plage d'humidité, le confort des personnes sédentaires avec des vêtements ordinaires n'est pas affecté par l'humidité. Aux humidités plus élevées, les effets de la température et de l'humidité sont interdépendants et la limite du confort est donnée par une température supérieure qui diminue quand l'humidité augmente (GIVONI, 1998).

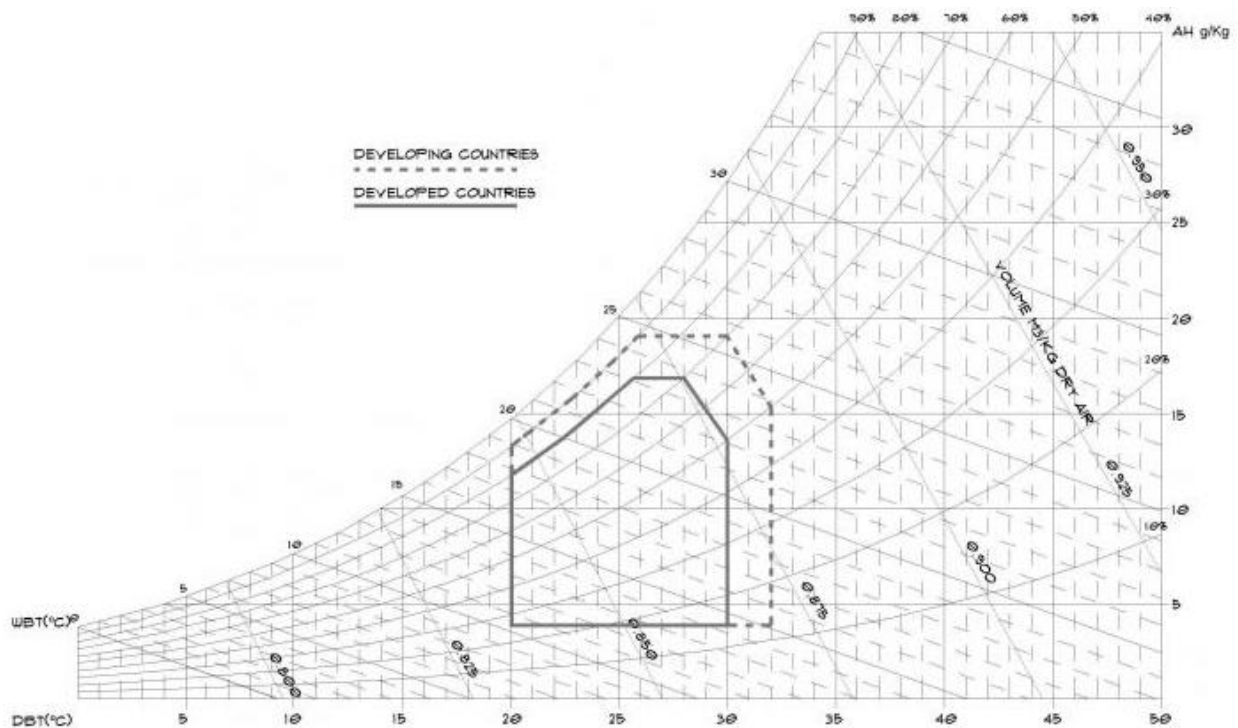


Figure I-6: Zone de confort thermique développée par (GIVONI, 1992)

I-7.3. Approche empirique du confort thermique

Le modèle adaptatif est une théorie complémentaire de perception selon laquelle les facteurs comme la physiologie jouent un rôle important dans la constitution des attentes et préférences thermiques des individus. La sensation thermique, la satisfaction et l'acceptabilité des ambiances sont toutes influencées par des facteurs tels que : la culture, le taux de fluctuation thermique, le milieu climatique ainsi que d'autres caractéristiques plus ou moins définies (NICOL and HUMPHREYS, 2002) ; (DE DEAR and BRAGER, 2002). L'hypothèse de base de l'approche adaptative est exprimée par le principe adaptatif qui stipule que s'il se produit un changement de nature à produire un inconfort, les occupants réagissent de manière à tendre vers le rétablissement de leur confort (NICOL and HUMPHREYS, 2020). L'ajustement adaptatif prend en compte des comportements conscients tels que la modification des vêtements, de la posture, des horaires ou des niveaux d'activité, de la vitesse au travail, de l'alimentation, de la ventilation, de la température du local. C'est ainsi que l'individu peut également s'adapter inconsciemment aux saisons et aux régions. On définit ainsi une température de neutralité thermique T_n qui intervient dans ce modèle, comme la température du minimum de stress thermique de l'individu. Suivant la température extérieure, l'individu s'adapte et sa température de confort est modifiée. Les conditions de confort thermique sont donc variables dans le temps et dans l'espace. Cette vision du confort thermique fait que la zone de confort en période chaude est différente de celle de la période froide. Le processus d'adaptation repose principalement sur les conditions météorologiques extérieures et d'exposition à ces conditions. C'est la principale contribution des modèles adaptatifs, qui prédisent des températures de confort probables T_n ou des plages de température par rapport aux températures extérieures mensuelles moyennes T_m . Des enquêtes importantes sur le terrain ont été menées (DE DEAR and BRAGER, 2002; MCCARTNEY, J.NICOL, 2002; NICOL and HUMPHREYS, 2020) permettant de conclure que la relation entre la température de neutralité T_n à l'intérieur d'un bâtiment ventilé naturellement et la température extérieure peut être prédite par une équation linéaire de la forme :

$$T_n = a + b \cdot T_m \quad \text{Eq. I-3}$$

Plusieurs chercheurs ont mené des enquêtes sur des populations données à travers le monde, ce qui a permis d'élaborer une droite de régression linéaire en fonction de la température moyenne mensuelle extérieure et de la neutralité thermique pour des bâtiments en évolution libre, des bâtiments climatisés ainsi que des bâtiments mixtes (ATTIA and CARLUCCI, 2015). Le

Tableau I-1 présente quelques-uns des couples de valeurs constantes a et b de l'équation I-3. (DE DEAR and BRAGER, 2002) ont effectué des analyses statistiques sur la base de données ASHRAE RP-884 qui s'est effectuée sur 160 bâtiments avec environ 21 000 observations pour développer un modèle linéaire, exprimant la température de confort en fonction de la température extérieure moyenne. Ce modèle a été ensuite intégré dans le standard ASHRAE 55-2004 puis amélioré dans les éditions suivantes. La simplicité d'utilisation est le principal point fort de ces modèles. Nicole et Humphrey ont fait également les mêmes études en se référant à la base de données d'ASHRAE et constatent que les occupants des bâtiments conditionnés et ceux des bâtiments en évolutions libres ont des attentes différentes de leurs confort intérieurs (Figure I-7). En réalité les occupants des bâtiments en évolutions libres s'adaptent mieux à leur environnement intérieur et ont donc une plage de confort plus large. Ces auteurs mettent alors en place une corrélation pour permettre aux utilisateurs de prédire la température du confort intérieure en fonction de la température extérieure (NICOL and HUMPHREYS, 2020). La Figure I-7 présente les résultats de l'étude de Nicol et Humphreys montrant les droites de régressions en fonction des différents types de bâtiment.

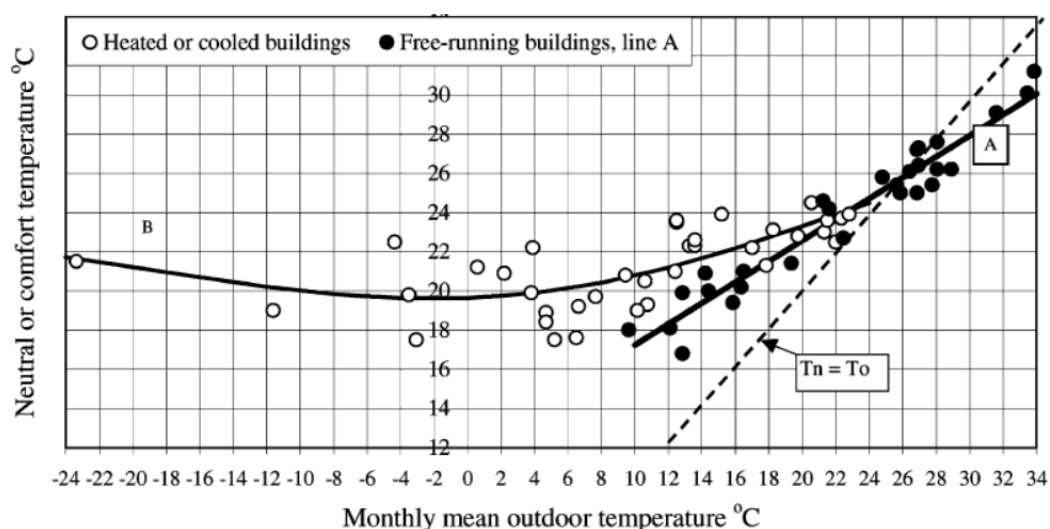


Figure I-7: Corrélation entre la température de neutralité et la température moyenne extérieure pour les bâtiments conditionnés et les bâtiments en évolutions libres (NICOL and HUMPHREYS, 2020).

Tableau I-1: Constantes proposées pour la formule de régression linéaire de l'Eq. I-3

Formulation de T_n	b	a
HUMPHREYS (1976) (sans CVC)	11,9	0,534
HUMPHREYS (1976) avec CVC)	2,56	0,83
AULICIEMS (1981)	17,6	0,31
DE DEAR et al. (1997)	17,8	0,31
GRIFFITHS (1990)	12,1	0,534
NICOL and ROOF (1996)	17	0,38
DE DEAR, BRAGER et COOPER (1997) (sans CVC)	18,9	0,255
DE DEAR, BRAGER et COOPER (1997) (avec CVC)	20,9	0,16
DE DEAR et BRAGER (2002)	17,8	0,31
NICOL et HUMPHREYS (2002)	13,5	0,54
DE DEAR, BRAGER (1998)	18,9	0,255

I-8. Conclusion

Les réalisations de bâtiments bioclimatiques suscitent toujours un intérêt particulier dans le domaine de l'habitat écologique. Mais la complexité des phénomènes impliqués nécessite une étude de combinaisons des paramètres influençant le confort dans le bâtiment. Tout porte à croire que les normes occidentales existantes suffisent à évaluer ou prédire le confort, mais cela ne semble pas toujours adapté aux réalités de l'Afrique subsaharienne. Dans nos pays tropicaux en développement comme le Burkina Faso, il apparaît essentiel de proposer une approche d'évaluation ou d'aide à la décision en matière de conception de logements simples et abordables qui s'adaptent au climat et au contexte socio-économique. C'est l'objectif de cette étude. L'approche adaptative à travers des enquêtes in situ permet de définir le confort thermique en prenant en compte les comportements conscients et inconscients de l'occupant en quête de confort thermique. Elle permet donc de définir une zone de confort thermique en fonction de chaque contexte climatique. Cette étude vise donc à mener une réflexion sur la mise en place d'une zone de confort thermique par la méthode adaptative liée aux bâtiments d'habitation en évolution libre dans le contexte du climat sahélien.

CHAPITRE II. Climat et Habitats au Burkina Faso

II-1. Introduction

Le Burkina Faso a une population de 20 487 980 habitants soit en moyenne 5,2 habitants par ménage (INSD_RGPH, 2019). Il compte 351 communes, dont 302 rurales et 49 urbaines. Les deux principales villes sont Ouagadougou, la capitale politique qui regroupe plus de 1 500 000 d'habitants et Bobo Dioulasso, la capitale économique avec environ 600.000 habitants. Les autres villes moyennes sont : Dori, Ouahigouya, Koudougou, Banfora, Fada N'gourma et Orodara (HABITAT WORLDMAP, 2019). Cette forte croissance démographique engendre un besoin en logement, mais la capacité économique et les infrastructures susceptibles de soutenir cette dynamique de logement restent cependant faibles. Les matériaux conventionnels modernes de construction se révèlent non seulement onéreux, mais surtout inadaptés au climat chaud et sec des régions. En effet, l'habitat est une forme d'occupation de l'espace dont l'homme a besoin pour se loger afin de se protéger des nuisances extérieures telles que le climat et les prédateurs. Par conséquent, une multiplication d'habitats spontanés et inconfortables dans les zones dites précaires est favorisée et cause d'énormes problèmes sanitaires et de développement. Ce type d'habitat est souvent peu confortable aussi bien sur le plan fonctionnel que thermique et nécessite une réflexion appropriée pour un minimum de confort.

II-2. Climat du Burkina Faso

Situé au cœur de l'Afrique occidentale, le Burkina Faso couvre un territoire de 274 000 km². Sans accès à la mer, il est entouré par le Mali au Nord et à l'Ouest ; la Côte d'Ivoire au Sud-ouest ; le Bénin, le Togo et le Ghana au Sud-Est avec le Niger à l'Est.



Figure II-1: Situation géographique du Burkina Faso (INSD, 2012)

Le Burkina Faso est le siège de trois zones climatiques selon le système de classification climatique Koppen-Geiger comme présenté par la Figure II-2 (KOTTEK et al., 2006; PEEL et al., 2007).

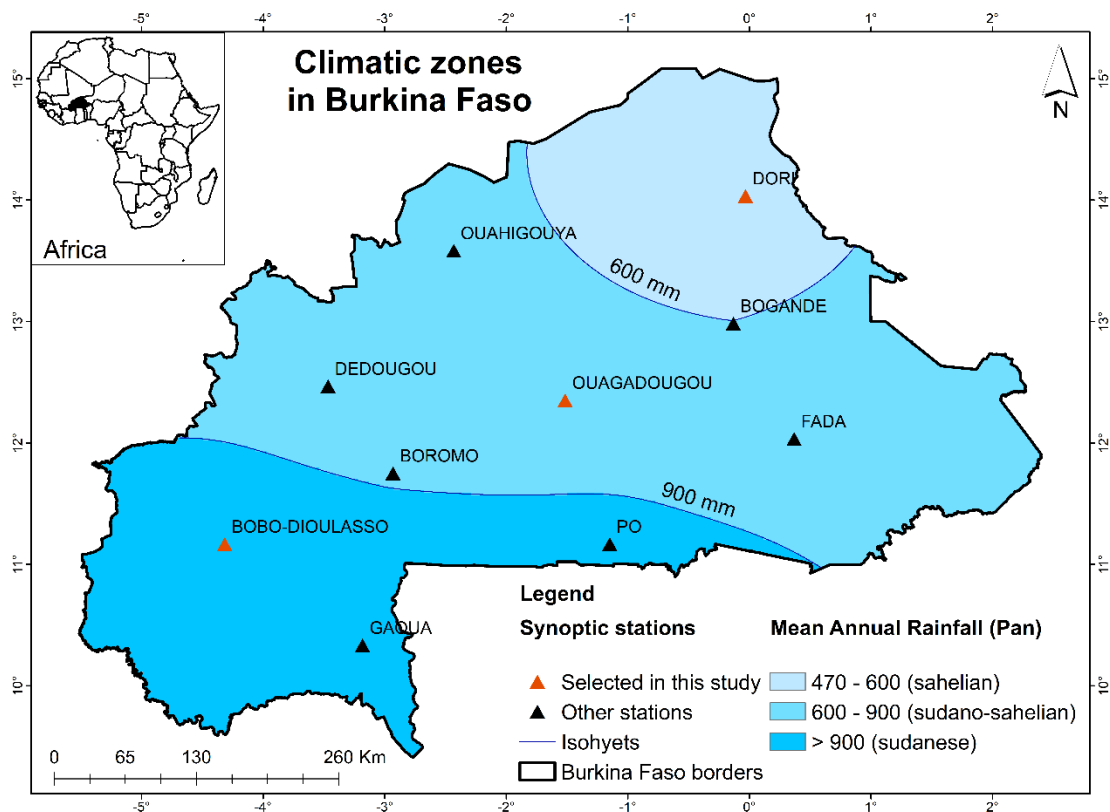


Figure II-2: Zones climatiques du Burkina Faso. Données obtenues auprès de l'Agence nationale de météorologie (ANAM-BF) du Burkina Faso.

Au Nord du pays, le climat est de type désertique chaud. Cette zone qui couvre une petite partie du territoire représente la zone de climat sahélien. Elle est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 600 mm. La saison des pluies est courte et dure 4 mois au plus. Une grande variabilité interannuelle et spatiotemporelle des pluies est constatée avec de fortes amplitudes thermiques diurnes et annuelles. Le centre du pays est marqué par un climat de type semi-aride chaud, encore appelé zone soudano-sahélienne, cette partie est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 600 et 900 mm. La saison des pluies dure 5 mois environ. Les amplitudes diurnes et annuelles sont moins importantes que dans la partie nord. La partie Sud du pays est couverte par un climat de type tropical humide et sec encore appelé zone à climat soudanien, elle est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 900 mm. La saison des pluies dure entre 6 à 7 mois.

II-2.1. Données météorologiques

L'Agence Nationale de la Météorologie a fourni les données météorologiques des trois villes du pays suivant les trois zones climatiques et selon la classification climatique de Koppen-Geiger à savoir : Dori, Ouagadougou et Bobo Dioulasso. Ces données concernent principalement la température, l'humidité relative et la vitesse du vent des années 2007 à 2017, soit sur une période de 11 ans. L'irradiation est également donnée. Une fiche de température annuelle élaborée à partir de ces données météorologiques permet de fournir un ensemble de graphiques pour mieux définir le climat de l'ensemble du pays. La Figure II-3 présente les températures des villes de Dori située au Nord du pays, de Ouagadougou au centre, et de Bobo Dioulasso au sud. Ces trois villes symbolisent les trois zones représentatives des zones climatiques du pays.

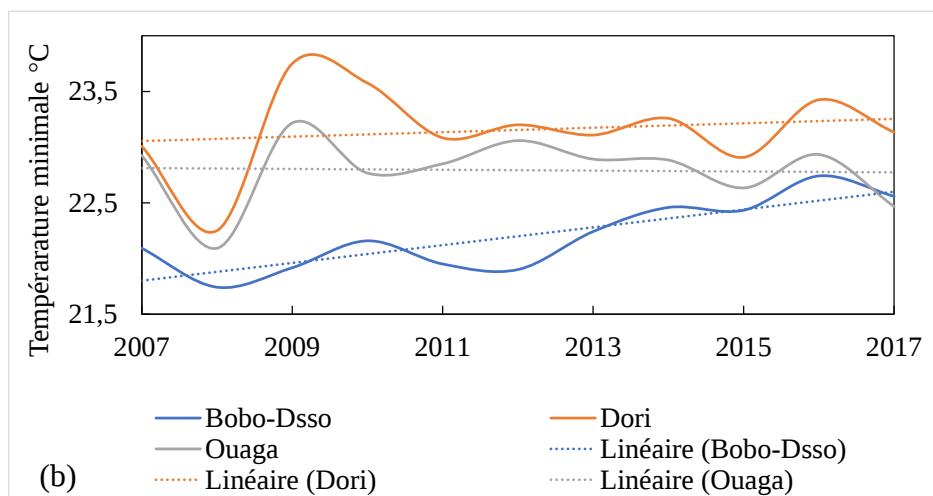
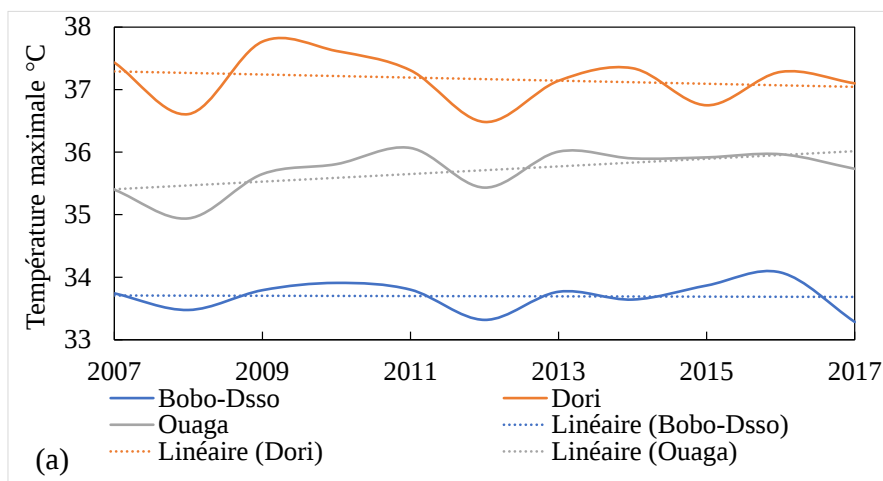


Figure II-3: Températures pluriannuelles maximales (a), minimales (b) dans les trois villes représentatives des zones climatique du Burkina Faso

À Dori, les températures maximales moyennes varient entre 37,8 °C à 36,5 °C avec un écart moyen de 1,3 °C. Les températures minimales moyennes varient de 23,8 °C à 22,3 °C avec un écart moyen de 1,5 °C. À Ouagadougou, les températures les plus élevées varient de 36,1 °C à 34,9 °C avec un écart moyen de 1,2 °C et les températures minimales de 23,2 °C à 22,1 °C avec un écart moyen de 1,1 °C. La ville de Bobo Dioulasso présente des températures plus faibles dont les maximas varient entre 34,1 °C à 33,3 °C avec un écart moyen de 0,8 °C et les minimas de 22,7 °C à 21,7 °C avec écart moyen de 1 °C. Toute ces valeurs sont regroupées dans le tableau II-2.

Tableau II-1: Récapitulatif des températures moyennes maximales et moyennes minimales.

	Dori	Ouagadougou	Bobo Dioulasso
Les températures moyennes maximales (°C)	37,8 à 36,5	36,1 à 34,9	34,1 à 33,3
Écart (°C)	1,3	1,2	0,8
Les températures moyennes minimales (°C)	23,8 à 22,3	23,2 à 22,1	22,7 à 21,7
Écart (°C)	1,5	1,1	1

La Figure II-4 présente les écarts de températures diurnes de l'année type des trois villes.

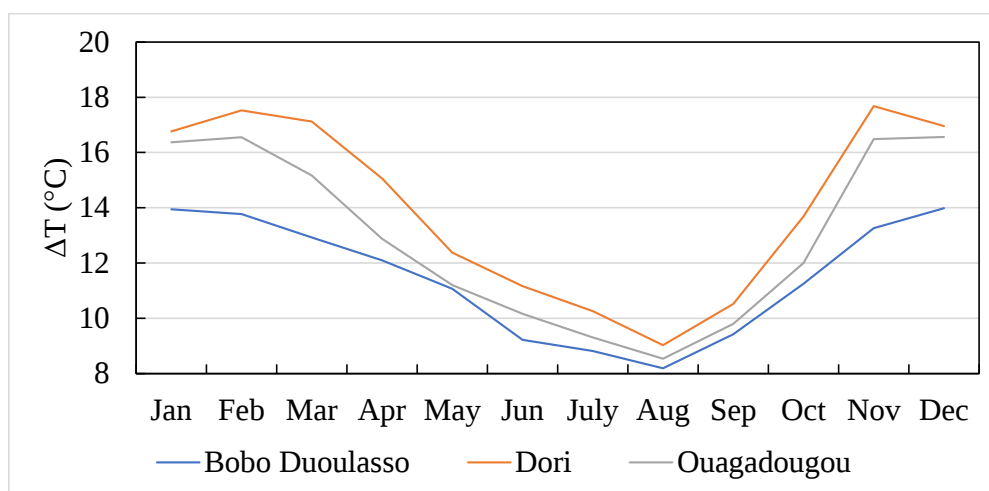


Figure II-4: L'amplitude thermique des zones climatiques de Dori, Ouagadougou et Bobo Dioulasso

Les valeurs d'amplitude thermique ou écart diurne les plus élevées s'observent en début et en fin d'année correspondant aux mois de Janvier, Février, Mars et au mois d'Octobre, Novembre et Décembre. Autrement dit, les variations ou fluctuations thermiques sont maximales durant le premier trimestre et le dernier trimestre de l'année, mais elles restent les périodes les plus froides et sèches. L'amplitude thermique reste faible dans la période intermédiaire qui présente de forte chaleur et humidité.

II-2.2. Climat de la région de Dori

Dans cette région du pays, les températures enregistrées sont les plus élevées. La Figure II-5 (a) donne les températures maximales et minimales ainsi que la moyenne de température de l'année type de cette zone. On remarque sur la Figure II-5 (b) que la bande des amplitudes ou écart diurne est élargie aux extrémités (Janvier et décembre) et légèrement rétrécie en son milieu (Juin, Juillet, Août). Le mois d'Avril enregistre la température maximale mensuelle la plus élevée qui est de 41,7 °C et pouvant atteindre ponctuellement 45 °C. Le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température minimale mensuelle de 15,5 °C. L'amplitude thermique varie de 9 à 17,7 °C. En considérant les valeurs moyennes, le mois de Mai est le mois le plus chaud de l'année avec 35,5 °C de température. Le mois le plus froid est celui de Janvier avec une température moyenne de 23,9 °C.

La Figure II-6 présente les fréquences des paramètres climatiques de Dori. La Figure II-6 (a) permet de voir que les températures journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 27 à 34 °C, avec une fréquence de plus de 62 %. Les humidités relatives journalières les plus fréquentes (Figure II-6 b) sont dans l'intervalle 10 à 30 %, avec une fréquence de plus de 45 %. La Figure II-6 (c) montre que les vitesses de vent journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 0,5 à 1,25 m/s, avec une fréquence de plus de 65 %.

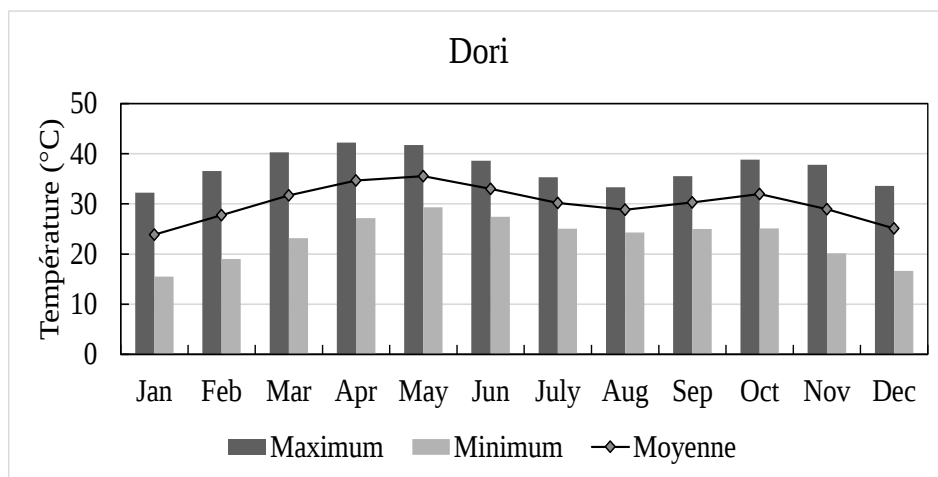


Figure II-5: Histogramme des températures annuelles de la région de Dori

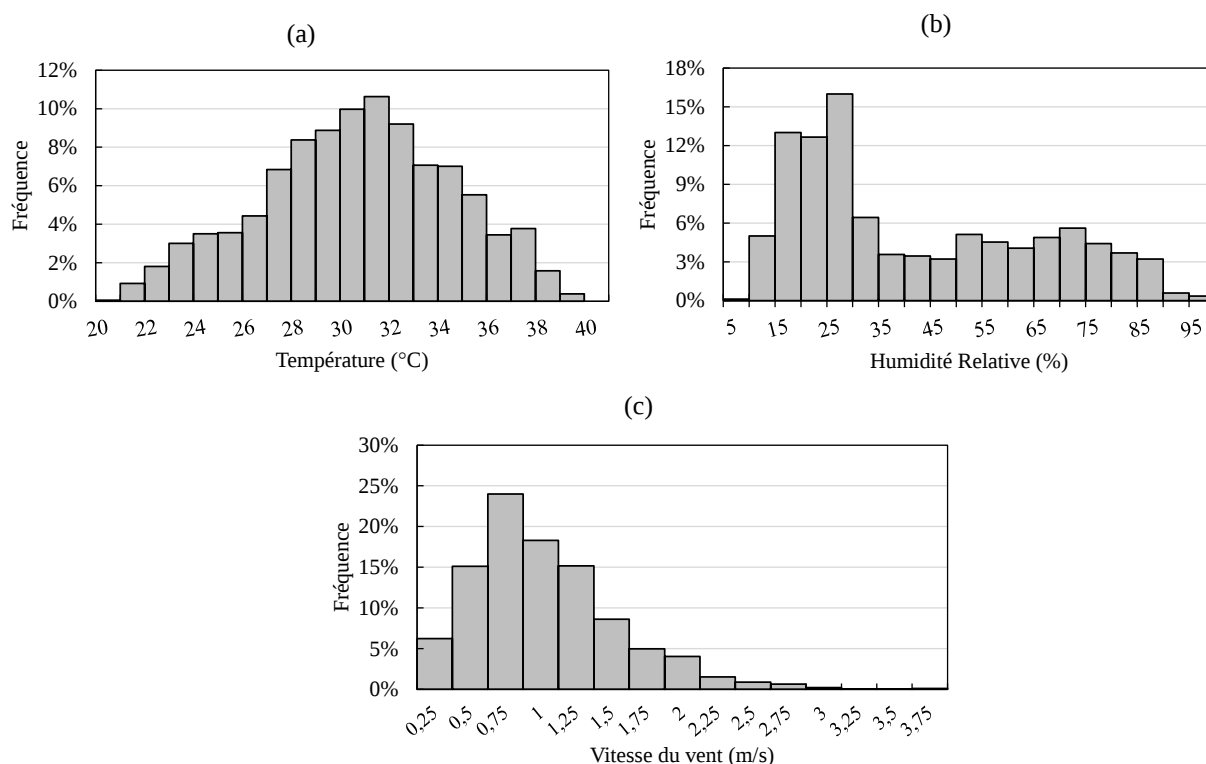


Figure II-6: Fréquences journalières de : (a) Températures, (b) Humidité relative (c) Vitesse du vent de la région de Dori

II-2.3. Climat de la région de Ouagadougou

Dans cette zone, les données climatiques sont plus clémentes par rapport à celles de la région de Dori. La Figure II-7 (a) montre que le mois d'Avril est le mois le plus chaud avec des valeurs de températures mensuelles maximales atteignant 40,2 °C. Le mois de Janvier est le mois le plus froid avec une température minimale mensuelle de 16,7 °C. Avril reste le mois le plus

chaud avec une température moyenne diurne de 33,7 °C et Janvier le mois le plus froid avec une température moyenne diurne de 24,9 °C. La Figure II-7 (b) présente une bande des écarts diurnes moins élargie que celle de la ville de Dori. Le constat montre que l'amplitude de température maximale de Ouagadougou est faible par rapport à celle de Dori. On peut noter respectivement 16,6 °C pour les mois de Décembre contre 17,7 °C pour le mois de Novembre pour les périodes froides de l'année. L'amplitude minimale est de 8,5 °C à Ouagadougou contre 9 °C à Dori.

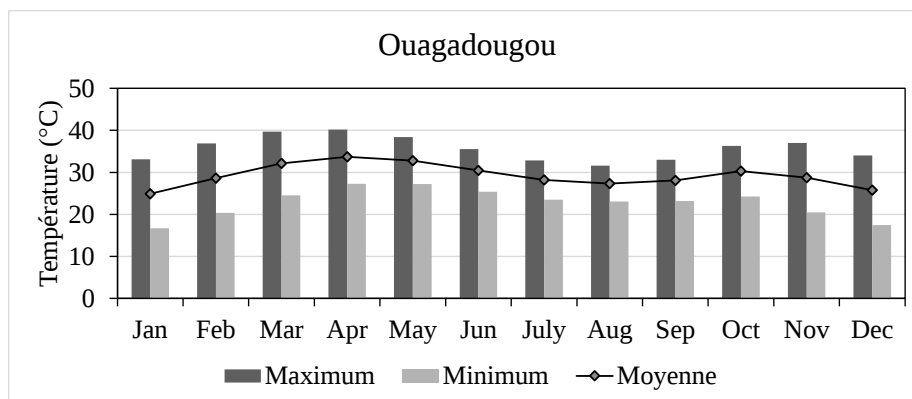


Figure II-7: Températures annuelles de la région de Ouagadougou

La Figure II-8 donne les fréquences des paramètres climatiques de Ouagadougou. La Figure II-8 (a) montre que les températures journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle de 26 à 31 °C, avec une fréquence de plus de 60 %. La Figure II-8 (b) permet de dire que les humidités relatives journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 25 à 45 % et dans l'intervalle 80 à 90 %, avec une fréquence de plus de 54 %. La Figure II-8 (c) permet de voir que les vitesses de vent journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 2 à 3,25 m/s, avec une fréquence de plus de 58 %. Enfin la Figure II-8 (d) montre que les radiations globales journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 4,5 à 6 kWh/m², avec une fréquence de plus de 68 %.

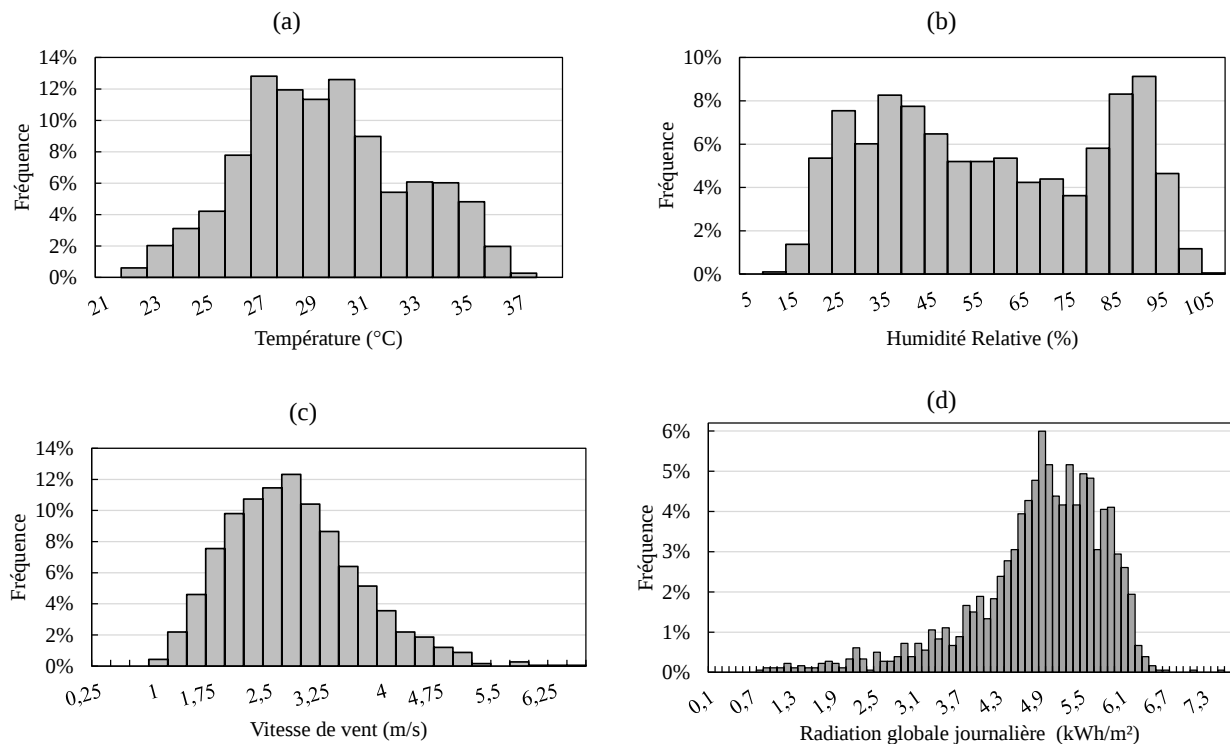
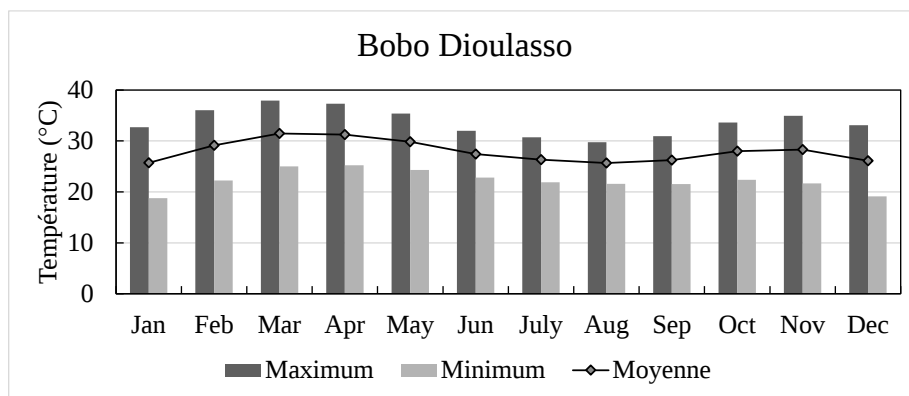


Figure II-8: Fréquences journalières des Températures (a), Humidité relative (b), Vitesse du vent (c), Radiations globales (d) de la région de Ouagadougou

II-2.4. Climat de la région de Bobo Dioulasso

Dans cette région du Burkina Faso, les températures sont plus clémentes lorsqu'on observe la Figure II-9 (a), celle-ci montre que les températures sont basses par rapport à celles de la région de Ouagadougou et Dori. La Figure II-9 (b) montre que le mois le plus chaud est le mois de Mars avec une température maximale mensuelle de 37,9 °C et le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température moyenne mensuelle minimale de 18,7 °C. Les valeurs moyennes donnent le mois de Mars comme le mois de plus chaud de l'année avec une température de 31,5 °C et le mois le plus froid est le mois d'Août avec une température de 25,66 °C. La bande des amplitudes est faible tout au long de l'année. Elle varie entre 8,2 °C à 14 °C.



(a)

Figure II-9: Températures annuelles de la région de Bobo Dioulasso

La Figure II-10 donne les fréquences des paramètres climatiques de Bobo Dioulasso. La Figure II-10 (a) montre que les températures journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 26 à 30°C, avec une fréquence de plus de 56 %. La Figure II-10 (b) montre que les humidités relatives journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 15 à 35 % et dans l'intervalle 75 à 90 %, avec une fréquence de plus de 70 %. La Figure II-10 (c) montre que les vitesses de vent journalières les plus fréquentes sont dans l'intervalle 2,25 à 3,75 m/s, avec une fréquence de plus de 54 %.

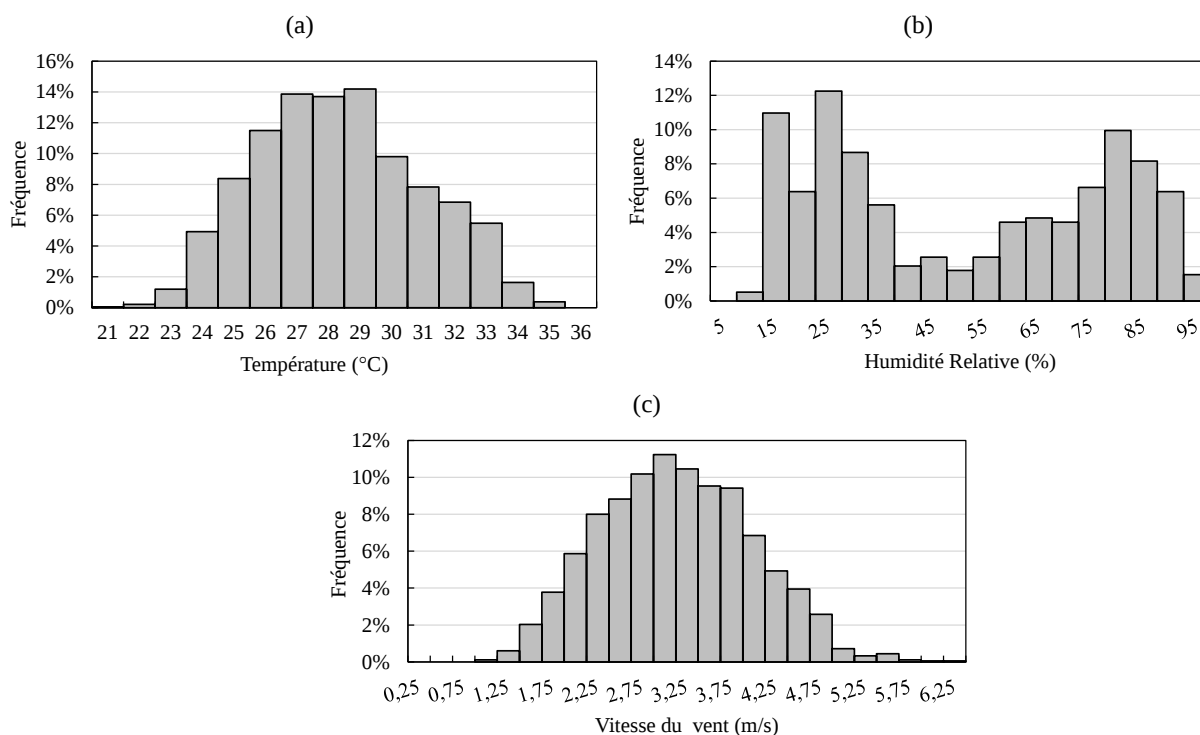


Figure II-10: Fréquences journalières des Températures (a), Humidité relative (b), Vitesse du vent (c) de la région de Bobo Dioulasso

II-3. Habitat du Burkina Faso

L'habitat représente le miroir d'une société et évolue dans le temps et dans l'espace. Il incarne une combinaison de matériaux de construction et de consommation d'énergie. Il s'intègre à la fois dans un contexte environnemental, géographique, socioéconomique et politico-administratif.

II-3.1. Problèmes liés à l'urbanisation

L'urbanisation est un processus de développement des villes et de concentration des populations dans ces villes. L'augmentation du nombre d'habitats en ville par rapport à l'ensemble de la population reste faible. Dans le monde, l'urbanisation va de pair avec le développement économique et industriel d'une région ou d'un pays. En quête de bien-être socio-économique, de nombreuses populations se déplacent vers les villes et cela engendre d'énormes problèmes tels que la dégradation des milieux et la fragilisation des populations par la déculturation. En 2019 plus de 70 % de la population mondiale vivait dans les villes, contre seulement 15 % en 1900 ou 50 % en 2007 (YOUMATTER, 2019). Les dix-sept pays de l'Afrique de l'Ouest dont fait partie le Burkina Faso sont confrontés à un besoin de gérer au mieux les perspectives et les contraintes liées à l'urbanisation accélérée.

Les villes sont les moteurs de la croissance économique et créent ainsi de la richesse, de l'emploi et contribuent à un développement social. Mais malheureusement, la bonne gestion de l'espace urbain par les administrations locales fait défaut et cela engendre des problèmes socioéconomiques de grandes ampleurs. La prolifération de l'habitat informel, la polarisation sociale, l'occupation accélérée des sols, la détérioration de l'environnement et le changement climatique sont les facteurs liés à l'urbanisation rapide comme le montre la Figure II-11. En 1950, les villes de l'Afrique de l'Ouest n'abritaient que 6,6 millions d'habitants. Ce chiffre est passé à 92,1 millions d'habitants en 2000 et à 137,2 millions d'habitants en 2010. Ce taux d'urbanisation accélérée est attendu à un rythme moyen annuel de 6,24 % entre 2020 et 2030. Ceci explique que le nombre de citoyens devrait augmenter de 69 millions entre 2020 à 2030 et de 79 millions entre 2030 à 2040. Les pays de la sous-région doivent de toute urgence se pencher sur la croissance de leur population urbaine qui se développe à une vitesse plus rapide que l'économie locale (ONU Habitat, 2010).

Le Burkina Faso dans les années 1985 avait une urbanisation relativement modérée. Sur 119 localités de plus de 5000 habitants, ce taux dépassait à peine 27 %. Au même moment les pays voisins comme la Côte d'Ivoire, le Ghana ou le Sénégal présentaient un taux compris entre 45 % et 50 %. Ouagadougou qui en est la capitale politique et Bobo Dioulasso, la capitale économique présentent un développement urbain plus prononcé (COMPAORE, 1993). Ils représentent des pôles d'attractivités des populations rurales depuis les années 1960. Ce poids démographique impacte fortement l'espace urbain et induit de multiples problèmes. Le Burkina Faso est l'un des pays les moins urbanisés au monde, mais les villes et sous-villes croissent à un rythme considérable de 5,3 % par an. La population de la capitale Ouagadougou, va doubler entre 2005 et 2020 [ONU-Habitat]. Au cours de ces dernières années, les pouvoirs publics ont pris plusieurs initiatives afin de maîtriser la croissance urbaine, mais malgré la volonté du pouvoir en place, plusieurs communes peinent à appliquer les plans de développements locaux par manque de capacités et de ressources. C'est pourquoi le Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme (MHU) du Burkina Faso et ses partenaires « Cities Alliance », dont les membres, sont, ONU Habitat, la Coopération française et la Coopération allemande, lance le Programme de la mise en œuvre de la politique nationale de l'habitat et du développement urbain (PNH DU, 2008) qui vise à harmoniser les efforts de développements urbains aux niveaux local, municipal et national au bénéfice des populations les plus démunies (MHU, 2008).

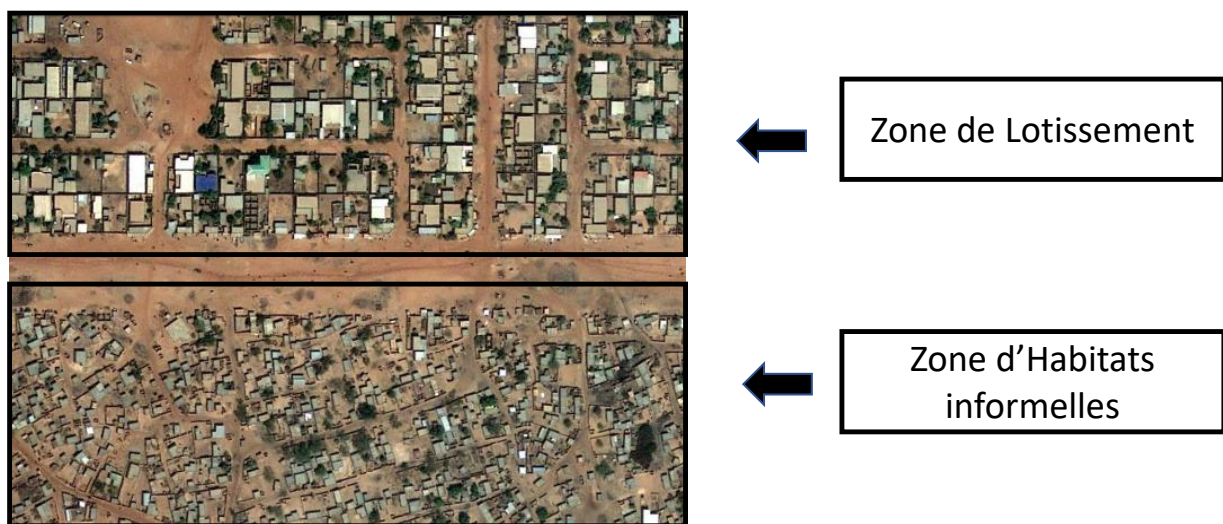


Figure II-11: Image aérienne montrant la polarisation sociale.

II-3.2. Matériaux de construction

En Afrique de l'Ouest et plus précisément au Burkina Faso, il existe une grande variété de matériaux utilisés en construction. Ces matériaux peuvent être regroupés en deux catégories : ceux trouvés sur place ou matériaux locaux à faible coût généralement respectueux de l'environnement, et ceux importés, onéreux et souvent inadaptés aux conditions climatiques et qui engendrent de fortes contraintes thermiques intérieures. Pour absorber le besoin en logements et faire face à l'urbanisation galopante, il s'avère important de trouver des techniques appropriées afin de promouvoir les matériaux locaux, améliorer le confort thermique intérieur des bâtiments et rendre accessible à moindre coût l'habitat. Comme la terre ou les BTC (Briques de Terre Comprimée), les adobes (Brique en terre crue) en Figure II-12 (b) sont considérés comme des matériaux de construction écologiques à cause de leur faible teneur en carbone incorporé par rapport aux matériaux conventionnels tels que le béton et la brique en terre cuite (MILLOGO et al., 2016). Sur le plan national en 2009, au centre-ville du Burkina Faso, les statistiques montrent que les bâtiments dont les façades sont réalisées en terre représentent 52 % des logements urbains contre 47,4 % de bâtiments dont les façades sont en parpaing de ciment (MHU, 2017). Par contre, lorsque l'on considère l'ensemble du pays, les constructions sont majoritairement en terre à 79,1 % selon (INSD, 2015). Cependant l'adobe confectionné avec de la terre argileuse locale présente des problèmes liés à leurs faibles résistances mécaniques. Ces types de bâtiments s'érodent chaque saison pluvieuse et par conséquent nécessitent un entretien périodique. La résistance à la compression humide est proche de zéro (MILLOGO and MOREL, 2012). Le BLT (bloc de latérite taillée) en Figure II-12 (c) est un matériau localement exploité dans les carrières de latérite indurée à des fins de construction. À l'époque coloniale, le BLT servait à la construction d'édifices administratifs, militaires et de culte. L'extraction se faisait par les travaux forcés. Dans certaines villes du Burkina Faso comme Toussiana, Dano et Bobo Dioulasso, une prédominance des structures en BLT est remarquable (WYSS, 2005c). À ce jour il n'existe pas de norme régissant l'utilisation du BLT dans la construction, pourtant plusieurs études ont été menées à ce sujet (GANA, 2014; HEMA, 2020). La résistance à la compression des blocs est fortement influencée par leur état hydrique, la roche mère et la profondeur d'exploitation dans une même carrière. Elle est comprise entre 0,38 et 4,87 MPa, ce qui lui permet d'être employée comme mur porteur (GANA, 2014). Le BTC (bloc de terre comprimée) en Figure II-12 (a) est la forme la plus améliorée de l'adobe utilisé comme brique de maçonnerie et de revêtement. C'est une composition d'argile ou de latérite stabilisée ou non et comprimée à l'aide d'une presse afin d'accroître ses propriétés physiques. Plusieurs moules

existent permettant de produire une panoplie de briques avec différentes formes. La stabilisation mécanique permet de réduire la porosité du matériau et le rend plus imperméable à l'eau (MEUKAM, 2004). La stabilisation chimique avec apport de liants hydrauliques tels que la chaux, le ciment ou le bitume permet de réduire la sensibilité à l'eau et augmente la résistance à la compression (GONZALEZ-LOPEZ et al., 2018). À ce jour, plusieurs études ont permis d'améliorer considérablement la qualité du BTC avec l'apport de stabilisants respectueux de l'environnement comme les cendres volantes, les cendres de balle de riz, des résidus de carbone de calcium et la stabilisation au liant géopolymère (NSHIMIYIMANA et al., 2019; OMAR SORE et al., 2018). Au niveau national il existe des spécifications techniques des BTC permettant de faire le choix des matières premières pour sa confection jusqu'à la mise en œuvre de la maçonnerie (NBN 02-001 à NBN 02-008) (ABNORM, 2009). Le parpaing de ciment en Figure II-12 (d) semble le matériau le plus utilisé surtout dans le milieu urbain pour la construction sans doute en raison de sa facilité de pose et de sa résistance aux intempéries. Il est essentiellement composé de sable alluvionnaire, du ciment et de l'eau. Sa résistance à la compression varie entre 4 à 10 MPa selon la fonctionnalité de l'ouvrage (mur porteur ou non porteur) (Bakayoko et al., 2019). La faible résistance de certains blocs est parfois liée à la formulation et à la mise en œuvre du matériau (SEDRAN, 1999). Pourtant, des spécifications techniques existent au Burkina Faso pour permettre le bon choix des intrants pour des parpaings de qualité (NBF 02-004 à NBF 02-026).



Figure II-12: Les types de matériaux de construction (a) Bloc de terre comprimée (b), Les adobes, (c) Bloc de latérite taillée, (d) Parpaing de ciment.

II-3.3. Typologie de l'habitat au Burkina Faso

Le type de construction au Burkina Faso est fortement lié au milieu de résidence (Urbaine et Rurale) et au contexte socioculturel. Les nouvelles technologies venues des pays développés impactent également le mode de construction. Les habitats modernes semblent être une reproduction des habitats des pays occidentaux malgré les différences climatiques (AJIBOLA, 2001). En zone urbaine le secteur du bâtiment est en pleine mutation. Les méthodes contemporaines sont délaissées au profit des bâtiments modernes du simple fait de l'introduction de nouveaux matériaux de construction et de nouvelles techniques de construction. La Figure II-13 montre plusieurs types de bâtiment rencontrés en zone urbaine : La Figure II-13 (a) montre un bâtiment moderne à plusieurs niveaux d'étages réalisé entièrement en béton armé. La Figure II-13 (b) montre un bâtiment moderne représentant une villa réalisée en parpaing de ciment avec une toiture en tôles d'aluminium simple et doubles pentes. La Figure II-13 (c) montre un bâtiment à plusieurs pièces en voûte nubienne réalisé entièrement en adobe. La Figure II-13 (d) montre un bâtiment moderne réalisé en BLT ou en BTC avec toiture en tôles. La Figure II-13 (e) montre une maison individuelle simple en adobe avec toiture en tôle.

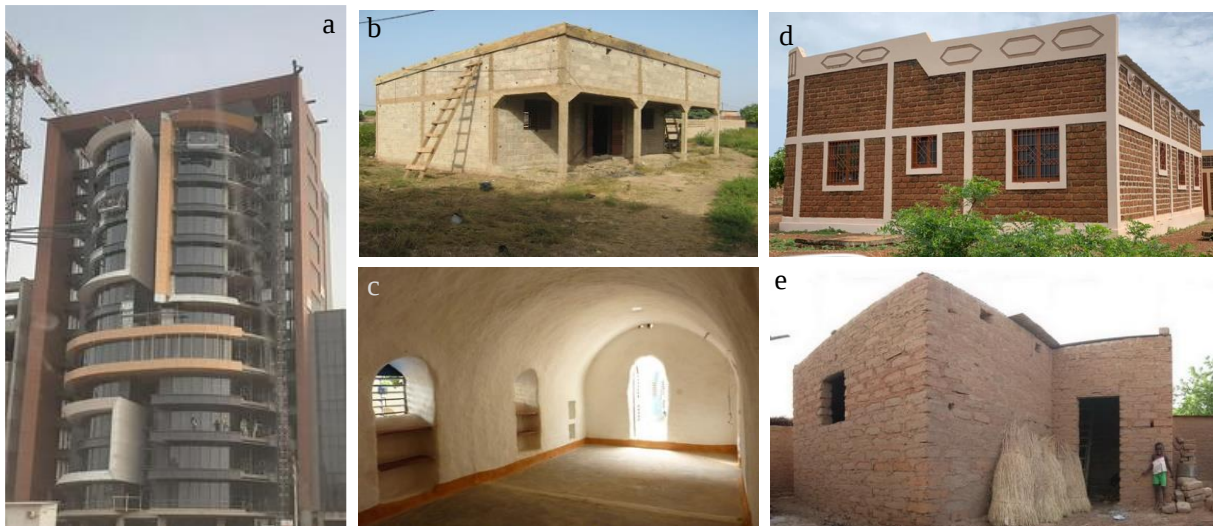


Figure II-13: Constructions modernes rencontrées en zone urbaine (a) Bâtiment moderne en béton armé à plusieurs niveaux d'étages, (b) Bâtiment moderne réalisé en parpaing de ciment, (c) Bâtiment en voûte nubienne réalisé en adobe, (d) Bâtiment réalisé en BLT ou en BTC, (e) Bâtiment réalisé en adobe.

La Figure II-14 présente les types de logements rencontrés en zone rurale. La Figure II-14 (a) présente une maison individuelle en adobe avec toiture en tôle d'aluminium comme présentée

en Figure II-14 (f). La Figure II-14 (b) présente une maison en terre avec toiture-terrasse en terre soutenue par une charpente en bois local disposé comme présentée en Figure II-14 (c). La Figure II-14 (d) présente une case ovoïde en terre façonnée en brique d'adobe avec toiture en chaume sur natte. La Figure II-14 (e) est un habitat individuel en terre avec cette particularité de l'enduit en terre à plusieurs pigments. Les motifs et les symboles sont tirés soit de la vie quotidienne, soit de la religion et des croyances.

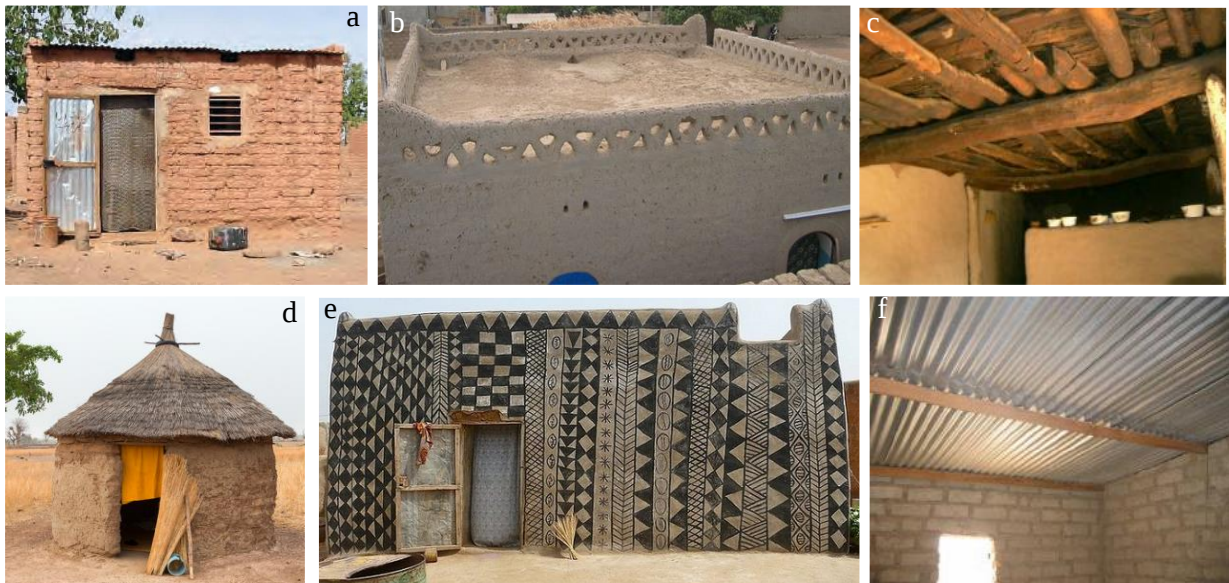


Figure II-14: Constructions rencontrées en zone rurale (WYSS, 2005c), (a) Bâtiment individuel en adobe, (b) Maison en terre avec toiture-terrasse, (c) solivage en bois local qui sert de support à la toiture-terrasse, (d) Case ovoïde d'adobe avec toiture en chaume sur natte, (e) Bâtiment avec enduit en terre à plusieurs pigments, (f) Charpente en bois importé qui sert de support à la couverture en tôle.

II-4. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de passer en revue les différents types de climats rencontrés dans le paysage burkinabè ainsi que la typologie de l'habitat que l'on peut rencontrer. La forte démographie et l'urbanisation accélérée sont les défis majeurs à relever par l'administration locale pour faire face à la demande croissante de logement et au changement climatique. Les constructions contemporaines à architecture traditionnelle font place peu à peu aux nouvelles constructions et aux matériaux modernes. Les logements en terre crue restent toujours majoritaires dans la sous-région du fait de la disponibilité du matériau. La fragilité et l'entretien périodique de matériaux en terre, l'inconfort thermique des matériaux en ciment inadapté au contexte climatique nécessitent une réflexion sur cette problématique de l'habitat. C'est

pourquoi les villes modernes doivent être repensées. Dans les prochains chapitres seront menées des investigations dans le but de réduire le stress thermique intérieur et de trouver des solutions aux problèmes liés au confort thermique des logements.

CHAPITRE III. Méthodologie et dispositif expérimental

III-1. Introduction

Ce chapitre traite du dispositif d'expérimentation et de la méthodologie utilisée pour la collecte des données climatiques dans les bâtiments pilotes. Il se compose d'une description des bâtiments pilotes en relation avec les matériaux disponibles au Burkina Faso et donne les caractéristiques et la description des appareils utilisés, du monitoring et des enquêtes sur site.

III-2. Description des pilotes expérimentaux

III-2.1. Présentation de la plateforme

La plateforme expérimentale de 2iE d'une superficie de 300 m² est destinée à la construction de « bâtiments pilotes » pour des fins de recherche sur le confort thermique des bâtiments à faibles coûts et répondant aux exigences de l'architecture bioclimatique. Le site est situé dans l'enceinte de l'institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE) à Kamboinsé, une localité située à une dizaine de kilomètres de Ouagadougou, la capitale administrative du Burkina Faso. Le site comprend actuellement trois bâtiments réalisés avec des matériaux de construction différents comme le montre la Figure III-1.



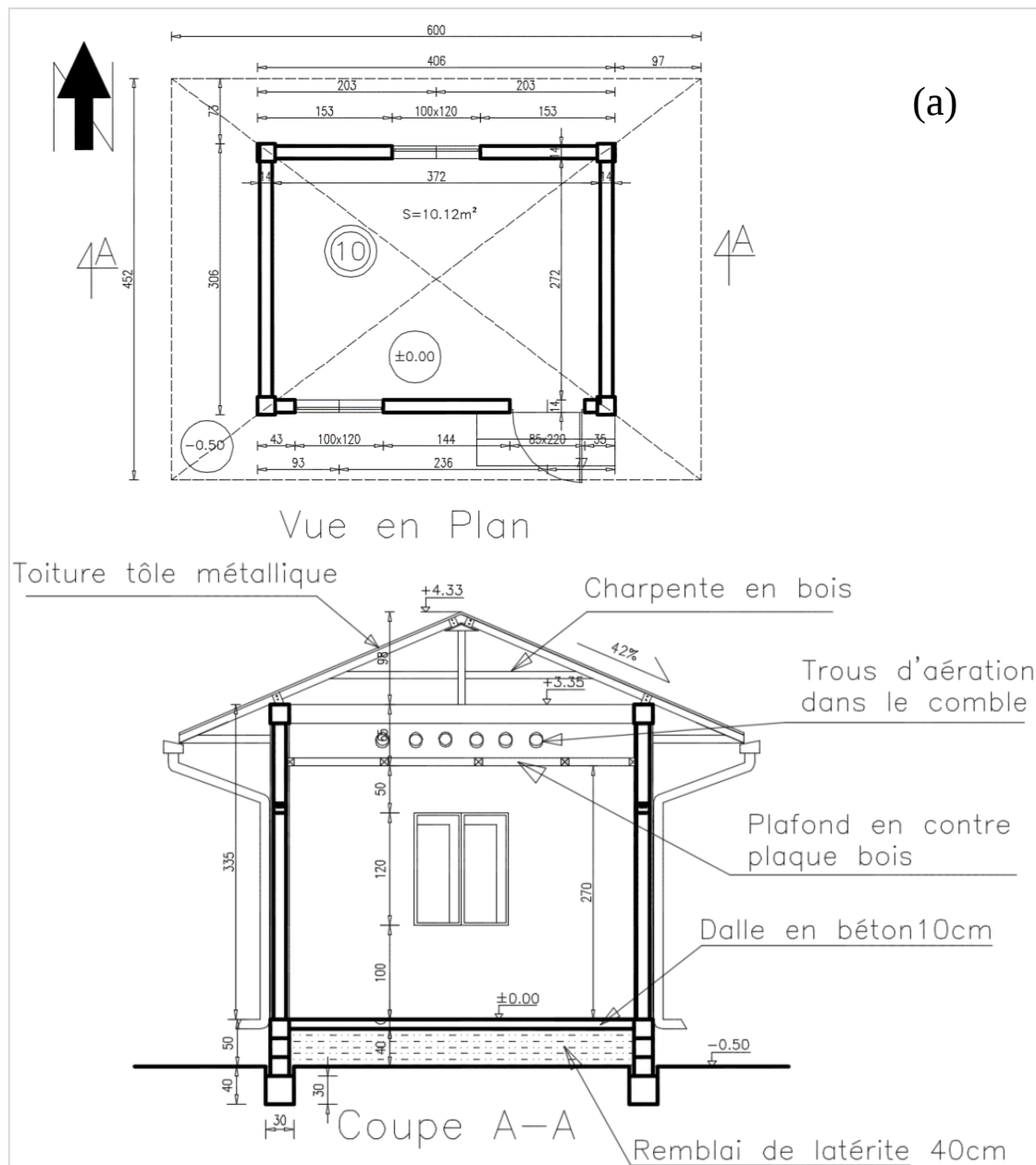
Figure III-1: Plateforme expérimentale

Les coordonnées géographiques du lieu sont : 12°27'49,16 '' latitudes Nord et 1° 33'12,56 '' longitudes Ouest avec une altitude de 300 m. Ces bâtiments ont été construits dans le cadre du projet « Direction du Développement et de la Coopération /Habitat Durable » et ont fait l'objet de plusieurs projets de recherche sur la valorisation des matériaux locaux écologiques et durables avec de hautes performances mécaniques et thermiques (HEMA, 2020; NEYA, 2020; NSHIMIYIMANA, 2020; SEICK OMAR, 2017).

III-2.2. Présentation des bâtiments pilotes

III-2.2.1. Géométrie commune des pilotes

Les bâtiments pilotes ont une forme rectangulaire de dimensions extérieures de 4,06 m x 3,06 m au sol. La hauteur sous plafond est de 2,70 m séparés du comble par un faux plafond en contreplaqué de bois de 3 mm d'épaisseur ayant une hauteur de 1,63 m. le comble est ventilé de façon naturelle par six claustras circulaires de 10 cm de diamètre disposés en série sur la façade Nord et Sud. La surface habitable est de 10,12 m². La base des pilotes est réalisée par une couche de latérite compactée d'une hauteur de 40 cm reposant sur le sol surmonté par une couche de béton armé de 10 cm d'épaisseur. L'ensemble est protégé par une maçonnerie en brique pleine de 20 cm qui transmet les charges directement sur les semelles filantes en béton cyclopéen. Les plans architecturaux sont présentés à la Figure III-2. Les toitures en formes pyramidales ont un débord de 1 m tout autour pour une protection d'une partie des murs contre la pluie et les rayons du soleil. Ce dispositif architectural permet de réduire le flux de chaleur solaire vers l'intérieur des pilotes.



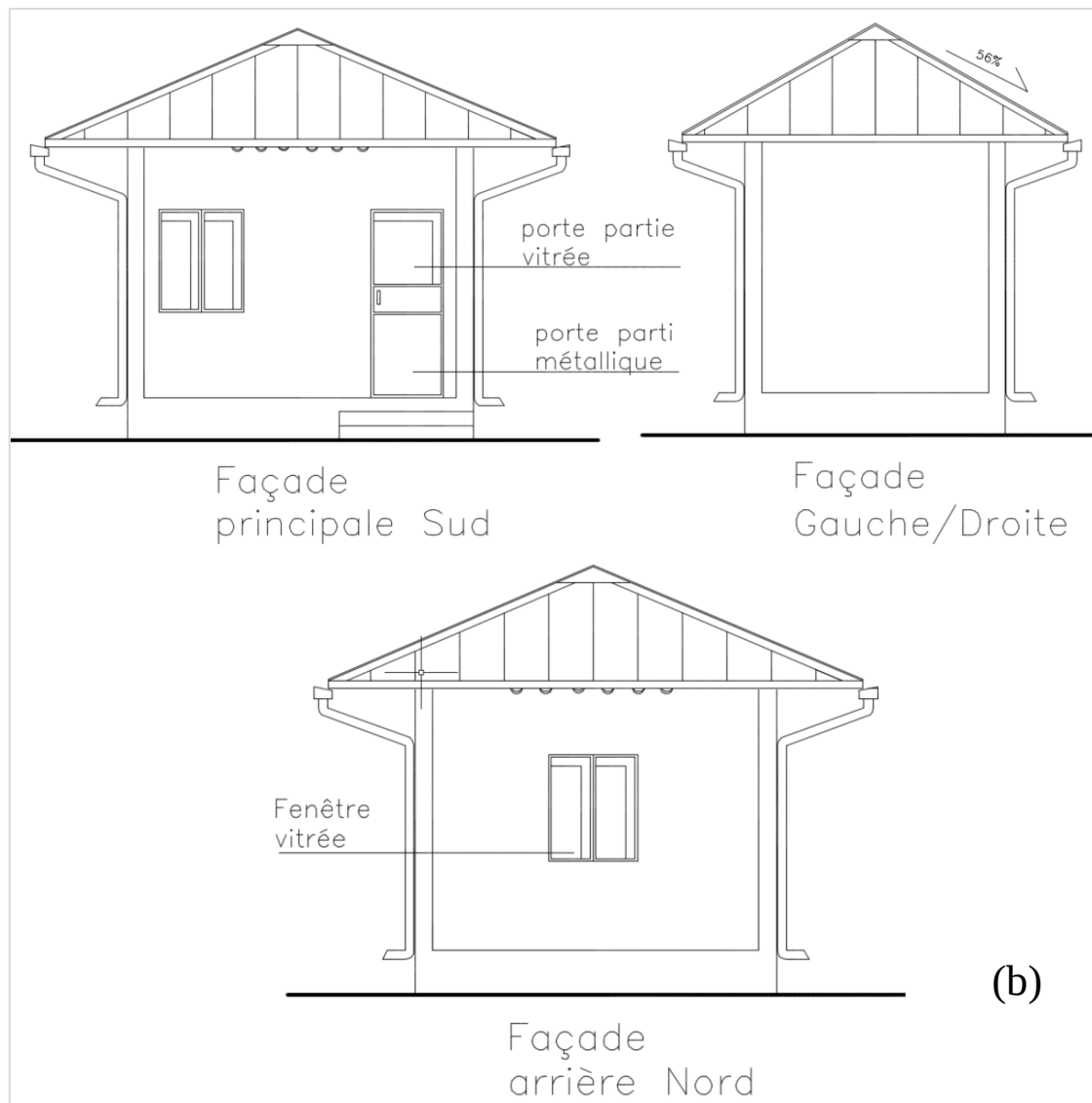


Figure III-2 : Plans architecturaux communs aux bâtiments pilotes, (a) vue en plan et vue en coupe, (b) les différentes façades.

Les façades Sud sont les façades principales possédant une porte d'entrée de hauteur 2,20 m et de largeur 0,80 m et une fenêtre de hauteur 1,20 m et de largeur 1,00 m. La façade Nord représente la façade arrière avec une seule fenêtre de hauteur 1,20 m et de largeur 1,00 m. Les deux autres façades Est et Ouest n'ont pas d'ouverture.

III-2.2.2. Caractéristiques de l'enveloppe des pilotes

Sur cette étude nous allons utiliser uniquement les deux premiers pilotes réalisés sur le site. Il s'agit du pilote N°1 en mur unique réalisé en parpaing de ciment et du pilote N°2 en mur unique

réalisé en blocs de terre comprimée stabilisée au ciment. La seule différence entre ces deux pilotes réside dans les murs de leurs enveloppes. Les autres corps d'états sont identiques à savoir : la toiture en tôle métallique, la charpente en bois, le faux plafond en contreplaqué bois, l'ossature en béton armé, le dallage en béton armé et les soubassements en brique pleine de ciment. Les portes sont partiellement vitrées et partiellement métalliques, et les fenêtres sont en simples vitrages.

L'enveloppe du pilote N°1 est réalisée en parpaing de ciment dosé à 18 % avec des joints en mortier de ciment comme le montrent les Figure III-3 et Figure III-4.

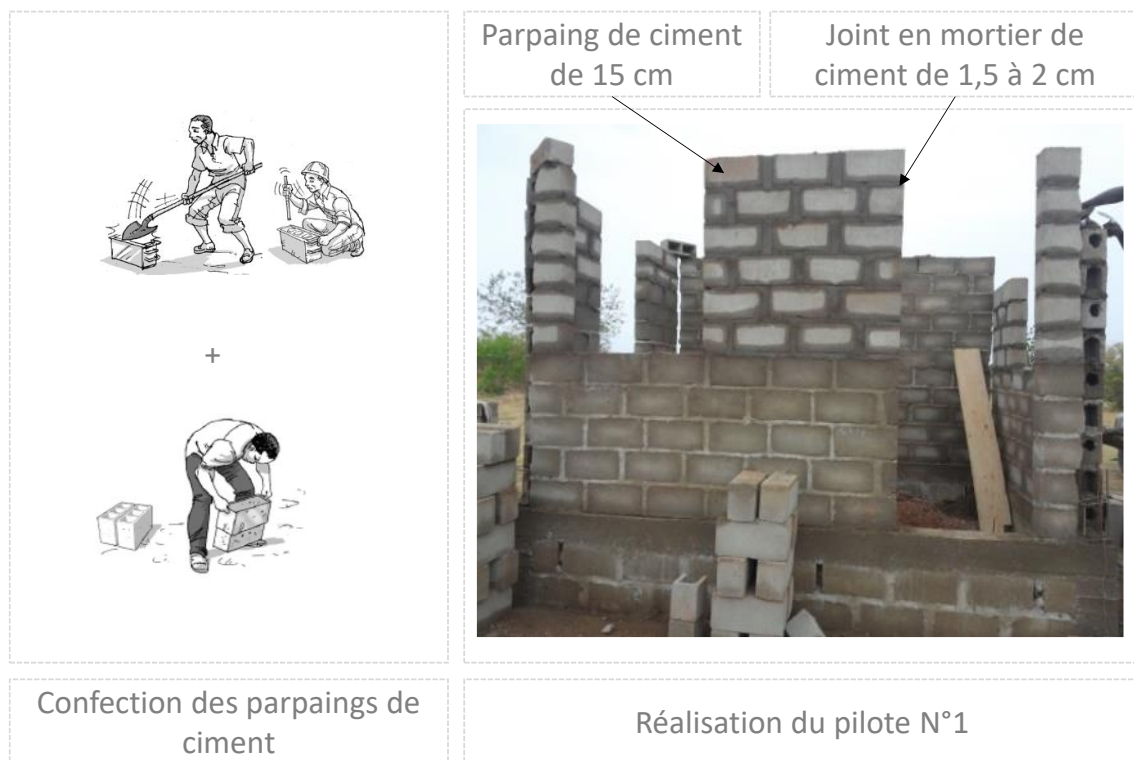


Figure III-3 : Confection de parpaing de ciment et construction du bâtiment pilote N°1 (OUEDRAOGO, 2016)

L'enveloppe du pilote N°2 est réalisée en blocs de terre comprimée dosés à 8 % de ciment avec des joints en mortier de sable et de ciment comme le montre la Figure III-4. Elle est obtenue par malaxage et compactage de la latérite soigneusement sélectionnée.

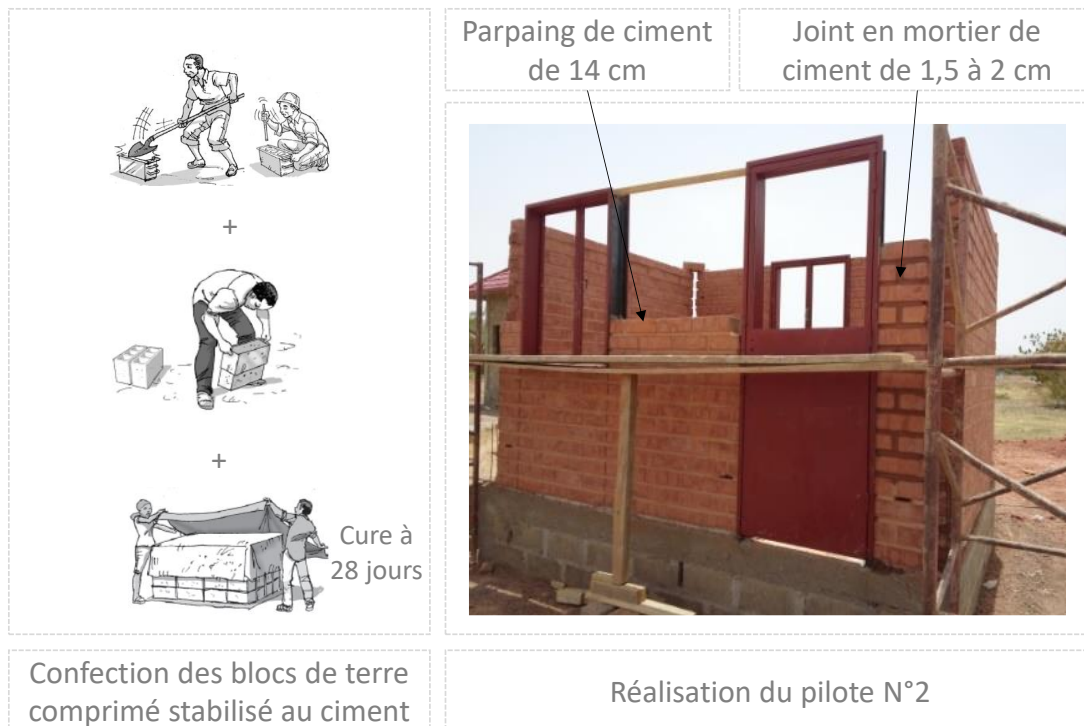


Figure III-4 : Confection de blocs de terre comprimée et construction du bâtiment pilote N°2 (OUEDRAOGO, 2016)

Le tableau III-1 suivant donne les caractéristiques physiques des matériaux utilisés pour les pilotes.

Tableau III-1 : les caractéristiques physiques des matériaux

Matériaux	Composition	Épaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/ (m.K))	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
BTC	Terre crue + ciment	14	1.05	1870	1337
Parpaing alvéolé	Sable + ciment	15	1.7	2300	880
Sol	Béton	30	1.7	2300	880
Comble	Bois contreplaqué	2	0.11	400	1300
Toiture	Tôle acier	0.2	160	2700	6
Porte	Bois contreplaqué	2	0.11	400	1300

III-2.2.3. Orientation des pilotes par rapport à la trajectoire solaire

Dans le souci de minimiser l'impact de toute forme d'ombrage par l'environnement et les bâtiments eux-mêmes, ces bâtiments sont réalisés sur un terrain à relief plat et sont décalés par rapport à la trajectoire du soleil comme le montre la Figure III-5.

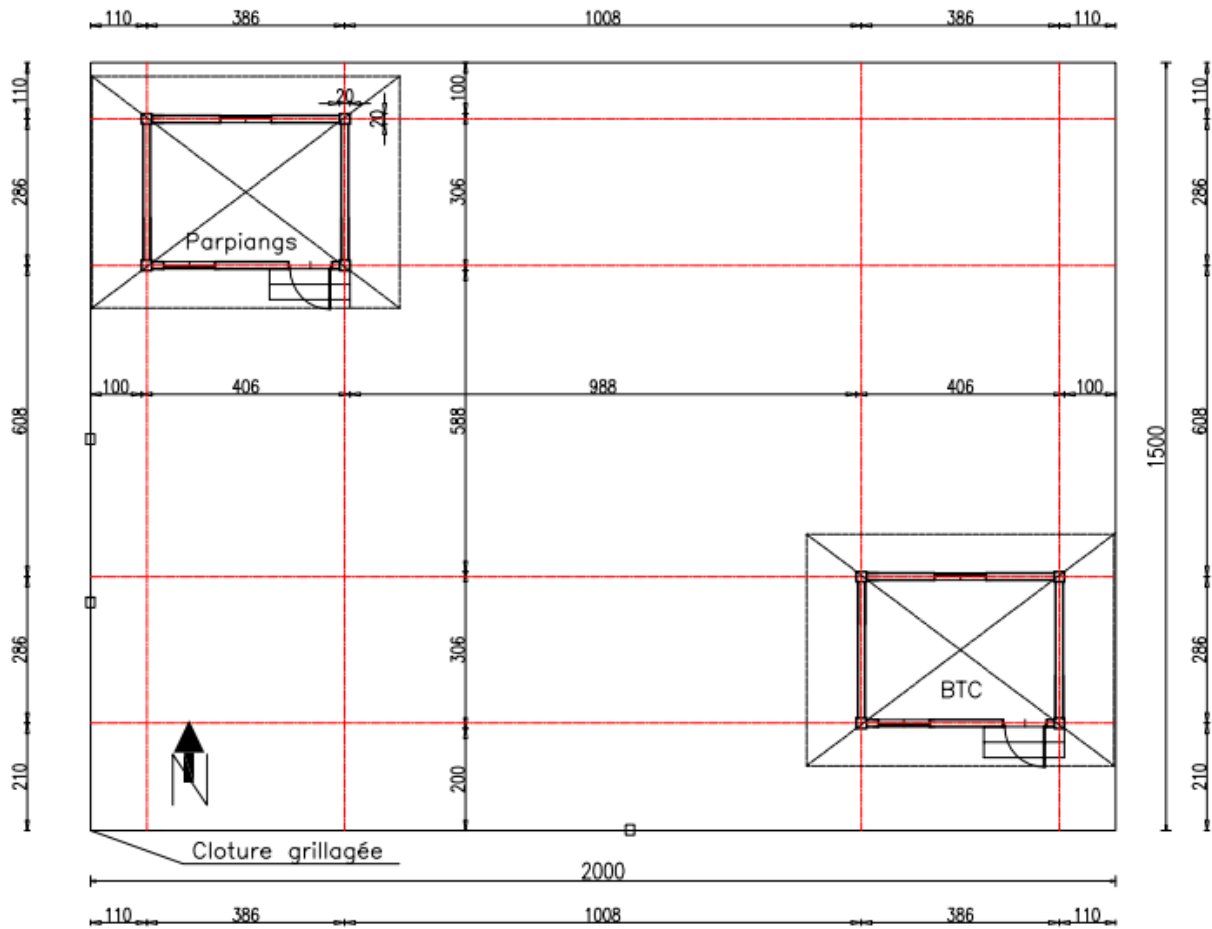


Figure III-5 : Plan de masse des bâtiments pilotes sur le site expérimental

La distance entre les deux pilotes a été calculée et arrêtée de manière qu'aucun des deux ne fasse de l'ombre à l'autre. La hauteur des pilotes est telle que la distance minimale requise et adoptée entre les deux est de 10 m (figure III-6).

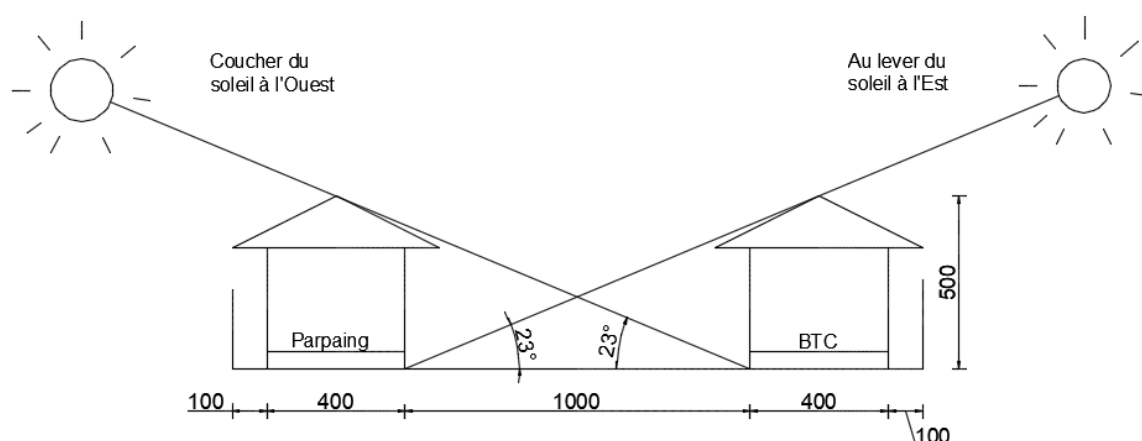


Figure III-6 : Rayons d'incidence du soleil au lever et au coucher du soleil (OUEDRAOGO, 2016)

III-3. Instrumentation des pilotes et méthodologie expérimentale

III-3.1. Instrumentation

L'instrumentation des pilotes a nécessité deux types d'appareils pour l'enregistrement des paramètres à l'intérieur des pilotes. Il s'agit des micropuces (Thermopuces et Thermohygropuces) de la société Waranet Solution et un appareil de mesure de paramètres climatiques de Delta OHM présentés au Tableau III-2.

Tableau III-2 : Paramètres climatiques mesurés par l'appareil HD32.2 de Delta OHM

Sondes	Symbole	Températures	Humidité Relative	Vitesse du vent
TP3275 ou TP3276.2	Tg	Température de thermomètre globe		
qs HP3217R ou HP3217.2	T et HR	Température ambiante	Humidité relative	
AP3203 ou AP3203.2	Va			Vitesse de l'air
HP3201.2 ou HP3201	Tnw	Température de bulbe humide à ventilation naturelle		
TP3207.2 ou TP3207	T/Tr	Température ambiante /Température radiante		



Figure III-7 : (a) Micropuces (Thermopuces et Thermohygropuces), (b) Appareil d'acquisition de paramètres climatiques.

Les thermopuces sont des capteurs de température et les thermohygropuces des capteurs mesurant à la fois la température et l'humidité relative de l'air. Les thermopuces sont des thermomètres de modèle P650, équipés d'une sonde de température PT100 avec une mémoire interne permettant de stocker les données. Les incertitudes répondent aux exigences de la norme EN 13 005 et ISO 17025 et sont de $0,36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les thermohygropuces sont une association de thermomètres de modèle P650 à sonde thermique PT100 et de sondes hygromètres de type Rotronic HC2. Ces thermohygropuces ont une incertitude de $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température et de 2% pour l'humidité relative. Un câble USB pour la connexion à un ordinateur et la lecture des données et un logiciel de traçabilité et de traitement (Warito II) sont fournis par le fabricant.

Les thermopuces sont implantés de manière à enregistrer les températures de surface des murs et ambiantes du comble. Les thermohygropuces enregistrent la température ambiante et l'humidité relative intérieure et extérieure de la pièce. Les sondes de température des murs sont fixées par un ruban adhésif à une hauteur de $1,10\text{ m}$ et sont isolées par de la laine de verre pour éviter toute radiation du milieu immédiat. Les thermohygropuces sont placées au centre et dans le comble à des hauteurs respectives de $1,1\text{ m}$ et de $3,35\text{ m}$ du sol. La Figure III-8 montre la disposition des micropuces dans les bâtiments pilotes.

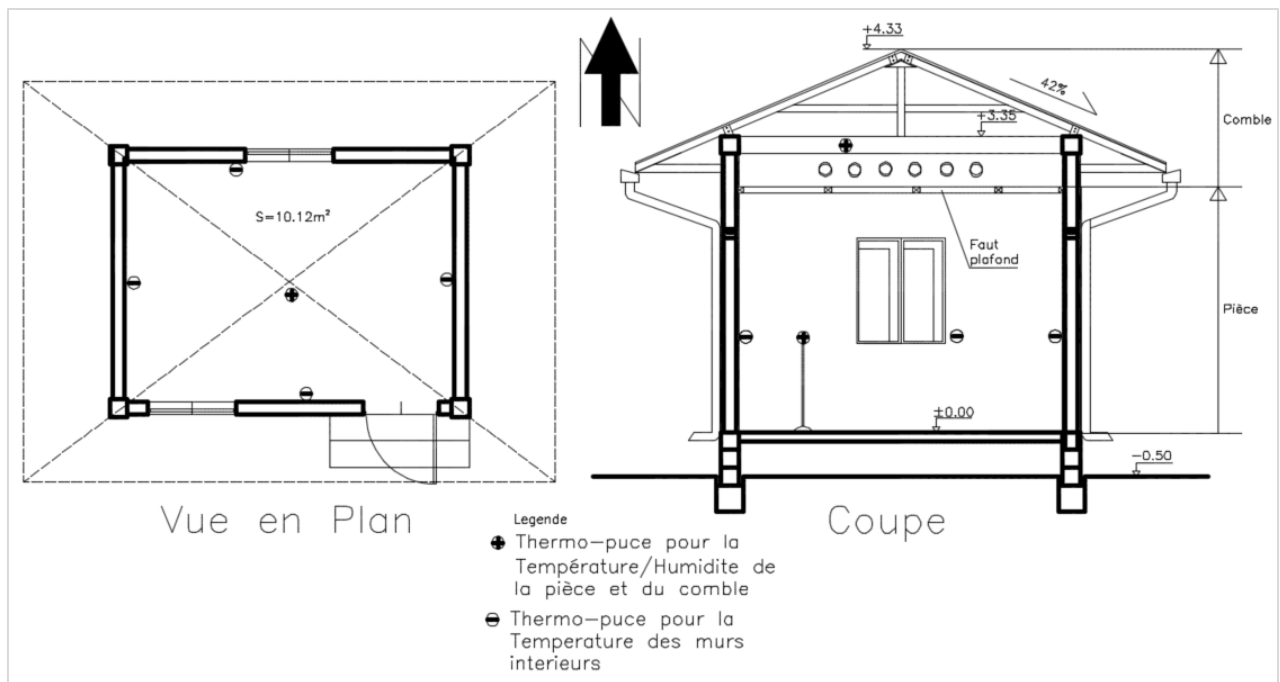


Figure III-8 : Disposition des micropuces dans les pilotes

Le second appareil est l'instrument de mesure des paramètres du confort thermique de Delta OHM de type HD32.3 présenté à la figure III-9. C'est un appareil muni de trépieds permettant de maintenir les capteurs à une hauteur de 1,1m et est doté de trois entrées pour sondes avec module SICRAM lui permettant de faire plusieurs mesures en temps réel. L'appareil HD32.3 peut-être programmé directement avant les mesures. Les trois sondes dont il est composé sont :

- Une sonde (TP 3275) de type PT 100 à fil mince, permet de mesurer la température ambiante et la température du thermomètre globe. Son exactitude de 1/3 DIN permet d'avoir une plage de mesure de (- 40 °C à 100 °C).
- Une sonde (HP 3217) de type PT 100 permet de mesurer l'humidité relative avec une précision de $\pm 2,5 \%$ et la température à bulbe humide avec une précision de 1/3 DIN. La plage de mesure des humidités relatives est de 5 % à 98 %.
- Une sonde (AP 3203) de type NTC 10 kohm qui permet la mesure de la vitesse de l'air avec une exactitude de $\pm 0,05$ m/s. Sa plage de mesure est de 0,05 à 5 m/s.

Ces stations sont dotées d'un logiciel DeltaLog10 qui permet d'analyser en temps réel des environnements divers que ce soit en présence ou en l'absence de rayonnement solaire. Le logiciel permet également de gérer les opérations de connexion ainsi que le transfert de données

sur l'ordinateur, de présenter les graphiques, de calculer les indices de confort thermique tels que le PMV et le PPD, le WBGT in et le WBGT out.

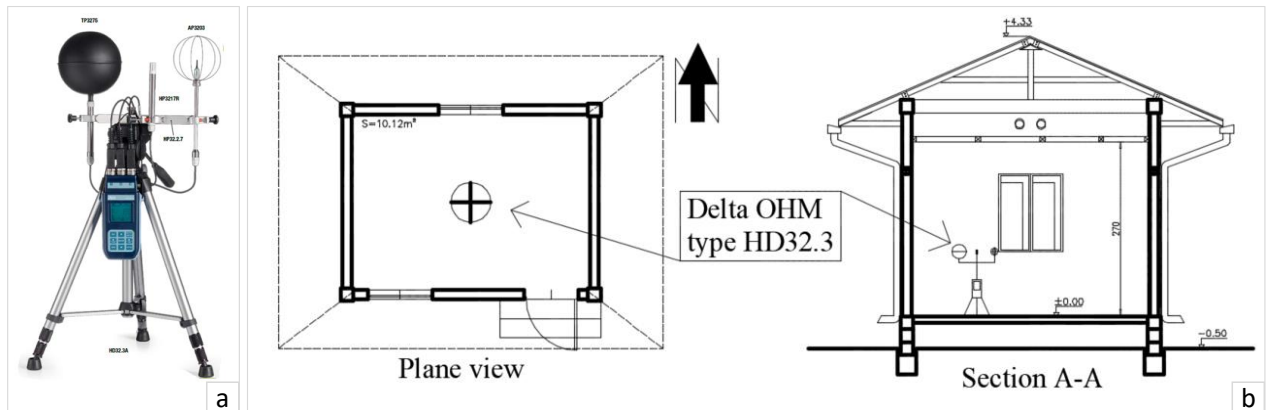


Figure III-9 : (a) présentation de l'instrument de mesure de Delta OHM de type HD 32.3 (b) disposition dans le pilote.

III-3.2. Méthodologie expérimentale

Les bâtiments pilotes sont maintenus fermés (Porte et fenêtre) pendant l'expérimentation. Ils sont en évolution libre, c'est-à-dire sans chauffage ni climatisation internes. Ils ne sont pas habités durant les mesures. Toute cette disposition est dans le but de supprimer l'effet des sources de chaleur internes pour ne conserver que celui du climat et des sources externes sur les pilotes. Les figure III-10 et III-11 présentent le fonctionnement de tout le système de mesure et traitement des paramètres expérimentaux des micropuces et de l'appareil HD 32.3.

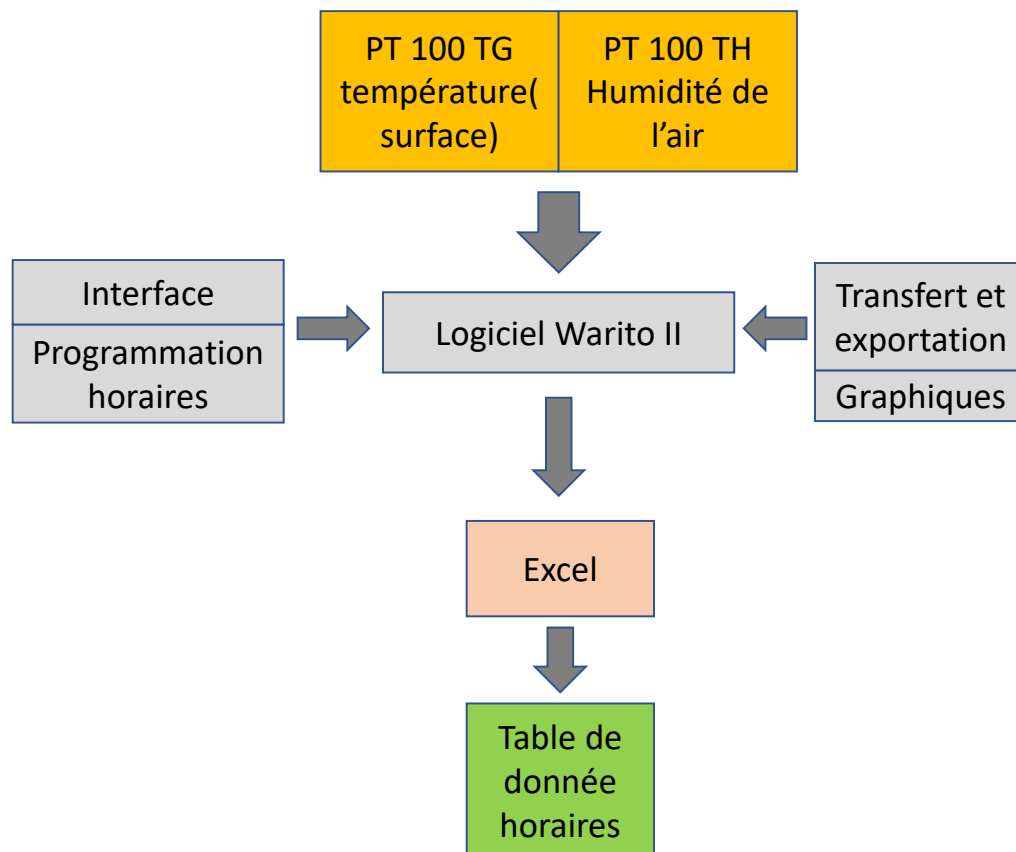


Figure III-10: Dispositif de collecte et de traitement des données des micropuces

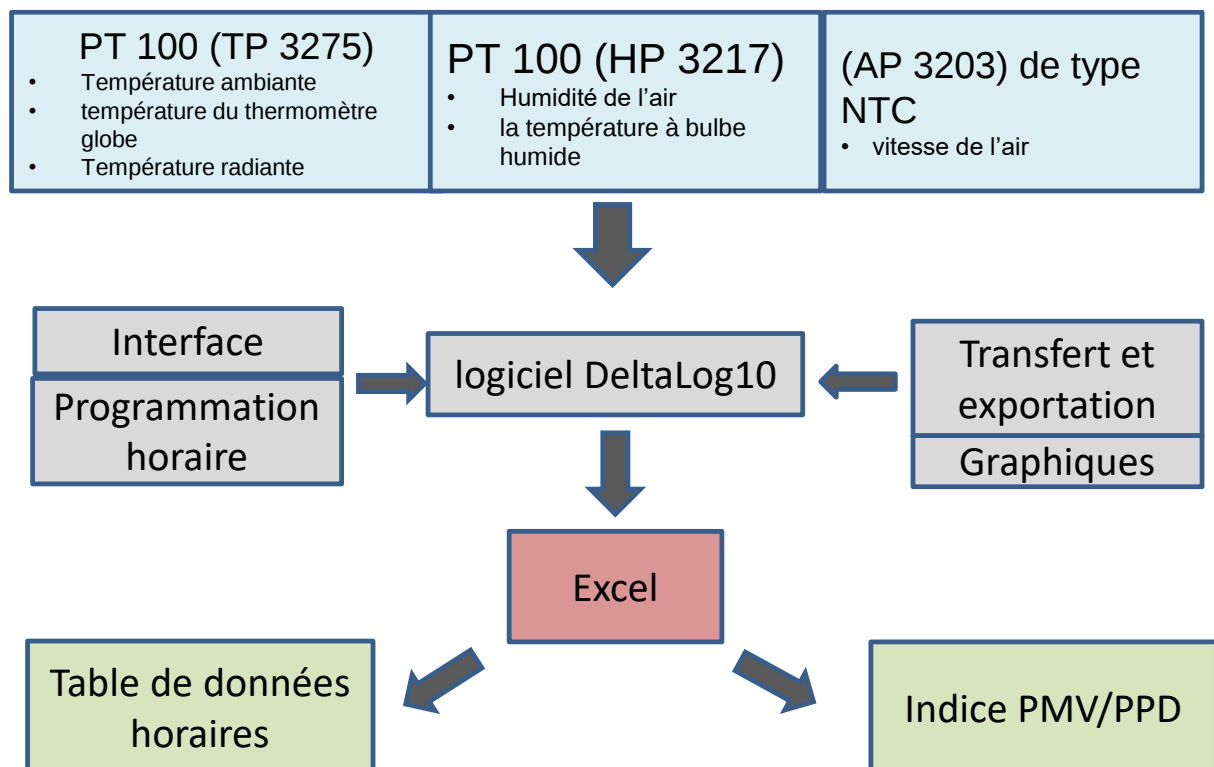


Figure III-11: Dispositif de collecte et de traitement des données de la HD32.3

III-4. Enquêtes sur site

Cette partie concerne les études de terrain avec enquête pour une collecte de données afin d'analyser statistiquement les sensations réelles des occupants des bâtiments. Ces résultats expérimentaux devront être comparés aux résultats donnés par les méthodes théoriques de la littérature. Les méthodes empiriques de prédiction du confort thermique dans les bâtiments semblent parfois surestimer la sensation de confort réel ressenti dans les climats chauds et secs.

III-4.1. Fiche d'enquêtes

Plusieurs études ont été menées sur le terrain pour caractériser le confort thermique en Afrique (LAWSON, 1991) qui utilise l'échelle à sept points de Fanger ou chaque intervalle correspond à une sensation thermique pour caractériser le confort thermique (LAWSON, 1991). DJONGYANG et al. élaborent une fiche d'enquête et collectent environ 214 données sur le confort thermique des personnes au Cameroun, occupant des logements modernes et traditionnels en adobe et proposent une nouvelle plage de confort thermique (DJONGYANG et al., 2010). La fiche d'enquête mise en place par NEMATCHOUA et al. est composée d'une première partie présentant les données personnelles, d'une deuxième partie regroupant les paramètres thermiques et d'une troisième partie permettant de renseigner sur le contrôle du microclimat par l'occupant (NEMATCHOUA et al., 2014). Il questionne environ 1120 participants et propose une nouvelle plage de confort thermique. Dans le cadre de cette étude, la fiche de questionnement proposée en annexe pour la collecte des données de terrain sera composée de plusieurs parties à savoir :

- Une partie sur les informations de la résistance thermique de l'habillement (ASHRAE Standard 55, 2017; ISO Standard 7730, 2006),
- Une partie sur les informations subjectives, la perception de la sensation, ou le vote de la sensation thermique (TSV) suivant l'échelle à sept points de la sensation thermique d'ASHRAE Standard 55 et la préférence thermique (TP).
- Une partie sur les informations objectives, les paramètres qui transforment les stimuli en sensations physiologiques (Quentin et al., 2017) et l'activité métabolique (ISO 7730 et ASHRAE Standard 55).
- Une dernière partie sur les paramètres climatiques mesurés dans la pièce.

III-4.2. Mode opératoire de l'enquête

Les enquêtes se sont déroulées sur les deux sites de 2iE, à Ouagadougou et à Kamboinsé dans les bâtiments administratifs, dans les salles de classe et dans les chambres d'étudiants. Sur les deux sites, elles se sont déroulées dans la journée aux heures d'occupation habituelles des bureaux et des salles de classe.

Après la préparation du matériel composé essentiellement de l'appareil de mesure du confort thermique de Delta OHM, nous avons procédé aux collectes des données sur les différents sites. La première phase de la collecte consiste à expliquer l'objet de l'expérimentation aux acteurs ainsi que l'importance de l'étude et comment l'enquête doit se dérouler. Ensuite, l'appareil de mesure est disposé à proximité de l'occupant à un mètre environ, ou au milieu de la pièce. Durant 10 à 15 min, les paramètres du climat intérieur du local sont mesurés pendant que l'enquêté remplit simultanément le questionnaire. À la fin, le remplissage des fiches est vérifié et le matériel emballé pour une autre destination. Au total, 590 participants soit 403 dans des logements en évolution libre et 187 en logements climatisés, ont pu répondre aux questionnaires dans les conditions où un contrôle total de l'ambiance thermique intérieure était possible. Les locaux étaient pour la plupart réalisés en parpaings de ciment et également en blocs de terre comprimés.

III-4.3. Caractéristique de l'échantillon

L'échantillon de 590 personnes a été composé de 463 hommes et 127 femmes, âgés de 16 à 63 ans. Cette étude sur le terrain par enquête a concerné uniquement la région de Ouagadougou. La détermination de la résistance thermique de l'habillement s'est faite suivant la norme ISO 9920 (cité par ISO 7730). Le métabolisme qui est le résultat d'une activité ou d'un état physique particulier agit sur le confort thermique. Il est déterminé suivant la norme ISO 8996 (cité par ISO 7730). Pour donner un ordre de grandeur, le travail de bureau correspond à une dépense d'énergie métabolique de 70 W/m^2 de surface corporelle. Une perception de la sensation des bâtiments en évolution libre, ou le résultat du vote de la sensation thermique est présenté en Figure III-12. On constate que sur l'ensemble des votants les individus en neutralité thermique sont d'environ 45 % des votants. L'inconfort froid représente 27 % et l'inconfort chaud 28 % des votants.

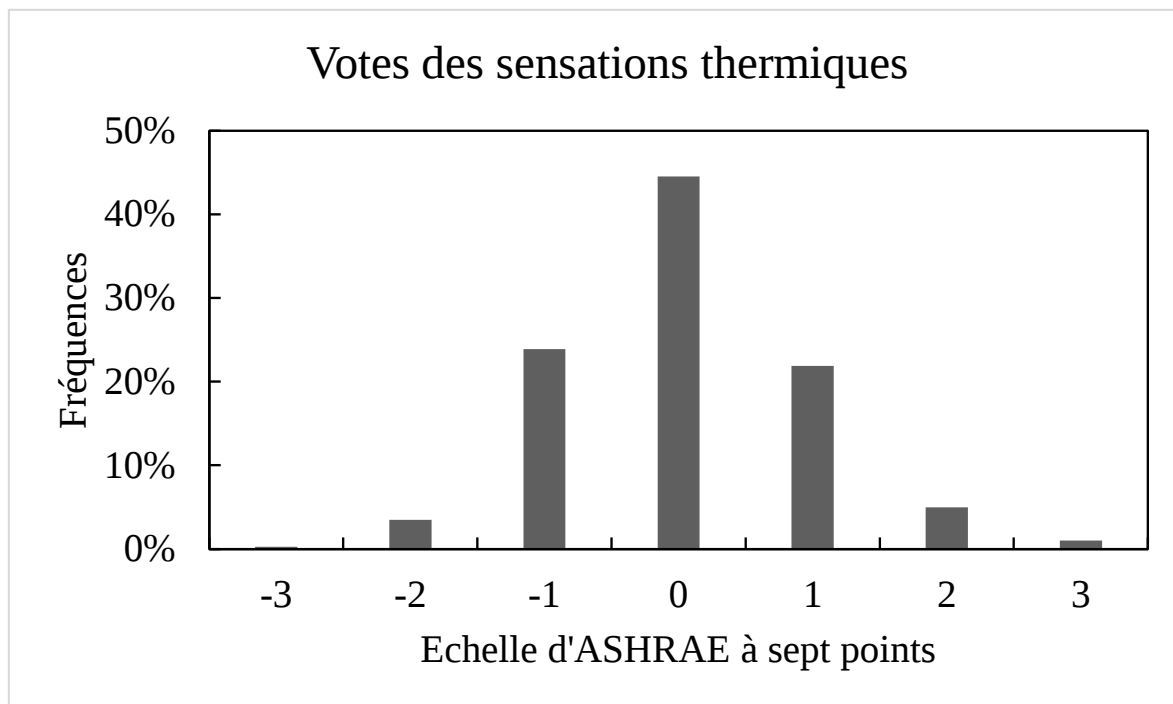


Figure III-12: Fréquences des jugements de l'enquête

La Figure III-13 présente les besoins d'amélioration de l'ambiance en termes de confort thermique. Plus de la moitié de l'échantillon souhaite ne pas changer les conditions thermiques de leur ambiance. Par contre l'inconfort chaud des locaux, induit un besoin de plus de refroidissement pour être dans le confort et se sentir mieux.

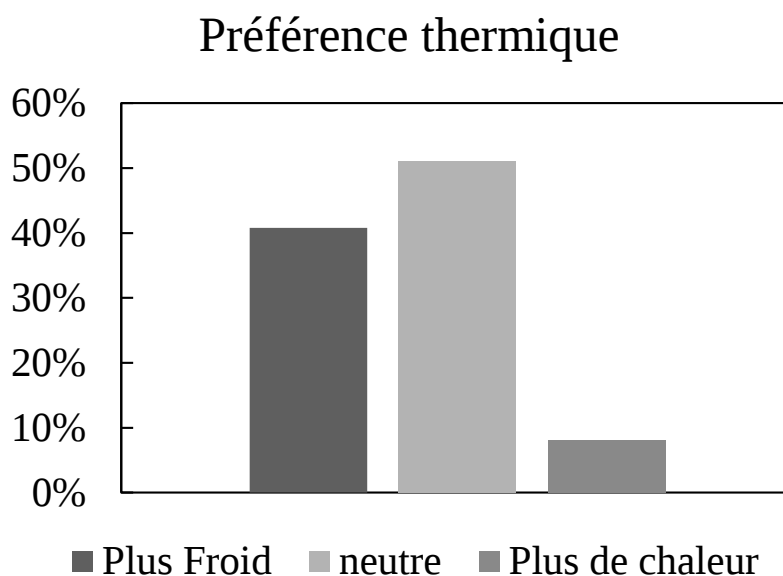


Figure III-13: Souhaits de changement des conditions thermiques de l'ambiance par les votants

III-5. Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire les différents bâtiments pilotes réalisés sur les sites expérimentaux de l'Institut 2iE, ainsi que les méthodes expérimentales utilisées. Les appareils de mesure et les enquêtes ont été également présentés et les modes opératoires expliqués. Toutes les données récoltées feront l'objet d'une étude approfondie afin de comparer les ressentis thermiques des occupants dans les différents types de bâtiments avec les méthodes de prédiction ou d'évaluation du confort thermique en climat chaud afin de proposer une méthode d'évaluation de confort thermique adaptée à notre contexte.

CHAPITRE IV. Modèle d'évaluation du confort intérieur des bâtiments

IV-1. Introduction

L'inconfort thermique est un problème crucial pour les habitants de logements occidentalisés et souvent inadaptés aux conditions climatiques de plus en plus sévères notamment au Burkina Faso. L'état de l'art a permis de faire une revue documentaire sur le confort thermique qui peut être défini de diverses façons par plusieurs méthodes mises en place par des chercheurs à travers des indices dits de confort issus de deux approches complémentaires qui sont les méthodes analytiques et empiriques.

En principe, l'homme a une grande capacité d'adaptation à divers milieux, mais nous réduisons cette capacité en vivant tous dans les mêmes conditions climatiques à travers certains matériaux de construction et des modes de vie qui nous viennent de l'Occident, contraignant ainsi la plupart des individus à rechercher une bande de plus en plus étroite de conditions climatiques. La recherche de confort thermique nous amène à trouver des zones de confort propres à chaque région afin d'adapter nos bâtiments et nos modes de vie à ces zones de confort. C'est ce travail qui est réalisé dans l'étude qui suit. Cette section a été validée à travers une publication scientifique (*en Annexes B*). L'idée à la base de cette étude est de définir ces zones de confort thermique et de les utiliser pour avoir le confort thermique dans divers types de locaux d'habitation et de climats tropicaux.

IV-2. État de bien être thermique

Le confort thermique est défini comme la condition physiologique exprimant une satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est obtenu lorsque les températures et humidités ambiantes sont maintenues dans des fourchettes étroites, et que l'effort de régulation physiologique est minimisé (ASHRAE, 2009). C'est la situation dans laquelle un individu ne ressent ni froid ni chaud et se retrouve dans la neutralité thermique. La neutralité thermique ou thermoneutralité est une condition dans laquelle l'environnement thermique d'un être vivant homéothermique est tel que sa production de chaleur métabolique ne tend ni à s'accroître par effet du froid ni à se réduire par effet de la chaleur. La plage de température pour laquelle ce maximum de confort se produit, est appelée la zone de neutralité thermique. En physiologie, l'homme est à neutralité thermique quand son organisme ne lutte ni contre le froid ni contre le chaud. En saison chaude par exemple, la température monte parfois jusqu'à 40 °C et même plus à Ouagadougou. On est ainsi loin de la neutralité thermique et tout organisme lutte pour se refroidir afin de maintenir la température corporelle autour de 37 °C. Cet état correspond à une situation de stress maximum pour le corps en lutte pour se refroidir. Le confort thermique ainsi

décrit est gouverné par l'équation algébrique du bilan thermique du corps humain (Eq. IV-1). La sensation thermique est influencée par quatre facteurs environnementaux mesurables qui sont : la température de l'air, la température radiante, la vitesse du vent et l'humidité relative. Elle dépend aussi de deux facteurs personnels calculables que sont: l'activité de l'individu et son habillement (DE DEAR and BRAGER, 2002). L'Eq. IV-1 indique que pour une personne isolée dans un environnement donné les échanges et le bilan des échanges de chaleur conduisent à un gain ou une perte calorifique ΔS tel que :

$$M + R + C_v + C_d + E = \Delta S \quad \text{Eq. IV-1}$$

M est le métabolisme en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,

R représente le rayonnement en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,

C_v est la convection en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,

C_d est la conduction en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,

E est l'évaporation en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

ΔS est la chaleur stockée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Le modèle de transfert thermique le plus utilisé est le modèle à deux nœuds de (GAGGE, A.P; et al., 1972). Celui-ci traite des transferts de chaleur entre le noyau central du corps et la peau, puis de la peau vers l'environnement extérieur comme le montre la Figure IV-1. Le modèle à deux nœuds dépend étroitement des six paramètres du confort thermique définis ci-dessus à savoir : la température de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la température radiante, le métabolisme et la résistance thermique de l'habillement. Ces deux derniers paramètres sont définis ci-dessous.

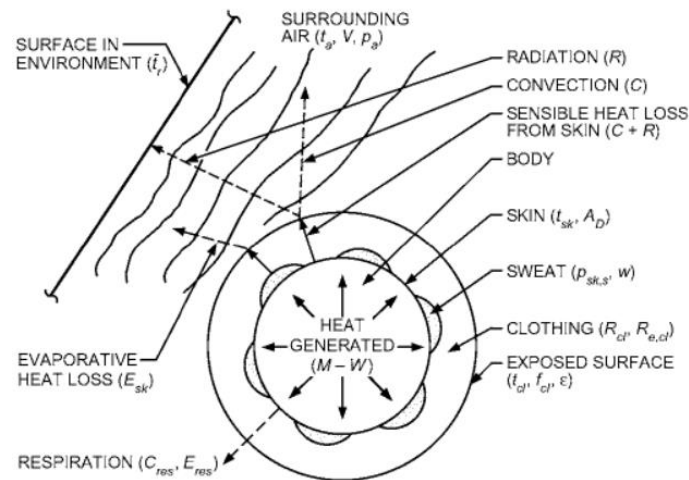


Figure IV-1: Échanges thermiques entre le corps et le milieu extérieur (ASHRAE, 2013; DJONGYANG et al., 2010)

IV-2.1. Le métabolisme

Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques qui se passent dans l'organisme et plus précisément dans les cellules du corps humain. Celui-ci est un système clos et en équilibre avec son environnement (SOMMET, 2013). Le métabolisme dont il est question ici est donné pour une personne de taille moyenne de 1,70 m et la masse corporelle moyen de 70 kg. Le métabolisme mesure la dépense énergétique d'un tel individu en watts. L'unité de base du métabolisme est le Met qui exprime la puissance totale moyenne dépensée par un individu pendant une activité et par unité de surface corporelle de l'individu. (ASHRAE Standard 55-2017) en donne un abaque complet. Le Tableau IV-1 ci-dessous présente des valeurs de métabolisme pour quelques types d'activité. La surface corporelle moyenne d'un individu peut être obtenue en fonction de sa masse et de sa taille par la relation de Du Bois ci-après.

$$A_D = 0,202 M_c^{0,425} \cdot h^{0,725} \quad \text{Eq. IV-2}$$

M_c est la masse corporelle d'une personne moyenne en kg
 h représente la taille en m.

On en déduit les valeurs du métabolisme telles que celles données par le tableau suivant.

Tableau IV-1 : Métabolisme en fonction de l'activité (AULICIEMS et al., 1997).

Activité	M (W)	M (W/m²)	Met
Sommeil	70	40	0,7
Coucher (au lit)	80	46	0,8
Assis au repos	100	58	1
Debout travail léger	120	70	1,2

IV-2.2. Résistance thermique de l'habillement

Le Clo est défini comme l'unité de résistance thermique d'un habillement moyen qui couvrirait tout le corps et dont la conductance serait de $6,45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Il est défini par Eq. IV-3.

Pour un ensemble de vêtements portés, plusieurs formules de calcul de la résistance équivalente existent (JIAO et al., 2017).

$$I_{cl} = \frac{1}{U} = 1 \text{ clo} = 0,155 \text{ K} \cdot \text{m}^2 \text{W}^{-1} \quad \text{Eq. IV-3}$$

U est le coefficient global d'échange thermique de $6,45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

Le Tableau IV-2 donne la résistance thermique de quelques habillements parmi les plus couramment utilisés selon (ASHRAE Standard 55-2017).

Tableau IV-2 : Résistance thermique de l'habillement

Clothing Description	Garments Included ^a	I_{cl}, clo
Trousers	(1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	(2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	(3) #2 plus suit jacket	0.96
	(4) #2 plus suit jacket, vest, t-shirt	1.14
	(5) #2 plus long-sleeve sweater, t-shirt	1.01
	(6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
Skirts/dresses	(7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	(8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	(9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	(10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	(11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
Shorts	(12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
Overalls/coveralls	(13) Long-sleeve coveralls, t-shirt	0.72
	(14) Overalls, long-sleeve shirt, t-shirt	0.89
	(15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
Athletic	(16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
Sleepwear	(17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

L'organisme humain est représenté comme un noyau central qui produit de la chaleur. La température d'une personne bien portante est variable entre 36°C et $37,5^{\circ}\text{C}$. La peau sert d'enveloppe isolante et échange de la chaleur avec l'environnement extérieur.

La thermorégulation est l'ensemble des processus qui permettent à l'individu de maintenir sa température interne constante. Quand l'apport de chaleur est élevé par rapport à la perte de chaleur, la température corporelle a tendance à augmenter. Quand les pertes de chaleur sont fortes, la température du corps a tendance à baisser.

La température de l'enveloppe peut varier de façon importante d'une amplitude allant de 20°C à 40°C sans conséquence néfaste pour l'organisme, mais il y'a des seuils à ne pas dépasser. La sensibilité thermique comprend deux extrêmes à savoir : la sensibilité au froid et au chaud. La

sensation qui s'accompagne de changement de la température intérieure dépend de la température cutanée, de la vitesse de changement de température et de la surface. Le Tableau IV-3 présente les limites de température du corps et de sa peau.

Tableau IV-3: Seuils de température du corps humain (AULICIEMS et al., 1997)

Température		Conséquences
Peau	Intérieur	
45°C (seuil de douleur)	42°C	Mort
	40°C	Hyperthermie
31 à 34 °C	37°C	Confort thermique
10°C (seuil de douleur)	35°C	Hypothermie
	25°C	Mort

IV-3. Les paramètres des modèles de confort

Pour définir une zone de confort thermique d'une région, plusieurs paramètres climatiques de la localité sont nécessaires. Ces paramètres sont définis dans ce qui suit :

IV-3.1. La température moyenne mensuelle T_m

La température moyenne T_m du mois est la valeur moyenne des températures maximales journalières du mois et des températures minimales journalières du mois. Elle est obtenue suivant l'Eq.IV-4.

$$T_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad \text{Eq. IV-4}$$

T_m est la température moyenne mensuelle extérieure en °C

$T_{\min}$ est la température minimale moyenne du mois en °C

$T_{\max}$ est la température maximale moyenne du mois en °C

IV-3.2. Température de neutralité T_n

La température de neutralité, T_n , est obtenue en exploitant les données mesurées sur une longue période. Dans notre cas, ce sont les données de l'année type obtenue à partir de la moyenne des données annuelles de 2007 à 2017. Elle est obtenue à partir de la température moyenne T_m de ces 11 années et à partir de l'Eq. IV-5 (DE DEAR and BRAGER, 2002).

$$T_n = 17,8 + 0,31 * T_m \quad \text{Eq. IV-5}$$

T_n est la température de neutralité en °C

T_m est la température moyenne mensuelle en °C

IV-3.3. Température opérative T_o

La température opérative est un indicateur simple du confort thermique qui prend en compte l'effet de la convection et du rayonnement sur le corps. Elle ignore l'humidité et la vitesse du vent. Elle peut être définie comme la moyenne des températures dues au rayonnement des parois et de l'air ambiant, pondérée par leurs coefficients de transfert de chaleur respectifs (ASHRAE, 2009). À la base, elle est définie comme la température d'une enceinte isotherme noire uniforme dans laquelle l'homme échangerait de la chaleur par rayonnement et convection au même rythme que dans un environnement non uniforme réel (ANSI/ASHRAE Standard 55-2013). Elle remplace souvent la température ambiante t_a dans certaines formules ou diagrammes quand on veut prendre en compte l'effet de la radiation comme apport complémentaire à la convection. La température opérative est un indice qui tente de combiner des effets de l'air et des températures radiantes sur le confort. Dans les bâtiments à faible inertie thermique, la température opérative est parfois considérée simplement comme la température de l'air (KHODAKARAMI, 2009). Pour voir l'effet de T_o dans un phénomène donné, il faut s'assurer que les autres paramètres du confort thermique restent constants à savoir la vitesse de l'air V_a , l'humidité relative HR , le métabolisme Met et la résistance de l'habillement Clo . La température opérative est donnée par :

$$T_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c} \quad \text{Eq. IV-6}$$

Dans cette équation

T_o est la température opérative en °C

h_r est le coefficient de transfert radiatif en $W \cdot m^{-2} K^{-1}$

h_c est le coefficient de transfert convectif en $W \cdot m^{-2} K^{-1}$

t_a est la température ambiante en °C

$\bar{t}_r$ est Température moyenne radiante en °C

La température opérative d'une enceinte donnée n'est rien d'autre qu'une température équivalente de l'ambiance de cette enceinte, obtenue en ne considérant que le rayonnement et la convection.

IV-3.4. La température effective ET

La température effective est également un indicateur du confort thermique au même titre que la température opérative. Contrairement à la température opérative, elle prend en compte l'humidité relative dans la caractérisation de la sensation thermique ressentie par les individus. La température effective est la température d'une atmosphère saturée et immobile sans radiation qui produirait la même sensation thermique que le milieu étudié. Par correction et pour tenir compte de l'humidité relative, on obtient la relation ci-dessous, Eq. IV-7.

$$ET = t_a - 0,4 \cdot (t_a - 10) \cdot \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \quad \text{Eq. IV-7}$$

Dans cette équation

ET représente la température effective en °C

t_a est la température ambiante en °C

HR est l'humidité relative en %

ET est la température effective en °C, t_a est la température ambiante en °C, HR est l'humidité relative en %. On remarque que si $t_a = 10^\circ\text{C}$, $ET = t_a$; si $HR = 100\%$, $ET = t_a$. La Figure IV-2 présente les lignes d'égale sensation thermique ET réalisées sur le diagramme de l'air humide. Quelques auteurs ont remarqué que la température effective surestime l'effet de l'humidité (HOLM and ENGELBRECHT, 2005). Cependant, la température effective est restée longtemps la température de référence pour caractériser le confort thermique. Elle a été par la suite complétée par la nouvelle température effective ET^* et la température effective standard TES , qui sont les plus utilisées de nos jours. Par la suite, nous allons définir et utiliser uniquement la nouvelle température effective ET^* .

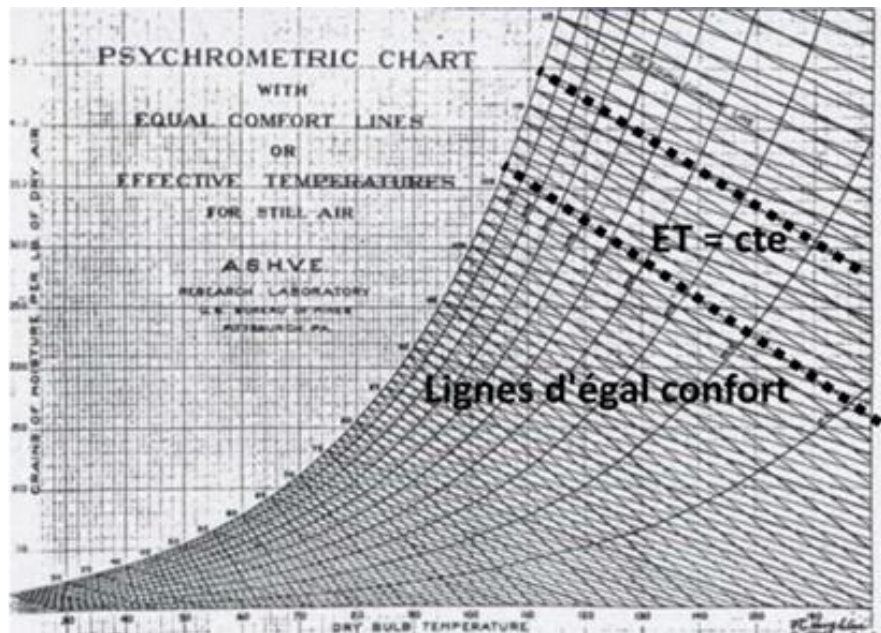


Figure IV-2 : Courbes égales sensations thermiques effectives ET (AULICIEMS et al., 1997).

IV-3.5. La nouvelle température effective ET^*

Comme indiqué plus haut c'est l'indice le plus approprié pour la description du confort thermique dans l'habitat. Il sera donc adopté pour la définition du confort dans la suite de nos travaux. La nouvelle température effective a été développée à partir du modèle à deux-nœuds cité plus haut et établis par RHOLES et al. (ROHLES et al., 1975) suivant l'Eq. IV-1. La température ET^* est définie comme la température d'une enceinte uniforme, d'air immobile à 50 % d'humidité relative qui produirait le même échange de chaleur par radiation, convection et évaporation que l'environnement en question. Les hypothèses pour la nouvelle température effective sont : Humidité relative $HR = 50\%$; Vitesse de l'air $V < 0,2 \text{ m/s}$; Résistance de l'habillement $Clo = 0,6$; Métabolisme $Met = 1$ (ASHRAE, 2009).

Les isothermes ET^* représentées sous forme de série de droite sur le diagramme psychrométrique sont des droites matérialisant la même sensation thermique ressentie par un individu. Pour faciliter leurs représentations sur le diagramme, SZOKOLAY (1997) propose une méthode simplifiée pour tracer les droites ET^* à partir de l'Eq. IV-8 à l'Eq. IV-11 (AULICIEMS et al., 1997).

$$\frac{x}{y} = 0,023 \cdot (t_a - 14)$$

Eq. IV-8

$$t_B = t_a + 0,023 \cdot (t_a - 14) \cdot HA \quad \text{Eq. IV-9}$$

$$HA = \left(\frac{d \cdot HR \cdot P_s}{P_a - HR \times P_s} \right) \quad \text{Eq. IV-10}$$

$$P_s = \exp \left(\frac{A - B}{t_a - C} \right) \quad \text{Eq. IV-11}$$

$\frac{x}{y}$ Est la pente des droites ET^*

T_B est l'intersection de la droite ET^* et l'axe des températures en °C

HA est l'humidité absolue en kg d'eau/kg air sec

HR est l'humidité relative en %

d est la densité de la vapeur d'eau

P_s est la pression de vapeur saturante en Pa

A, B et C sont des constantes

t_a est la température ambiante en °C

Les effets du rayonnement et de la convection sont pris en compte en remplaçant la température ambiante t_a par la température opérative T_o sur l'axe des abscisses du diagramme psychrométrique. Comme expliqué précédemment, la température opérative est un indicateur simple du confort thermique qui prend en compte les effets de la convection et du rayonnement.

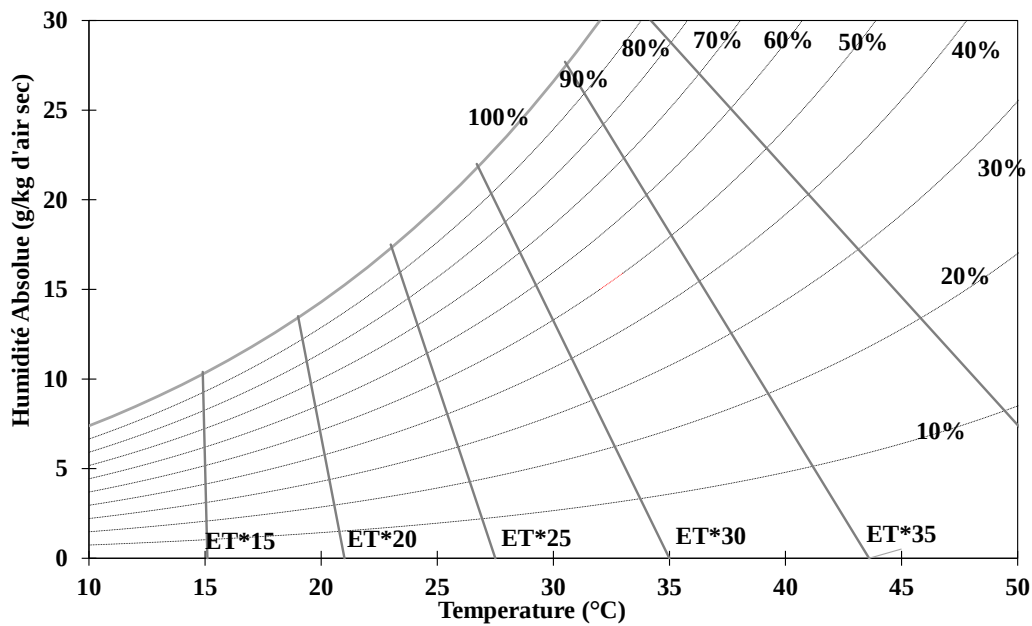


Figure IV-3: Courbes égales sensation ET^* sur le diagramme de Carrier

IV-4. Calculs pratiques des indices de confort

Le confort thermique est gouverné par l'équation algébrique du bilan thermique du corps humain. La sensation thermique est influencée par quatre facteurs environnementaux et deux facteurs personnels cités à la **section 2** (DE DEAR and BRAGER, 2002). Le modèle de transfert thermique le plus utilisé est le modèle à deux-nœuds proposé par Gagge et al. (GAGGE, A.P; et al., 1972). Celui-ci traite des transferts de chaleur entre le noyau central du corps et la peau, puis de la peau vers l'environnement extérieur. Le modèle à deux nœuds dépend étroitement des mécanismes d'échange de chaleur entre un individu et son environnement. Ce modèle et la méthode de confort thermique choisie nous ont amené à nous intéresser de près aux mécanismes d'échange de chaleur par convection et par rayonnement de l'individu avec son environnement. Ces mécanismes sont gouvernés par les deux coefficients d'échanges thermiques h_c par convection et h_r par rayonnement.

IV-4.1. Coefficients d'échange thermique convectif h_c et radiatif h_r autour d'un corps humain

En faisant abstraction de l'humidité de l'air et de la vitesse du vent dans une enceinte uniforme, les échanges de chaleur d'un individu avec son environnement sont régis par deux coefficients

h_c et h_r . Le coefficient convectif h_c a été calculé à partir des nombres adimensionnels de Nusselt, Grashof et Prandtl en convection libre. L'étude du confort thermique des bâtiments en convection libre fait exclusivement appel à la convection naturelle. La vitesse de l'air est faible dans ces bâtiments ($V_a \leq 0,2$ m/s) et conduit aux équations suivantes.

$$N_u = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} \quad \text{Eq. IV-12}$$

$$\lambda_{air} = 0,02624 \left(\frac{t_a}{300} \right)^{0,8646} \quad \text{Eq. IV-13}$$

N_u est le nombre adimensionnel de Nusselt

h_c est le coefficient de transfert de chaleur par convection en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$

λ est la conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$

L est la longueur caractéristique de l'objet de la convection en m

Une personne peut être représentée par un ensemble de formes géométriques telles que les cylindres horizontaux et verticaux pour le tronc et les quatre membres et une sphère pour la tête comme en Figure IV-4 (DE DEAR et al., 1997; KURAZUMI et al., 2008; LI and ITO, 2014; ZHAO et al., 2021).

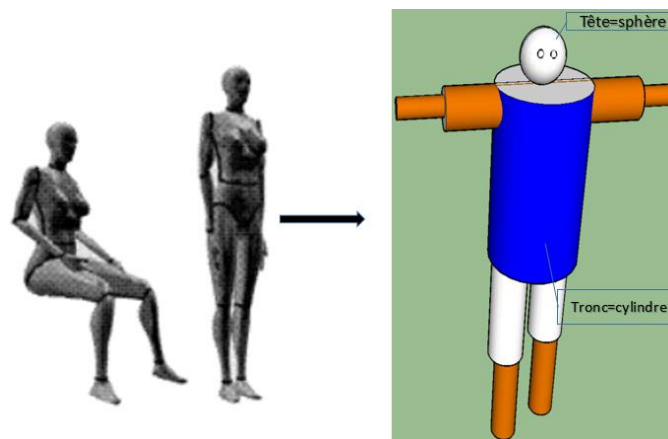


Figure IV-4 : Modèle simplifié du corps humain en convection libre ou forcée

On compte au total six parties ou segments avec leurs caractéristiques géométriques qui forment le corps entier d'un individu comme présenté par le tableau IV-4.

Tableau IV-4 : Segmentation du corps d'un individu moyen R. J. DE DEAR (DE DEAR et al., 1997)

Segments du corps	Forme simple considérée	Diamètre (m)	Surface (m²)
Tête	Sphère	0,21	0,10
Tronc	Cylindre	0,284	0,46
Bras	Cylindre	0,088	0,25
Mains	Cylindre	0,03	0,08
Jambes	Cylindre	0,128	0,50
Pieds	Cylindre	0,032	0,08

Le coefficient convectif global h_{cc} du corps d'un individu est déterminé en pondérant chaque estimation de h_c par sa surface spécifique de segment exprimé en fraction de la surface totale du corps (Eq. IV-14).

$$h_{cc} = \frac{\sum h_i \cdot s_i}{S_c} \quad \text{Eq. IV-14}$$

h_{cc} est le coefficient de convection moyen de tout le corps

h_i est le coefficient de convection partiel d'un élément du corps

S_i est la surface de l'élément considéré du corps

S_c est la surface totale d'un corps

Le nombre de Nusselt en convection naturelle pour un corps cylindrique est déterminé par l'Eq. IV-15 et pour une sphère par l'Eq. IV-16 (BERGMAN and INCROPERA, 2011) (BOETCHER, 2014). R_a est le nombre de Rayleigh qui est le produit des nombres de Grashof Gr et de Prandtl Pr .

$$N_u = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 R_a^{1/6}}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 ; R_a \leq 10^{12} \quad \text{Eq. IV-15}$$

$$N_u = 2 + \frac{0,589 R_a^{1/4}}{\left[1 + (0,469 / P_r)^{9/16}\right]^{4/9}}; \quad R_a \leq 10^{11} \text{ et } P_r \geq 0,7 \quad \text{Eq. IV-16}$$

Nu est le nombre adimensionnel de Nusselt

R_a est le nombre adimensionnel de Rayleigh

P_r est le nombre adimensionnel de Prandtl

Pour un nombre de Prandtl P_r égale à 0,705 et un nombre de Rayleigh R_a égale à $4,87 \times 10^5$, et pour l'air atmosphérique ambiant et une tête assimilée à une sphère de diamètre 0,105 m, on trouve un coefficient de convection de $3,57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$. Le nombre Rayleigh calculé pour les membres est de l'ordre de $9,07 \times 10^8$ et donc inférieur à 10^{12} . À titre indicatif et pour un individu de taille moyenne, 1,7 m et de 70 kg ; on obtient les valeurs données par le tableau ci-dessous.

Tableau IV-5: Les coefficients convectifs en fonction de chaque partie du corps.

Partie du corps	$h_c (\text{W/m}^2 \text{K}^{-1})$
Tronc	2,45
Bras	2,34
Mains	2,37
Jambes	2,30
Pieds	2,33

Le coefficient convectif en convection naturelle obtenue par pondération sur toutes les parties du corps d'un individu moyen vaut $2,44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ en application de l' Eq. IV-14.

Le coefficient de transfert par rayonnement h_r peut être déterminé par la formule suivante (ASHRAE, 2013).

$$h_r = 4\varepsilon_{sk}\sigma \frac{A_r}{A_D} \left(273,2 + \frac{t_{cl} + \bar{t}_r}{2} \right)^3 \quad \text{Eq. IV-17}$$

ε_{sk} est l'émissivité moyenne du vêtement ou de la surface du corps ;

σ est la constante de Stefan-Boltzmann ;

A_r est la surface radiative effective du corps ;

A_D est la surface de Du Bois ou surface totale du corps ;

t_{cl} est la température moyenne à la surface de l'habillement ;

t_r est la température moyenne radiante environnante ;

Un ordre de grandeur de ce coefficient calculé pour $t_r = 37^\circ\text{C}$, $t_{cl} = 34^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{sk} = 0,95$ est de $4,47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

IV-4.2. Indice du confort à long terme

L'indice de confort à long terme évalue le niveau de confort ou d'inconfort thermique ressenti sur une période plus ou moins longue (une année en moyenne) en lieu et place de l'indice instantané. Pour cette étude, nous avons retenu l'indice défini par le nombre de points de mesure enregistrés à l'intérieur de la zone de confort sur le nombre total de points de mesure sur une année. Pour des mesures horaires, le nombre de points obtenu représente tout simplement le temps dans la zone de confort. La relation ci-dessous issue de la norme EN 15 251 et proposée par (CARLUCCI and PAGLIANO, 2012) a été utilisée pour le calcul de l'indice de confort à long terme.

$$IC_{lt} = \frac{\sum_{i=1}^{365} wf_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{365} h_i} \quad \text{Eq. IV-18}$$

IC_{lt} est l'indice de confort à long terme ;

wf_i est le coefficient pondérateur ;

$wf_i = 1$ quand le point de mesure est dans la zone de confort ;

$wf_i = 0$ dans le cas contraire ;

h_i est le temps ;

IV-5. Outil d'évaluation du confort thermique

IV-5.1. Modèle adaptatif de confort

La sensation thermique, la satisfaction et l'acceptabilité des ambiances sont toutes influencées par la correspondance entre les attentes relatives au climat intérieur dans un contexte particulier et ce qui existe réellement (DE DEAR and BRAGER, 2002). Des enquêtes sur le terrain ont été menées (DE DEAR and BRAGER, 2002; MCCARTNEY, J.NICOL, 2002; NICOL and HUMPHREYS, 2020) permettant de conclure que la relation entre la température de neutralité à l'intérieur d'un bâtiment ventilé naturellement et la température extérieure peut être prédite par une équation linéaire sous la forme de l'Eq. IV-19.

$$T_n = a + b \cdot T_m \quad \text{Eq. IV-19}$$

Les travaux de AULICIEMS et al. (1997) et DE DEAR and BRAGER (2002) pour les bâtiments en évolution libre ont abouti à l'Eq. IV-20.

$$T_n = 17,8 + 0,31 \cdot T_m \quad \text{Eq. IV-20}$$

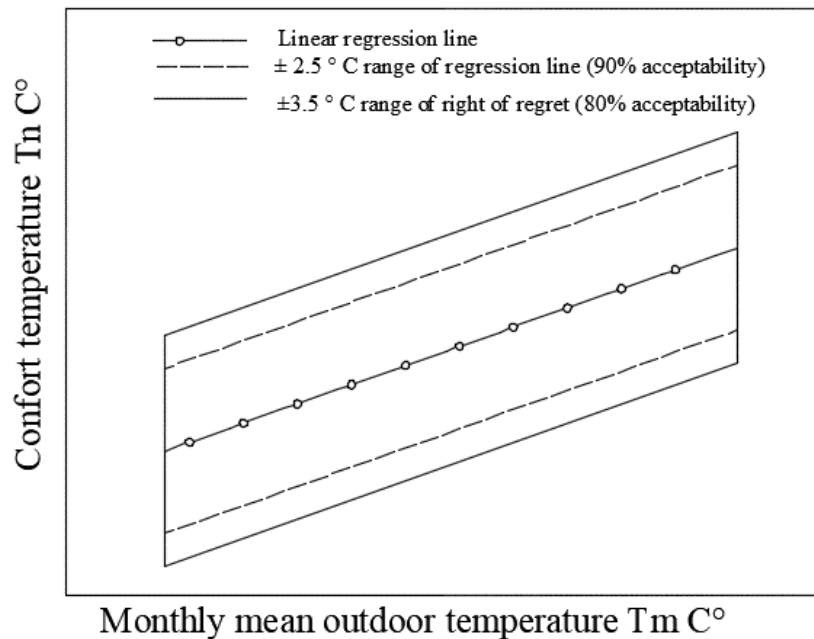


Figure IV-5 : Droite de neutralité thermique (ASHRAE Standard 55, 2013)

Il existe de part et d'autre de la droite ainsi définie à la Figure IV-5, des bandes, dont les limites, sont corrélées à l'Eq. IV-20. Une acceptabilité thermique de 90 % définit une bande de $\pm 2,5^\circ\text{C}$ de part et d'autre de la droite de régression linéaire. Cette plage représente une zone de 90 % d'acceptabilité, soit 10 % d'insatisfaction d'une population donnée. On définit aussi une bande $\pm 3,5^\circ\text{C}$ soit 80 % d'acceptabilité avec 20 % d'insatisfaction. Pour tenir compte d'un grand nombre de personnes dans la zone de confort (ASHRAE Standard 55, 2013) , (NICOL and HUMPHREYS, 2020) préconise de considérer la plage à 80 % d'acceptabilité. Les limites de l'habillement et du métabolisme acceptables pour les zones de confort ainsi établies sont données pour des *Met* compris entre 1,1 et 1,4 et des *Clo* entre 0,7 et 0,9.

IV-5.2. Outil d'aide à la décision du confort thermique

Les limites de la zone de confort sur le diagramme psychrométrique ont beaucoup varié au fil des ans et selon l'évolution des résultats de la recherche. Non seulement, il faut désormais

considérer une zone de confort par période de climat de l'année (chaut, froid, humide et sec), délimitée par les courbes d'égale sensation thermique ET^* , mais il a été aussi retenu que les limites horizontales de ces zones de confort sont égales à 12 g/kgAS pour une pression partielle de vapeur d'eau de 1900 Pa (ASHRAE Standard 55, 2017), et 4 g/kgAS pour une pression partielle de vapeur égale à 650 Pa. Cette dernière limite est controversée, car elle ne constitue pas une limite imposée par le confort thermique. Elle est due à l'inconfort provoqué par l'extrême sécheresse de la peau et des muqueuses quand l'humidité de l'air passe en dessous de 4 g/kgAS. Le confort thermique à proprement parler n'a donc pas de limite inférieure d'humidité de l'air (AULICIEMS et al., 1997; DE DEAR and BRAGER, 2002).

La Figure IV-6 est la représentation de l'outil d'aide à la décision pour le confort thermique des bâtiments en zone climatique chaude et sèche.

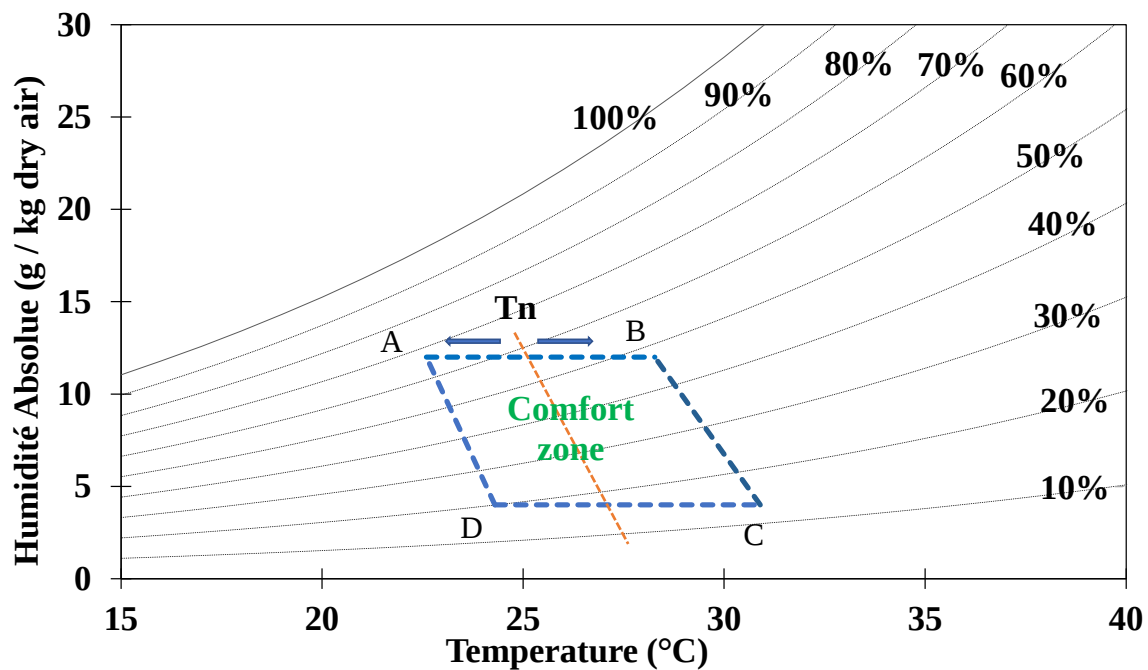


Figure IV-6: Outil d'aide à la décision du confort thermique.

IV-6. Zones de confort des trois régions du Burkina Faso

Cette partie concerne la représentation des zones de confort thermique de nos zones climatiques. Elles sont obtenues à partir de la méthode de (AULICIEMS et al., 1997) appliquée à la **section IV-3 (chapitre IV)**. Les zones de confort à 90 % d'acceptabilité avec une bande de 5°C entre

les lignes d'égale sensation thermique peuvent s'étendre à 80 % d'acceptabilité avec une bande plus large valant 7°C.

IV-6.1. Zone de confort de la région de Dori

La Figure IV-7 est la représentation des zones de confort adaptée à la région de Dori. Nous avons choisi de montrer ces zones pour deux mois seulement (le plus chaud et le plus froid de l'année). La figure présente la zone de confort du mois le plus froid en pointillée bleue qui est le mois de Janvier. Sa température de neutralité est de 25,2°C. Par contre, la zone de confort du mois le plus chaud en traits interrompus rouges représente le mois de Mai avec une température de neutralité de 28,8°C. Les températures moyennes maximales de ces deux mois sont respectivement de 32,3°C et de 41,7°C pour les deux mois. Les températures minimales moyennes sont de 15,5°C et de 29,3°C. Pour la ville de Dori, on observe un écart de température de neutralité élevé avec une valeur de 3,6°C alors que celui des températures maximales moyennes est de 9,5°C. L'écart entre les températures minimales moyennes relevées est de 13,8°C. La variabilité climatique entre les mois extrêmes est très forte.

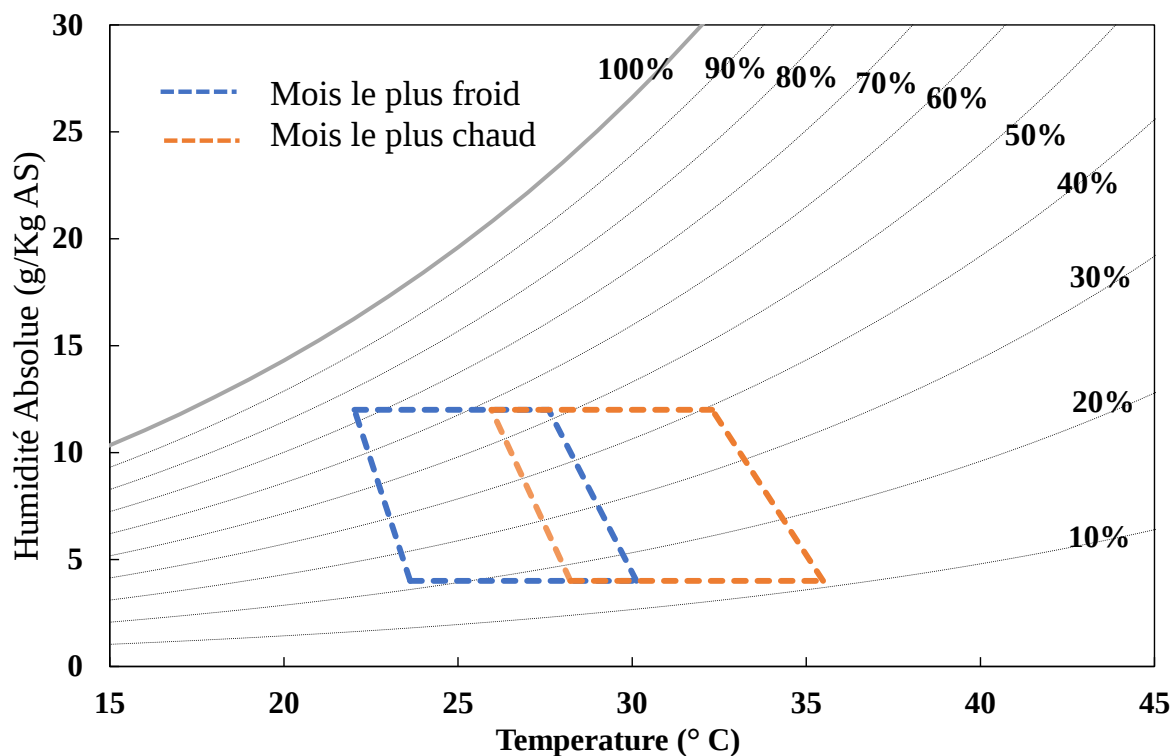


Figure IV-7 : Zone de confort thermique adapté à la ville de Dori

IV-6.2. Zone de confort de la région de Ouagadougou

La Figure IV-8 montre les zones de confort de la région de Ouagadougou pour les mois d'Avril, le mois le plus chaud et de Janvier le mois le plus froid. En Janvier, la température de neutralité est de 25,5°C pour une température maximale moyenne de 33,1°C et en Avril la température de neutralité est de 28,3°C pour une température moyenne maximale de 40,2°C. À Ouagadougou l'écart entre les températures de neutralité est de 2,7°C et donc plus faible que l'écart observé pour Dori. Celui des températures moyennes maximales est de 7,1°C. Ces valeurs montrent une variabilité climatique peu élevée entre les mois de l'année. On notera que la température minimale moyenne (mois de Janvier) est de 16,7°C.

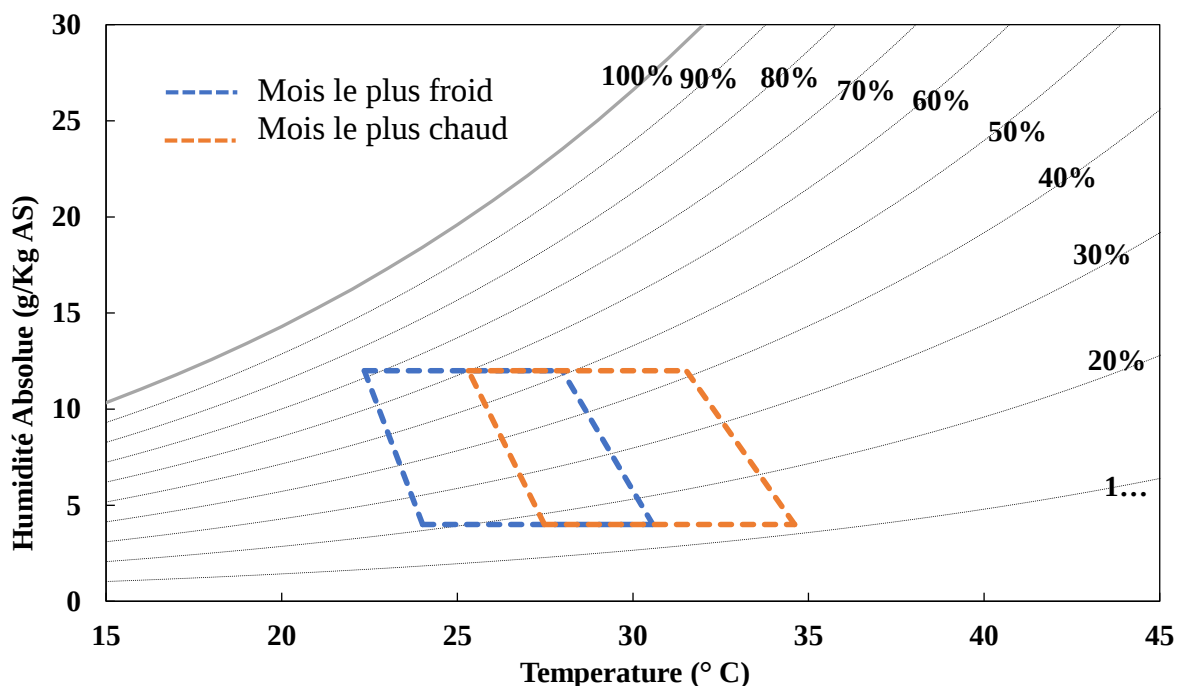


Figure IV-8 : Zone de confort thermique adapté à la ville de Ouagadougou

IV-6.3. Zone de confort de la région de Bobo Dioulasso.

La Figure IV-9 montre la zone de confort de la région de Bobo Dioulasso sur le même diagramme de l'air humide. Les zones de confort sont représentées en considérant le mois le plus chaud et le mois le plus froid de l'année lorsqu'on considère la moyenne de la température maximale et minimale. La zone de confort en traits interrompus de couleur bleue représente la zone de confort du mois d'Août, mois le plus froid présentant la plus faible température de neutralité de l'année qui est de 25,8°C pour une température maximale moyenne de 29,8°C. La

zone représentée par le trapèze rouge est celle du mois de Mars, le mois le plus chaud avec une température de neutralité de 27,6°C et une température maximale moyenne de 37,9°C. L'écart entre les deux températures de neutralités est de 1,8°C alors que celle des températures maximales moyennes est de 8,2°C. La température minimale moyenne enregistrée est de 3,4°C. Cela signifie que dans la région de Bobo Dioulasso, la variation climatique est faible, avec un écart de température de neutralité faible entre les mois extrêmes.

Les zones de confort des mois intermédiaires sont contenues entre celles des mois extrêmes. Il est possible de présenter une zone de confort thermique pour chaque mois de l'année. Nous avons choisi de représenter seulement les mois extrêmes, c'est-à-dire le plus chaud et le plus froid, identifiés à partir des valeurs des températures de neutralité ou les valeurs de températures moyennes mensuelles.

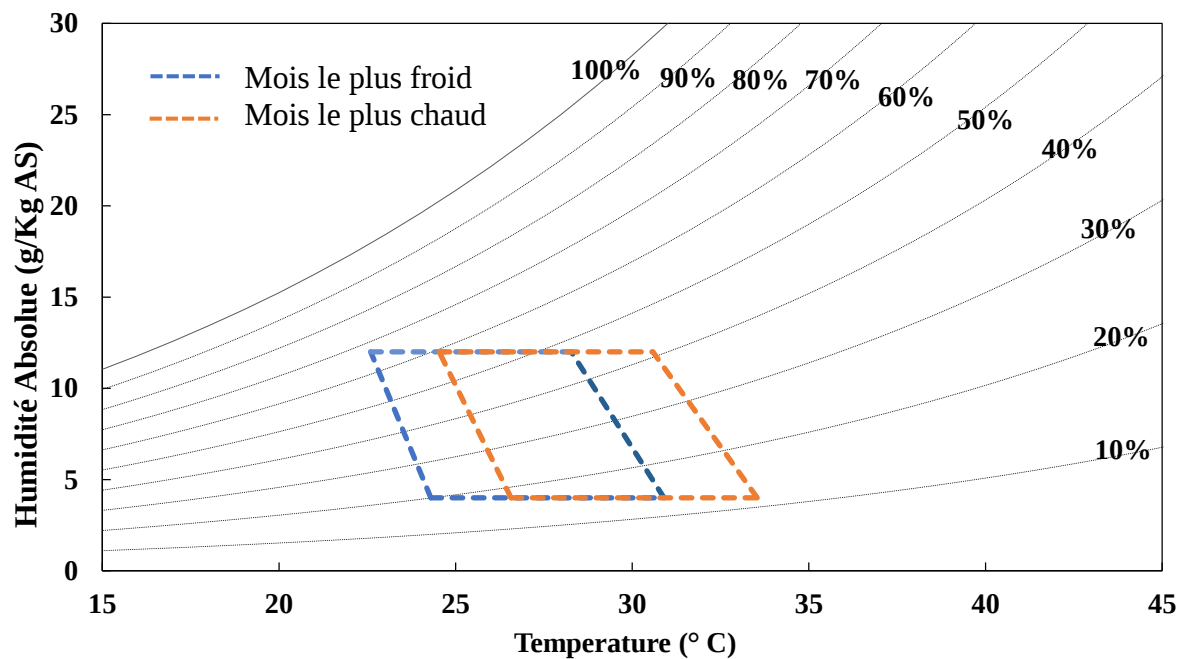


Figure IV-9 : Zone de confort thermique adaptée à la ville de Bobo Dioulasso

La zone de confort d'une localité n'est pas figée. La variation du climat et de ses paramètres entraîne une variation dans l'adaptation des individus tout au long de l'année. Le constat est fait sur les trois figures IV-7, IV-8 et IV-9. Pour fixer les idées, on peut résumer cet état de fait par l'exemple suivant : à Dori on peut être dans le confort à 25°C et 50 % d'humidité en Janvier et être dans l'inconfort froid pour les mêmes valeurs d'humidité et de température en Mai quand il fait chaud. Comme on peut le remarquer, les trois zones de confort thermiques de Dori,

Ouagadougou et Bobo sont relativement différentes. Alors que celle de Dori est large et montre une bande de confort large le long de l'année, celle de Bobo la moins large montre une faible variation ou bande de la zone de confort. Ouagadougou se situe entre les deux.

IV-7. Conclusion

Au terme de cette étude, l'application du modèle adaptatif qui tient compte de l'effet d'adaptation des individus dans leur milieu naturel a permis de mettre en place un modèle de confort thermique. L'outil d'aide à l'évaluation du confort thermique est une combinaison de paramètres climatiques tels que la neutralité thermique, la température opérative à travers les coefficients de transfert thermique humain et la nouvelle température effective. L'ensemble de ces paramètres permet de tracer une zone de confort thermique sur le diagramme psychométrique, adapté aux réalités climatiques locales. La suite des travaux seront focalisés sur la caractérisation des climats extérieurs des trois régions climatiques du Burkina Faso et de la caractérisation du confort des locaux d'habitation.

CHAPITRE V. Mesure des sensations thermiques des ambiances et validation du modèle.

V-1. Introduction

Cette section concerne l'utilisation du nouvel outil d'évaluation du confort thermique dans le bâtiment en zone climatique chaude et sèche. Les données sont :

- Les paramètres climatiques extérieurs de chaque région du Burkina Faso fourni par l'agence nationale de la météorologie.
- Les paramètres climatiques intérieurs ou extérieurs de divers locaux utilisés lors des enquêtes.
- Les paramètres climatiques relevés lors de l'expérimentation sur les deux pilotes.

Les résultats des enquêtes ainsi que les paramètres mesurés sur site sont convenablement traités et utilisés pour évaluer la validité de l'outil conçu.

V-2. Confort extérieur

Nous présentons ci-dessous les points de sensations thermiques (température extérieure et humidité relative extérieure) des trois régions du Burkina Faso à savoir Dori, Ouagadougou et Bobo Dioulasso. Au total, 3130 couples de données (température et humidité) ont été mesurés par les stations météorologiques de la météorologie nationale localisées dans les trois régions. Les représentations graphiques des Figure V-1 (a), Figure V-2 (a) et Figure V-3 (a) montrent chacune un nuage de points présentant l'ambiance réelle du confort extérieur représenté sur le diagramme de Carrier. Le nuage de points rouges représente les points d'inconfort et celui des points bleus représente les points de confort thermique. Les zones de confort thermique sont différentes selon les régions. Elles sont fonction des températures des mois extrêmes enregistrées.

La Figure V-1 (a) présentant la zone de Dori montre une répartition des points comme suit : les températures varient de 12 °C à 45 °C pendant que l'humidité relative varie de 5 à 100 %. Les points obtenus peuvent être regroupés en zones de sensation thermique. En plus de la zone de confort (points bleus), cinq autres zones de sensation thermique sont ainsi définies et représentées sur les figures V-1, V-2, et V-3. La première zone est comprise entre les droites d'égale sensation thermique $ET^* 15$ et $ET^* 22$ et entre les humidités relatives 10 % et 40 % de l'ambiance. Elle peut être vue comme une zone d'inconfort froid et sec. Les zones 2 et 3 toutes deux comprises entre $ET^* 22$ et $ET^* 32$ correspondent respectivement à des zones d'inconfort chaud/humide et chaud/sec. Pour ces deux zones, le facteur déterminant de l'inconfort n'est pas la température, mais l'humidité relative très faible d'un côté (elle va de 5 à 10%) et très forte

de l'autre (50 à 100%). Les deux dernières zones sont situées entre les ET^* 32 et ET^* 37. L'un situé entre les humidités relatives 30 % à 70 % présente une ambiance d'inconfort très chaud et très humide, et l'autre présente une ambiance d'inconfort très chaud et très sec. La zone de confort en bleu donne l'ensemble des points pour lesquels les individus sont censés être dans le confort thermique selon le modèle. Un constat peut être fait sur la dispersion du nuage de points tout autour de la zone de confort de la région de Dori. On constate en effet que la majorité des points est hors de la zone de confort. L'indice de confort thermique calculé selon la règle définie au **Chapitre 4**. IV-2, est de 17,3 %, ce qui est très faible avec un indice d'inconfort qui est de 82,7 % (voir Figure V-1 (b)).

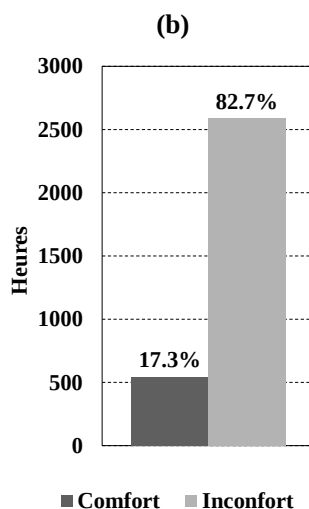
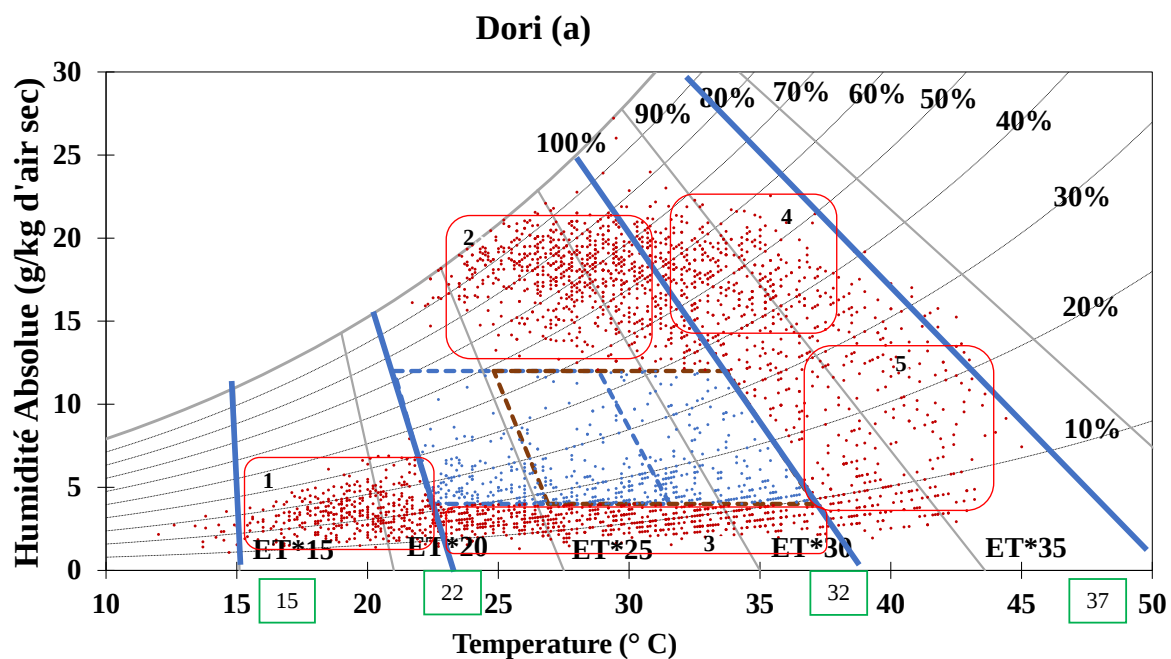
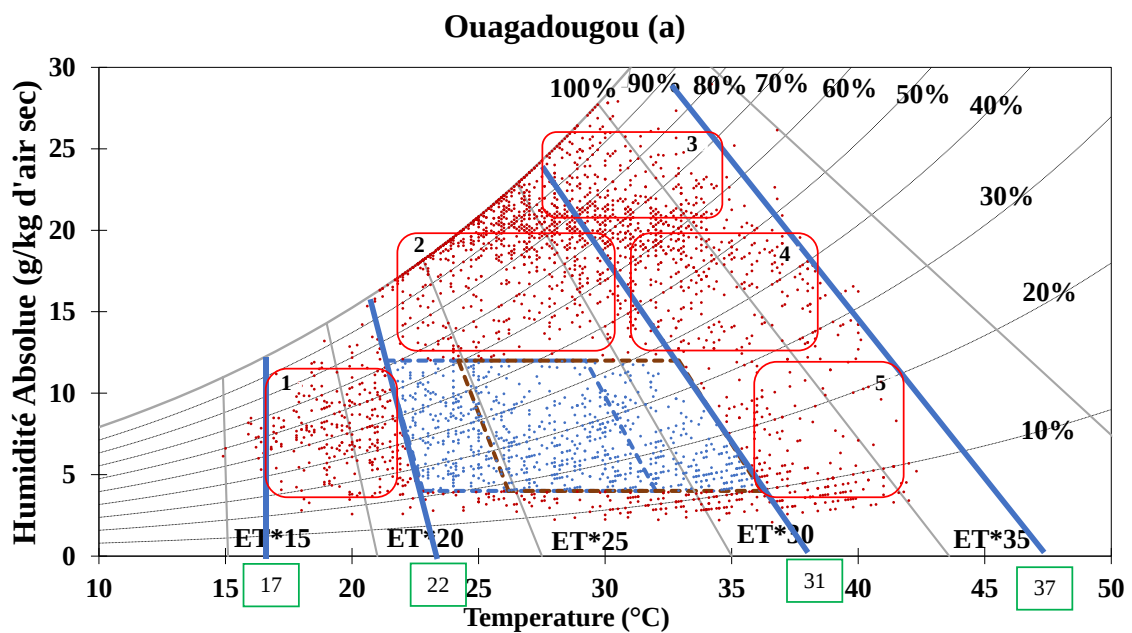


Figure V-1: Courbe d'évaluation de Dori. (a) États climatiques et confort thermique de la région ; (b) Nombre d'heures et indice de confort et d'inconfort de la région.

L'interprétation de ce résultat est que la plupart du temps, sur les dix années de collecte des données, un habitant de Dori acclimaté à cette zone se sentira, malgré tout, dans l'inconfort à 82,7 % du temps. Le degré de l'inconfort ressenti est donné par l'éloignement des points des zones d'inconfort 1, 2, 3, 4 et 5 de la zone de confort. Ce degré n'est pas évalué, par notre modèle. Celui-ci prédit simplement si un point du diagramme correspond à un point de confort ou non.

La Figure V-2 (a) présente les données climatiques de la région de Ouagadougou où les températures varient de 15 °C à 42 °C. On remarque une forte concentration des points à humidité relative élevée.



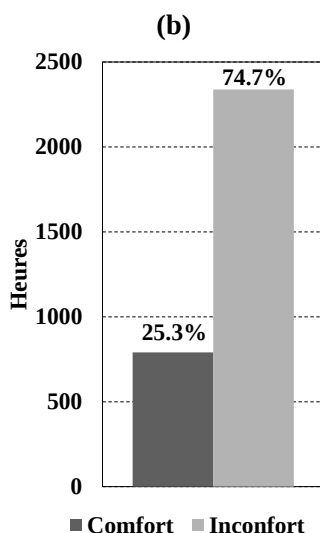


Figure V-2 : Courbe d'évaluation de Ouagadougou (a) États climatiques et confort thermique de la région ; (b) Nombre d'heures et indice de confort et d'inconfort de la région.

Comme pour la région de Dori, cinq zones de sensation thermique peuvent de nouveau être définies. Les données météorologiques montrent que la plupart des points se situent dans l'inconfort moyennement chaud, mais humide (zones 2). Pour cette zone, les températures se situent entre 22 et 30°C avec des humidités relatives variant de 50% à 100%.

Les points d'inconfort très chaud et très humide (zone 4) sont en général les plus inconfortables. Elles correspondent à la situation pour laquelle les individus perdent peu de chaleur, par convection et par évapotranspiration.

La zone 5 correspond à la zone d'inconfort chaud et sec généralement plus supportable que l'inconfort chaud et humide. On constate que l'ensemble des zones 4 et 5 présentent une densité de points inférieure à ce qu'on aurait pu attendre pour une zone sahélienne.

La zone 3 correspond à un climat moyennement chaud et très sec. L'inconfort n'est généralement plus thermique, car les températures sont acceptables. Il provient de l'assèchement des muqueuses des voies respiratoires qui incommode les individus.

Les points tout autour de la zone de confort thermique de la région se regroupent majoritairement au-dessus de la zone de confort avec une forte humidité relative. L'indice de confort thermique est de 25,3 % et l'inconfort est de 74,7 %. La Figure V-3(a) montre les données climatiques de Bobo Dioulasso. On relève une concentration du nuage de points de cette zone entre une température variant de 17 °C à 40 °C avec une humidité relative comprise entre 5 % à 100 %.

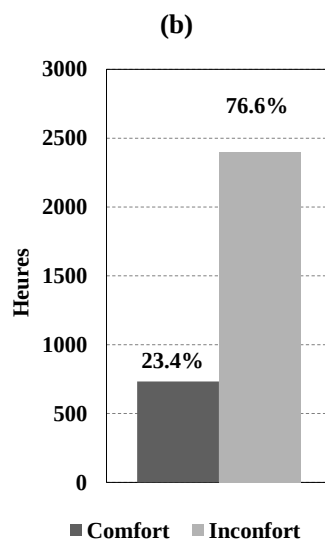
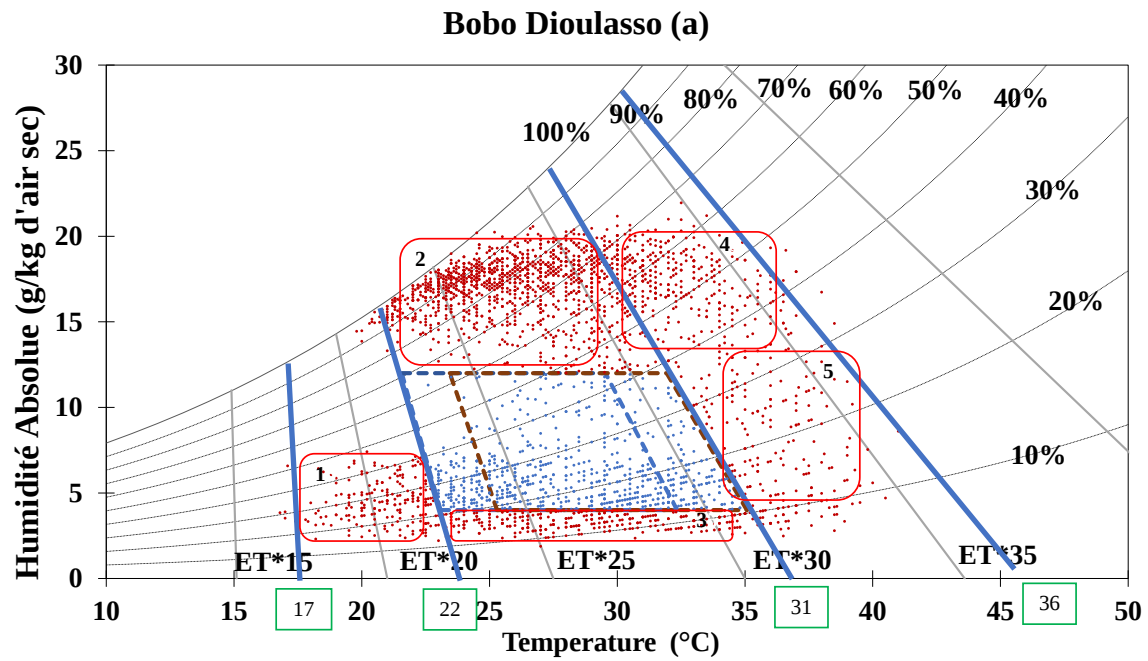


Figure V-3: Courbe d'évaluation de Bobo Dioulasso (a) États climatiques et confort thermique de la région ; (b) Nombre d'heures et indice de confort et d'inconfort de la région.

Comme on pouvait s'y attendre, les cinq zones de sensation thermique de la région de Bobo donnent des points majoritairement concentrés dans la zone chaude et humide (zone 2). C'est l'une des caractéristiques des données météorologiques obtenues des trois régions. Ces données montrent des points du diagramme à forte concentration autour des humidités relatives très basses et très élevées.

Le nuage de points de la région entoure la zone de confort thermique, mais reste proche avec un indice de confort thermique de 23,4 % et un indice d'inconfort de 76,6 %.

On constate que les humidités intermédiaires (entre 20 et 50 %) présentent une faible densité de points pour les trois régions. On en déduit par observation des trois diagrammes que l'inconfort est surtout influencé par l'humidité. Dans les trois régions, elle est le fait d'humidités souvent trop élevées ou trop faibles (voir zones 2, 3 et 4) des figures V-1, V-2, et V-3.

La zone de Dori présente un climat majoritairement inconfortable selon le modèle. Elle présente peu d'heures de confort, soit 17,3 % de l'ensemble des points représentatifs du climat de la région. La ville de Bobo, quant à elle, présente 23,4 % d'heures de confort. La ville de Ouagadougou enregistre 25,3 % d'heures de confort, Figure V-1(b), Figure V-2(b) et Figure V-3 (b).

Les données climatiques extérieures permettent de voir le niveau de confort ressenti sur une année suivant l'éparpillement des points par rapport à la zone de confort. Les trois zones de confort définies permettent de voir qu'il y a peu d'heures de confort thermique extérieur dans les trois zones étudiées. On constate qu'il y a confort thermique pour environ 20 % du temps de l'année en moyenne et pour les trois régions. Des solutions pour ramener les points climatiques dans la zone de confort sont alors nécessaires.

V-3. Confort intérieur

Cette section présente les points de sensation thermique mesurés dans des bâtiments typiques rencontrés au Burkina Faso. Ces bâtiments sont représentés par deux bâtiments pilotes sur le campus de l'institut 2iE à Ouagadougou comme illustré au **Chapitre III**. Pour l'évaluation du confort thermique intérieur, les paramètres d'entrée du modèle sont les températures opératives et les humidités absolues.

Au total, 267 jours ou 6 410 h de mesures ont été enregistrés à partir de chaque bâtiment pilote sur trois périodes : la période chaude, la période humide et la période froide. Chaque heure de mesure est constituée d'un couple de données (température opérative et humidité relative) qui permet de représenter le point correspondant sur le diagramme psychrométrique pour le bâtiment en blocs de terre comprimée et le bâtiment en blocs de ciment représentés sur la Figure V-4 et la Figure V-5. L'ensemble des points représentatifs de l'environnement intérieur des deux bâtiments étudiés est donné par la Figure V-4 (a) et la Figure V-5 (b).

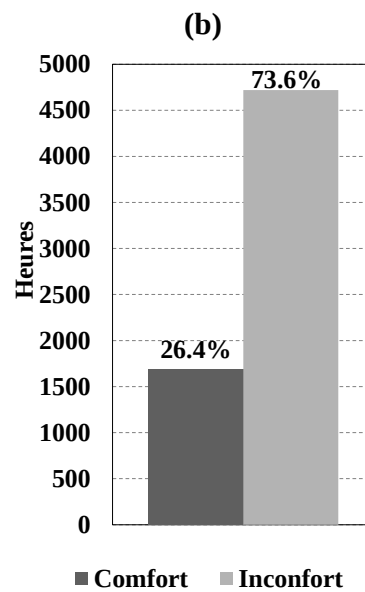
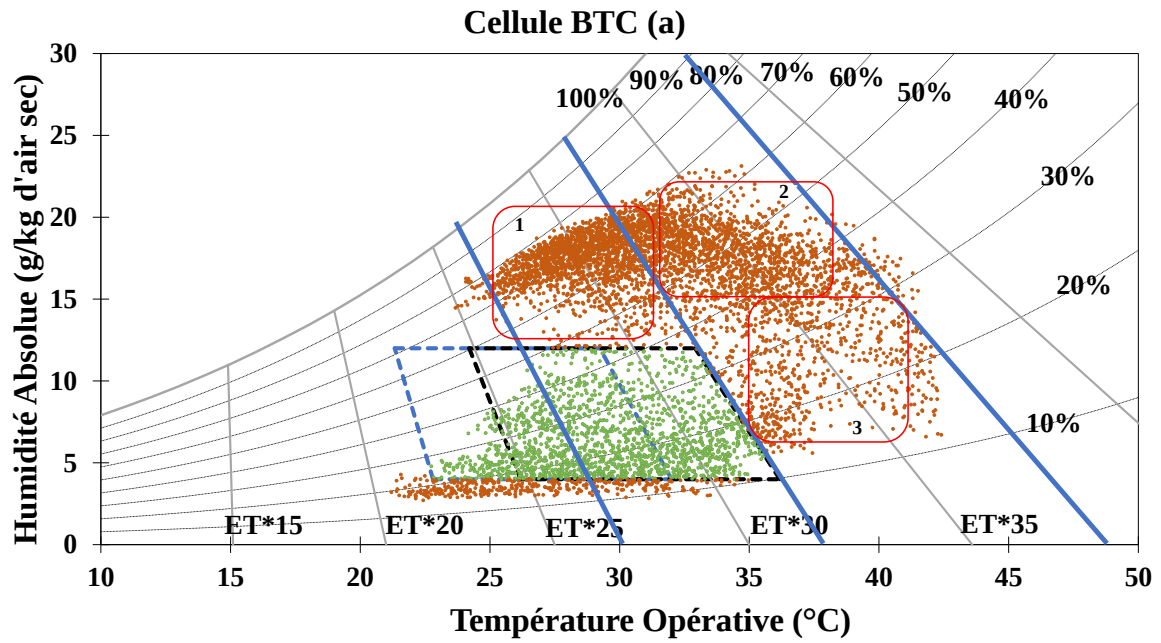


Figure V-4: Courbe d'évaluation du pilote en BTC. (a) Représentation des états hygrothermiques du bâtiment BTC ; (b) Nombre d'heures de confort et d'inconfort du bâtiment en BTC.

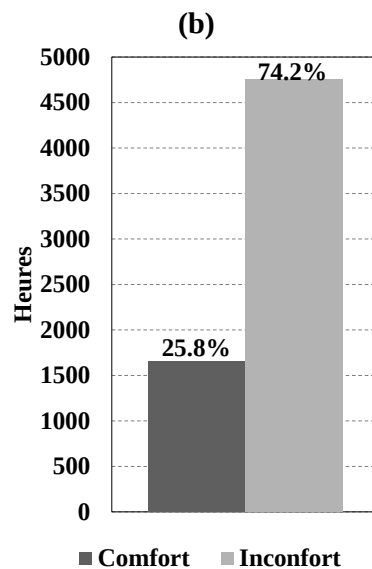
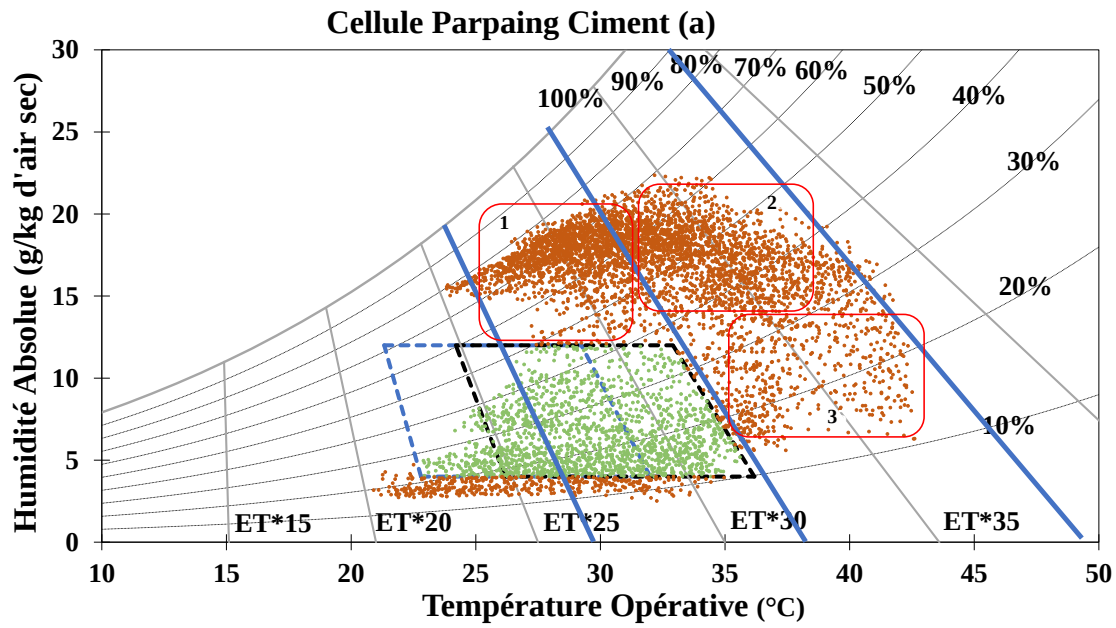


Figure V-5: Courbe d'évaluation du pilote en parpaings de ciment. (a) Représentation des états hygrothermiques du bâtiment en bloc de parpaings de ciment ; (b) Nombre d'heures de confort et d'inconfort du bâtiment en bloc de parpaings de ciment.

Dans cette section, la température opératoire T_o calculée selon les règles établies au **Chapitre IV** est utilisée pour considérer à la fois le rayonnement et la convection pour l'évaluation du confort. Ceci est réalisé en considérant que l'enceinte (intérieur du bâtiment) est naturellement ventilée et qu'une personne placée dans chaque bâtiment perçoit la température opératoire, qui remplace donc la température de l'air sur l'axe horizontal du diagramme.

Le nuage de points rouge représente les points d'inconfort et le nuage de points vert les points de confort thermique. Ces deux états de sensation thermique dépendent de plusieurs paramètres liés au bâtiment et aux occupants. La Figure V-4 (b) et la Figure V-5 (b) donnent les niveaux de sensation thermique définis et calculés par l'indice de confort à long terme. Pour le bâtiment pilote constitué de blocs de terre comprimée, le nombre d'heures de confort est de 1 690 h soit 26,4 % du nombre total d'heures comme le montre la Figure V-4 (b). Pour le bâtiment en parpaings, 1 651 h de confort ont été enregistrées, soit 25,8 % du nombre total d'heures comme on peut le constater sur la Figure V-5 (b).

De cette étude, on peut déduire que l'inconfort est quasiment le même pour les deux bâtiments pilotes. Cependant, le bâtiment en blocs de terre comprimée est légèrement plus confortable que le bâtiment en blocs de ciment. Ceci peut être lié à l'inertie thermique, et donc à l'efficacité thermique, plus élevée des blocs de terre comprimée par rapport à celle du bloc de ciment (HEMA et al., 2021; MOUSSA et al., 2019; NSHIMIYIMANA et al., 2020).

À partir des Figure V-4 et Figure V-5, les effets combinés de la température et de l'humidité relative (*HR*) permettent d'identifier trois zones principales numérotées de 1 à 3 sur les figures, en dehors de la zone de confort. La zone 1 à points chauds et très humides (avec *ET** entre 27 et 32 °C et *HR* entre 60 et 80 %), la zone 2 à points très chauds et humides (avec *ET** entre 32 et 37 °C et une *HR* entre 30 et 60 %) et la zone 3 à points très chauds et secs (avec *ET** entre 32 et 37 °C et une *HR* entre 15 et 30 %). On remarquera par ailleurs que les points les plus éloignés de la zone de confort thermique sont les ambiances très chaudes et sèches qui sont heureusement plus faibles en densité de points sur les deux digrammes.

Comme résultat majeur de cette étude, on peut remarquer que le graphique de la nouvelle température effective est une procédure pratique et simple pour analyser le degré de confort des environnements intérieurs et extérieurs. Ceux-ci peuvent permettre d'évaluer et de comparer les niveaux de confort de différents bâtiments ventilés naturellement à l'aide de modèles adaptatifs. Ils peuvent également permettre d'analyser divers effets architecturaux, divers microclimats et divers matériaux de construction au regard de leurs performances en climatisation passive.

V-4. Validation du modèle par les résultats d'enquête.

Les enquêtes ont consisté à vérifier les réponses de deux types d'occupants en rapport avec leurs environnements thermiques intérieurs ceux qui sont dans l'inconfort et ceux qui ne le sont

pas. Selon l'enquête réalisée dans les bâtiments en évolution libre et présentée au (**III-4.3 Caractéristique de l'échantillon**), 45 % de l'ensemble des votants étaient dans le confort thermique. Ceux dans l'inconfort thermique représentaient 55 % des votants, soit 27 % dans l'inconfort froid et 28 % dans l'inconfort chaud.

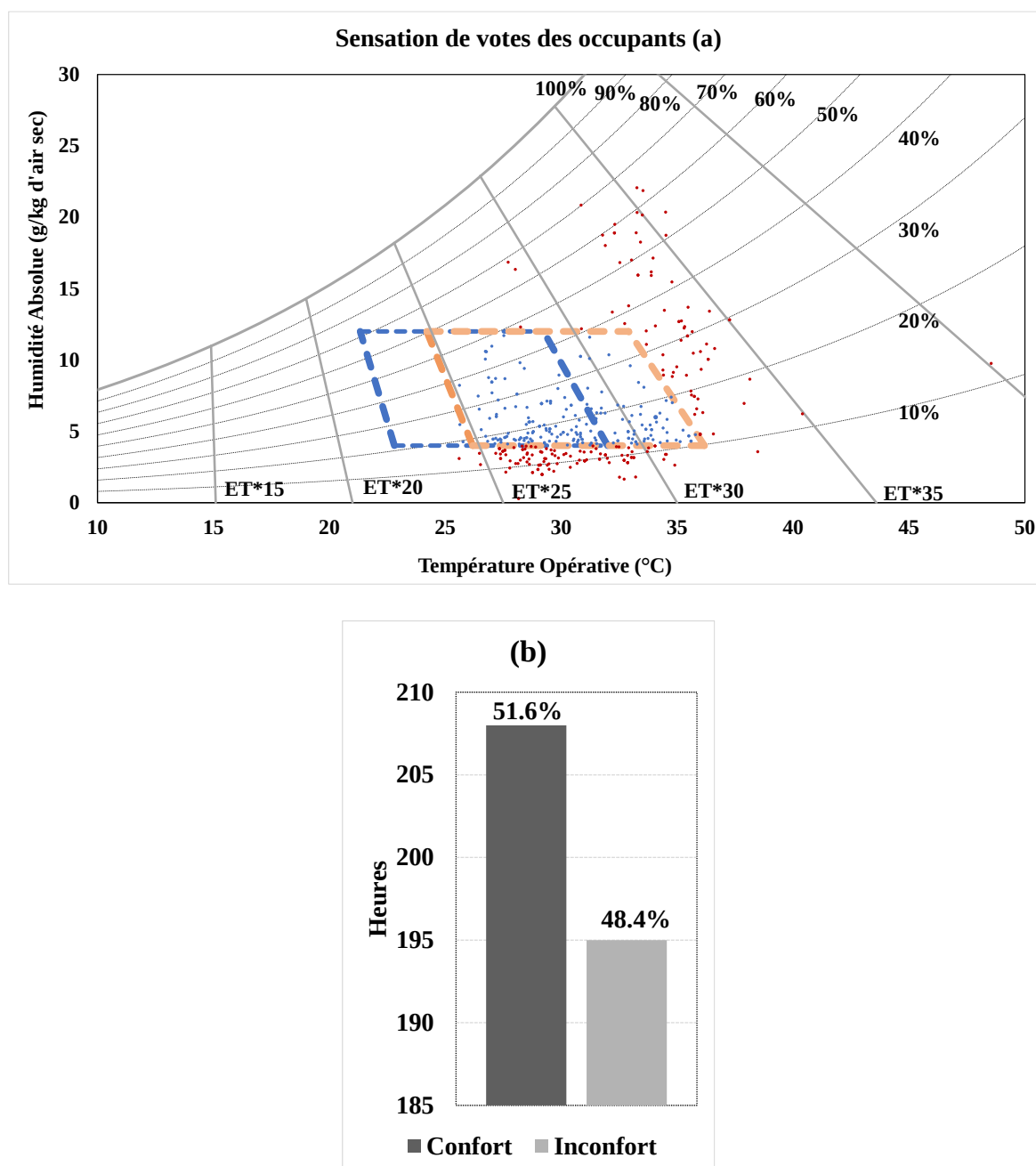


Figure V-6 : (a) Sensation de confort thermique des occupants satisfaits de leur environnement ; (b) Prédiction en pourcentage des votes.

La comparaison de ces résultats avec ceux de l'outil a consisté à placer les points figuratifs des ambiances thermiques des enquêtés sur le diagramme comportant la zone de confort de l'outil

et à faire la comparaison des résultats d'évaluation des confort calculés par l'outil avec ceux obtenus par l'enquête.

L'outil montre que 51,6% de ces personnes seraient effectivement dans le confort thermique et donc 48,4 % de ces personnes seraient effectivement dans l'inconfort. En conclusion, l'outil prévoit 51.6 % de cas de confort thermique là où l'enquête sur site réel donne 45 %. Il prédit le confort ou l'inconfort avec une erreur relative de 13 %.

V-5. Discussion

L'objectif à travers cette étude a été de caractériser le confort thermique des ambiances climatiques extérieures et intérieures des bâtiments en évolution libre dans les climats chauds et secs. L'adaptation de l'occupant à son milieu permet d'élargir sa zone de confort thermique et de prendre en compte plusieurs facteurs tels que l'acclimatation et les considérations subjectives telles que l'adaptation des individus au milieu (DE DEAR et al., 1998; NICOL and HUMPHREYS, 2020). Les concepts tels que la neutralité thermique, la nouvelle température effective et la température opérative ont permis de tracer sur le diagramme de l'air humide, la zone de confort thermique adaptée à chaque région climatique. Cette zone de confort définie regroupe toutes les zones de confort de chaque mois de l'année, et tout point figuratif à l'intérieur de cette zone est un point de confort thermique. Sa limite inférieure reste par contre discutable car elle est imposée par l'extrême sécheresse de la peau et des muqueuses quand l'humidité de l'air passe en dessous de 4 g/kg Air Sec, sa position pourrait alors varier.

L'outil a permis de montrer que les climats des trois régions sont dans l'ensemble très inconfortable sur le plan thermique. Chaque zone du pays et chaque période de l'année est caractérisée par un climat particulier dont la zone de confort est connue et calculable. Les données de l'humidité et de la température permettent ainsi de prévoir le degré de confort et d'inconfort moyen annuel pour chaque région du pays. C'est ce qui a été fait pour Dori, Ouagadougou et Bobo Dioulasso. Pour chacune de ces villes, les résultats obtenus montrent que le confort extérieur y est faible.

Nous avons cependant constaté une anomalie dans les données fournies par la Météorologie Nationale. Ces données sont des moyennes des températures et humidités des régions considérées sur 11 ans. Elles montrent une forte concentration de points dans les zones du diagramme à forte humidité relative et à très faible humidité relative au détriment des valeurs

moyennes. À cause de ces trop fortes et trop faibles humidités en concentration élevée, on constate une anomalie dans les résultats de confort thermique des trois régions. Le meilleur confort thermique est enregistré à Ouagadougou, suivi de Bobo Dioulasso et enfin Dori.

Une enquête faite sur un échantillon des bâtiments en évolution libres de 403 individus a cependant permis de valider partiellement l'outil de simulation du confort thermique. Celui-ci prévoit des ambiances confortables dans 51.6 % des cas là où l'enquête faite sur site donne 45% soit une erreur relative de 13 %.

Pour le climat intérieur, le bâtiment réalisé en blocs de terre comprimée est légèrement plus confortable que celui en parpaings de ciment selon l'indice de confort thermique. La dispersion des nuages de points hors de la zone requise de confort ne permet pas d'estimer la qualité de l'inconfort pour des bâtiments ayant les mêmes indices de confort à long terme, mais d'autres études sur un indicateur d'éloignement pourraient être définies et des techniques d'amélioration du confort thermique pour mieux apprécier l'inconfort et permettre de résoudre ce problème (RINCON et al., 2019b).

Le nouvel outil mis sur pied permet de se faire une idée du confort thermique à travers l'indice confort (CARLUCCI and PAGLIANO, 2012; VISITSAK and HABERL, 2016). Bien que loin de la perfection cet outil constitue cependant un bon départ pour des travaux ultérieurs d'approfondissement et de perfectionnement de la méthode retenue.

Comme perspective, une étude est prévue pour déterminer les conditions d'accroissement du confort thermique par une création de microclimats dans l'habitat à partir des effets architecturaux

V-6. Conclusion

Les données climatiques collectées ont permis de déterminer des paramètres tels que la neutralité thermique en fonction des valeurs moyennes mensuelles maximales et minimales suivant la formule issue de la régression linéaire du modèle adaptatif. Cette étude a permis de caractériser le confort thermique des trois zones climatiques du Burkina Faso. Elle a aussi permis de caractériser le confort thermique de pilotes expérimentaux en simulant les conditions climatiques rencontrées dans l'habitat à faible coût du Burkina Faso. Le modèle de confort retenu a été celui du confort adaptatif qui tient compte de l'effet d'adaptation des individus dans leur milieu naturel. Malgré cette prise en compte de l'adaptation des individus aux milieux, le modèle indique un très fort inconfort annuel donné par l'indice de confort à long terme. Cet

indice moyen annuel des inconforts des trois régions étudiées est de 82,7 % pour Dori, 74,7 % pour Ouagadougou et 76,6 % pour Bobo Dioulasso. Le même indice a été évalué pour deux cellules pilotes symbolisant l'habitat à faible coût rencontré en majorité dans le pays. Ceux-ci présentent un niveau d'inconfort annuel presque identique de 73,9 % pour le bâtiment en bloc de terre comprimée et 74,4 % pour celui en parpaings alvéolés de ciment.

.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette thèse a été de proposer une méthode permettant d'évaluer le confort thermique intérieur ou extérieur des bâtiments en s'appuyant sur des paramètres climatiques.

Les travaux qui ont porté sur le confort thermique dans le bâtiment dans un contexte africain ont permis de dégager des conclusions majeures et d'ouvrir des voies à des perspectives et champs d'applications futurs.

Les paramètres climatiques extérieurs ont permis d'avoir une idée sur les variations climatiques des principales régions climatiques du Burkina Faso. L'analyse des résultats montre une tendance des températures journalières variant de 27 à 34 °C dans la région de Dori, avec une fréquence de plus de 62 %. Les températures journalières dans la région de Ouagadougou sont dans l'intervalle de 26 à 31 °C, avec une fréquence de plus de 60 %. Les radiations globales journalières dans cette région, sont dans l'intervalle 4,5 à 6 kWh/m², avec une fréquence de plus de 68 %. En ce qui concerne la région de Bobo Dioulasso, les températures journalières varient de 26 à 30 °C, avec une fréquence de plus de 56 %. Les données météorologiques traitées à l'aide de la méthode adaptative ont permis de déterminer les températures de neutralité des trois régions du Burkina Faso. On retient que les températures de neutralités des mois les plus froids et des mois les plus chauds sont respectivement de 25,2 °C à 28,8 °C ; de 25,5 °C à 28,3 °C et de 25,8 °C à 27,6 °C pour les régions de Dori, Ouagadougou et Bobo Dioulasso.

Dans le même ordre d'idée, l'étude expérimentale de pilotes expérimentaux réalisés au sein de l'institut 2iE a permis de prendre en compte les transferts de chaleur entre l'individu et son environnement régis par les coefficients de transfert de chaleur convectif et radiatif et de déterminer la température opérative. Les résultats montrent que les coefficients de transfert de chaleur d'un occupant valent 2,44 W·m⁻²K⁻¹ pour la convection et 4,47 W·m⁻²K⁻¹ en radiation.

On retient que le confort thermique doit être défini selon chaque contexte climatique. Le modèle de confort retenu a été celui du confort adaptatif qui tient compte de l'effet d'adaptation des individus dans leur milieu naturel. Elle a consisté à définir le tracé d'une zone de confort sur le diagramme psychrométrique. Il convient de noter que cela a nécessité l'adoption de la nouvelle température effective développée à partir du modèle à deux nœuds. Elle permet de matérialiser par des droites d'égale sensation thermique la sensation que peut percevoir un individu dans un environnement hygrothermique donné.

On note à ce niveau que la modélisation de la zone de confort pour chaque région a été possible grâce à la combinaison des paramètres tels que la nouvelle température effective, la température de neutralité thermique, le modèle adaptatif et la température opérative. La zone de confort

thermique dans l'habitat ainsi conçue et positionnée sur le diagramme de l'air humide est réalisée en adoptant un taux d'acceptabilité de 80 %. On remarque que les zones de confort réalisées sont différentes en taille. Un indice de confort a été défini et associé à la zone de confort permettant d'évaluer le niveau de confort et d'inconfort thermique moyen de chaque zone climatique. Cet indice est défini dans nos travaux comme le rapport du nombre d'états hygrothermiques enregistrés à l'intérieur de la zone de confort sur le nombre total d'états enregistrés sur une année. L'indice de confort moyen sur tout le pays est de l'ordre de 20 %.

Les enquêtes sur terrain réalisées uniquement dans la région de Ouagadougou ont permis d'interviewer au total 590 individus sur le confort thermique ressenti dans diverses ambiances. Les résultats des votes ont révélé 43 % des occupants dans le confort et 57 % dans l'inconfort. Les résultats obtenus avec le nouvel outil mis en place sont de 79,8 % pour le confort et 65,4 % pour les occupants en inconfort. L'analyse des résultats d'enquête et des résultats de modélisation a permis de valider le nouvel outil d'évaluation avec une erreur de 13 %.

L'outil ouvre la voie à une caractérisation simple, mais puissante du confort thermique intérieur et extérieur. Les résultats implémentés avec le nouvel outil d'évaluation montrent que la zone de Dori présente un climat majoritairement inconfortable avec un indice de confort de 17,3 % de l'ensemble des points de l'année type. La ville de Ouagadougou quant à elle présente un indice de confort de 25,3 % et la région de Bobo Dioulasso présente un indice de confort thermique de 23,4 %. On retiendra que l'éparpillement des points de sensation thermique sur le diagramme de confort donne peu d'heures de confort thermique extérieur. On note également qu'il y a confort thermique pour environ 20 % du temps de l'année en moyenne. La caractérisation du confort intérieure des bâtiments pilotes permet d'avoir une idée sur le niveau de sensation thermique d'un occupant de ce style d'habitation. Les résultats montrent que les bâtiments en BTC présentent 1690 heures de confort, soit 26,4 % du nombre d'heures total. Pour le bâtiment en parpaings de ciment, 1651 heures de confort ont été enregistrées soit 25,8 % du nombre d'heures total de confort. Le taux d'inconfort est quasiment le même, mais le bâtiment en BTC est légèrement plus confortable que celui en parpaings de ciment. On retient qu'il y a confort thermique pour environ 25 % du temps en moyenne.

De façon globale, on peut dire que les résultats du confort thermique des bâtiments pilotes sont presque identiques aux résultats du confort thermique obtenus à partir des paramètres climatiques extérieurs. Cette situation justifie que les enveloppes des bâtiments ne jouent pas pleinement leur rôle de protection contre l'inconfort extérieur. L'inertie thermique est faible et

l'amortissement des chocs thermiques est inapproprié. C'est pourquoi des mesures doivent être prises pour augmenter le confort intérieur des bâtiments en ramenant les points hors de la zone de confort dans la zone de confort définie, notamment par les mesures passives de construction des bâtiments.

Comme résultat majeur de nos travaux, on peut dire que l'outil d'aide à l'évaluation du confort thermique des bâtiments en climat chaud et sec mis en place a permis de caractériser le confort thermique des trois zones climatiques du Burkina Faso. Il a aussi permis de caractériser le confort thermique de pilotes expérimentaux avec pour objectif de simuler les conditions climatiques rencontrées dans l'habitat à faible coût du Burkina Faso. La prise en compte de l'adaptation des individus donne un très fort taux d'inconfort annuel donné par l'indice de confort à long terme.

Comme perspectives, on peut proposer les études suivantes :

- Étude d'un indicateur d'inconfort prenant en compte l'écart ou l'éloignement des points de mesure avec la zone de confort pour mieux caractériser l'inconfort.
- Étude des stratégies bioclimatiques notamment passives qui conduisent aux meilleures situations de confort thermique
- Étude des niveaux de confort thermique selon les typologies de bâtiment du contexte sahélien.
- Expérimentation pour la validation de l'outil dans les deux autres zones climatiques à savoir Dori et Bobo Dioulasso.

Bibliographie

- ABNORM, 2009. NBF 02-005_2009 BTC Code de Bonnes Pratiques pour la production des BTC_2iE.
- AJIBOLA, K., 2001. Design for comfort in Nigeria — a bioclimatic approach. *Renew. Energy* 23, 57–76. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00113-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00113-0)
- Annuaire statistique, 2017. Ministère de l'Habitat et de l'urbanisme du Burkina faso. [WWW Document]. URL http://www.cns.bf/IMG/pdf/annuaire_statistique_2016.pdf (accessed 2.10.21).
- ASHRAE, 2013. ASHRAE Handbook Fundamental: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- ASHRAE, 2009. ASHRAE handbook: fundamentals (I-P and SI ed.). American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Ga.
- ASHRAE Standard 55, 2017. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- ASHRAE Standard 55, 2013. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- ATTIA, S., CARLUCCI, S., 2015. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy Build.* 102, 117–128.
- AULICIEMS, A., SZOKOLAY, S.V., International PLEA Organisation, University of Queensland, Department of Architecture, 1997. Thermal comfort. PLEA in association with Dept. of Architecture, University of Queensland, Brisbane, Qld.
- BAKAYOKO, I., SERIFOU, M.A., KOUAKOU, C.H., 2019. Étude qualitative des parpaings les plus utilisés dans la construction des bâtiments à Abidjan 11.
- BERGMAN, T.L., INCROPERA, F.P. (Eds.), 2011. Fundamentals of heat and mass transfer, 7th ed. ed. Wiley, Hoboken, NJ.
- BERNARD, P., 2020. Vitrage solaire : produire de l'énergie grâce à vos fenêtres [WWW Document]. URL <https://www.consoglobe.com/vitrage-solaire-energie-cg> (accessed 12.10.21).
- BOETCHER, S.K.S., 2014. Natural Convection Heat Transfer From Horizontal Cylinders, in: *Natural Convection from Circular Cylinders*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–22. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08132-8_2
- BRAMBILLA, A., JUSSELME, T., 2017. Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype. *Energy Build.* 156, 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.070>
- CARLUCCI, S., PAGLIANO, L., 2012. A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy Build.* 53, 194–205.
- COMPAORE, G., 1993. DYNAMIQUE URBAINE ET PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX A OUAGADOUGOU, BURKINA FASO 12.
- DAEMEI, A.B., EGHBALI, S.R., KHOTBEHSARA, E.M., 2019. Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *J. Build. Eng.* 25, 100758. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100758>
- DE DEAR, R.J., 1998. A global database of thermal comfort field experiments. *ASHRAE Trans.* 104, 1141.
- DE DEAR, R.J., ARENS, E., HUI, Z., OGURO, M., 1997. Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. *Int. J. Biometeorol.* 40, 141–156.
- DE DEAR, R.J., BRAGER, G.S., 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy Build.* 34, 549–561.
- DE DEAR, R.J., BRAGER, G.S., REARDON, J., NICOL, F., 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference/discussion. *ASHRAE Trans.* 104, 145.

- DE FREITAS, C.R., GRIGORIEVA, E.A., 2015. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *Int. J. Biometeorol.* 59, 109–120.
- DEVAL, J.-C., 1984. Le confort thermique en climat tempéré. *Rev. Phys. Appliquée* 19, 513–531.
- DJONGYANG, N., TCHINDA, R., NJOMO, D., 2010. Thermal comfort: A review paper. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2626–2640.
- FANGER, P.O., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Therm. Comf. Anal. Appl. Environ. Eng.*
- FANGER, P.O., TOFTUM, J., 2002a. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy Build.* 34, 533–536.
- FANGER, P.O., TOFTUM, J., 2002b. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy Build.* 34, 533–536.
- GAGGE, A.P.; STOLWIJK, J.A.J.; NISHI, YSAUNOBU, 1972. An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response.
- GANA, L., 2014. Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l’habitat en Afrique.
- GIVONI, B., 1998. Climate considerations in building and urban design. John Wiley & Sons.
- GIVONI, B., 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy Build.* 18, 11–23.
- GONZALEZ-LOPEZ, J.R., JUAREZ-ALVARADO, C.A., AYUB-FRANCIS, B., MENDOZA-RANGEL, J.M., 2018. Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Constr. Build. Mater.* 163, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074>
- Habitat Worldmap, 2019. Tour du monde de l’habitat vu par la société civile- Burkina Faso [WWW Document]. URL <https://habitat-worldmap.org/pays/afrique/burkina-faso/> (accessed 6.21.21).
- HEMA, C., MESSAN, A., LAWANE, A., SORO, D., NSHIMIYIMANA, P., VAN MOESEKE, G., 2021. Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: An experimental investigation. *J. Build. Eng.* 38, 102148. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102148>
- HEMA, C., MOESEKE, GEOFFREY, EVRAD, ARNAUD, COURARD, L., MESSAN, A., 2017. Vernacular housing practices in Burkina Faso: representative models of construction in Ouagadougou and walls hygrothermal efficiency.
- HEMA, M.C., 2020. Optimisation des propriétés thermiques des parois dans les habitations en briques de terre comprimée au Burkina Faso.
- HOLM, D., ENGELBRECHT, F.A., 2005. Practical choice of thermal comfort scale and range in naturally ventilated buildings in South Africa. *J. South Afr. Inst. Civ. Eng. J. Van Suid-Afr. Inst. Van Siviele Ingenieurswese* 47, 9–14.
- HOUOT, G., 2018. L’inertie thermique, quèsaco ? | BBS Slama. URL <https://www.bbs-slama.com/linertie-thermique-quesaco/> (accessed 5.31.21).
- HUMPHREYS, M.A., NICOL, J.F., 2002. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy Build.* 34, 667–684.
- IEA, 2022. IEA [WWW Document]. IEA. URL <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cooling> (accessed 5.1.22).
- INDRAGANTI, M., OOKA, R., RIJAL, H.B., BRAGER, G.S., 2014. Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India. *Build. Environ.* 74, 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.002>
- INSD, 2015. Habitat, assainissement et accès à l’eau potable. Institut national de la statistique et de la démographie, Enquête multisectorielle continue (EMC) 2014.

- INSD, 2012. Enquête Démographique et de Santé et à Indicateurs Multiples (EDSBF-MICS IV) 2010. Institut National de la Statistique et de la Démographie.
- INSD_RGPH, 2019. Institut National de la Statistique et de la Démographie _Recensement Général de la Population et de l'Habitat.
- IONA, S., 1982. Albert A. Bartlett. *Phys. Teach.* 20, 298–303.
- ISO Standard 7730, 2006. Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- JIAO, Y., YU, H., WANG, T., AN, Y., YU, Y., 2017. The relationship between thermal environments and clothing insulation for elderly individuals in Shanghai, China. *J. Therm. Biol.* 70, 28–36.
- KABORE, M., 2015. Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne (thesis). Université Grenoble Alpes (ComUE).
- KERE, B., 1995. Architecture et cultures constructives du Burkina Faso.
- KHODAKARAMI, J., 2009. Achieving thermal comfort in Iranian hospitals. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Germany.
- KIKI, G., KOUCHADE, C., HOUNGAN, A., ZANNOU-TCHOKO, S.J., ANDRE, P., 2020. Evaluation of thermal comfort in an office building in the humid tropical climate of Benin. *Build. Environ.* 185, 107277. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107277>
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B., RUBEL, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15, 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- KURAZUMI, Y., TSUCHIKAWA, T., ISHII, J., FUKAGAWA, K., YAMATO, Y., MATSUBARA, N., 2008. Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection. *Build. Environ.* 43, 2142–2153. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.012>
- LAWSON, L., 1991. Evaluation du confort thermique dans l'habitat individuel à Ouagadougou.
- LI, C., ITO, K., 2014. Numerical and experimental estimation of convective heat transfer coefficient of human body under strong forced convective flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 126, 107–117.
- LOPEZ-PEREZ, L.A., FLORES-PRIETO, J.J., RIOS-ROJAS, C., 2019. Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Build. Environ.* 150, 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>
- MARILLIER, F., 2007. Crise énergétique : il n'est pas trop tard pour s'en sortir ! *Nouv. Fond.* 6, 63. <https://doi.org/10.3917/nf.006.0063>
- MCCARTNEY, J., NICOL, 2002. Developing an adaptive control algorithm for Europe.
- MEUKAM, P., 2004. VALORISATION DES BRIQUES DE TERRE STABILISEES EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS.
- MHU, 2017. Annuaire Statistique 2016. Ministère de l'Urbanisme et de l'Habitat, Burkina Faso, Ouagadougou.
- MHU, 2008. Le Programme-Pays Urbain du Burkina Faso (PPUB). Ministère de l'Urbanisme et de l'Habitat, Burkina Faso.
- MILLOGO, Y., AUBERT, J.-E., SERE, A.D., FABBRI, A., MOREL, J.-C., 2016. Earth blocks stabilized by cow-dung. *Mater. Struct.* 49, 4583–4594. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0808-6>
- MILLOGO, Y., MOREL, J.-C., 2012. Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilised adobes. *Mater. Struct.* 45, 1311–1318. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9833-2>
- MOUSSA, S.H., NSHIMIYIMANA, P., HEMA, C., ZOUNGRANA, O., MESSAN, A., COURARD, L., 2019. Comparative Study of Thermal Comfort Induced from Masonry

- Made of Stabilized Compressed Earth Block vs Conventional Cementitious Material. *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 7, 385–403.
- NDOUTOUM, J.-P., POUFFARY, S., DELABOULAYE, G., 2015. Guide du Bâtiment Durable en Régions Tropicales.
- NEMATCHOUA, M.K., TCHINDA, R., RICCIARDI, P., DJONGYANG, N., 2014. A field study on thermal comfort in naturally-ventilated buildings located in the equatorial climatic region of Cameroon. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 381–393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.010>
- NEYA, I., 2020. Bâtiment et bioclimatisme en Afrique subsaharienne: outils d'aide à la conception.
- NEYA, I., YAMEGUEU, D., COULIBALY, Y., MESSAN, A., OUEDRAOGO, A.L.S.-N., 2020. Impact of insulation and wall thickness in compressed earth buildings in hot and dry tropical regions. *J. Build. Eng.* 101612.
- NF EN 15251, 2007. Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieure, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.
- NGUYEN, A.T., SINGH, M.K., REITER, S., 2012. An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia. *Build. Environ.* 56, 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.021>
- NICOL, F., HUMPHREYS, M., 2010. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Build. Environ.* 45, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.013>
- NICOL, J., 2007. SCATs and other projects of the Thermal Comfort Unit at Oxford Brookes 1993-2007. NCEUB Meeting. Univ. Coll. Lond. Lond. UK.
- NICOL, J.F., HUMPHREYS, M.A., 2020. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy Build.* 34, 563–572.
- NICOL, J.F., HUMPHREYS, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy Build.* 34, 563–572.
- 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.
- NSHIMIYIMANA, P., MESSAN, A., COURARD, L., 2020. Physico-Mechanical and Hygro-Thermal Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders. *Materials* 13, 3769. <https://doi.org/10.3390/ma13173769>
- NSHIMIYIMANA, P., MESSAN, A., ZHAO, Z., COURARD, L., 2019. Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* 216, 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.037>
- OMAR SORE, S., MESSAN, A., PRUD'HOMME, E., ESCADEILLAS, G., TSOBNANG, F., 2018. Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. *Constr. Build. Mater.* 165, 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>
- ONU Habitat, 2010. L'état des villes Africaines: Réinventer la transition urbaine, Nairobi, Kenya.
- ONU-Habitat, 2020. Le plan stratégique.
- OUEDRAOGO, B.I., LEVERMORE, G.J., PARKINSON, J.B., 2012. Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso. *Build. Environ.* 49, 270–282. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.003>

- PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L., MCMAHON, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- QUENTIN, M., HENRY, É., LAUDATI, P., 2017. Prise en compte de l’occupant dans une démarche interdisciplinaire de réhabilitation durable. Focus sur la perception du confort thermique dans l’habitat social. *Dév. Durable Territ. Économie Géographie Polit. Droit Sociol.* <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11744>
- Rapport GIEC, 2021.
- RINCON, L., CARROBE, A., MARTORELL, I., MEDRANO, M., 2019a. Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design. *J. Build. Eng.* 24, 100732. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100732>
- RINCON, L., CARROBE, A., MARTORELL, I., MEDRANO, M., 2019b. Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design. *J. Build. Eng.* 100732.
- ROHLES, F., FH, R., RB, H., G, M., 1975. EFFECTIVE TEMPERATURE (ET*) AS A PREDICTOR OF THERMAL COMFORT. *Eff. Temp. Predict. Therm. Comf.*
- SEDRAN, T., 1999. Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants.
- SEICK OMAR, S., 2017. Synthèse et caractérisation des liants géopolymères à base des matériaux locaux du Burkina Faso en vue d’une stabilisation des Briques en Terre Comprimées (BTC).
- SOMMET, A., 2013. La thermorégulation [WWW Document]. <https://biologiedelapeau.fr>. URL <https://biologiedelapeau.fr/spip.php?article75> (accessed 11.22.19).
- TOBY, C., HANNAH, J., ADAM, L., 2017. Greengauge; Overheating and Thermal Comfort. Greengauge. URL <https://ggbec.co.uk/quick-guide-overheating-thermal-comfort/> (accessed 1.25.22).
- VERBEKE, S., AUDENAERT, A., 2018. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 2300–2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>
- VISITSAK, S., HABERL, J.S., 2016. An analysis of design strategies for climate-controlled residences in selected climates. *Proc. SimBuild 1*.
- WYSS, U., 2005a. La construction en «matériaux locaux». *Etat Un Sect. Potentiel Mult. Rapp. DDCICI Burkina Faso*.
- WYSS, U., 2005b. La construction en «matériaux locaux» *Etat d’un secteur à potentiel multiple*.
- WYSS, U., 2005c. La construction en «matériaux locaux» 78.
- YOUNMATTER, 2019. Urbanisation : définition, évolution du phénomène, causes et conséquences. Youmatter.
- ZHAO, Q., LIAN, Z., LAI, D., 2021. Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy Built Environ.* 2, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007>

Annexes

Annexe 1

Enquête sur le confort thermique dans le bâtiment

Date : Heure : Age : *Genre : M ☐ F ☐

Poids Taille Nationalité.....

*Habillement : (Cocher la case qui vous convient) / l'enquêté

Pantalon léger ☐ ou lourd ☐ Robe ☐ Haut ☐
 Chemise ML ☐ ou MC ☐ Jupe ☐ Pagne ☐
 Culotte ☐ Sous-vêtements ☐ Culotte ☐ Sous-vêtements ☐
 T-shirt ☐ Boubou ☐ Chaussures fermées ☐ ou ouvertes ☐

Autre habillement :

*Confort thermique (Sensation thermique réelle) / l'enquêté

- Comment vous sentez vous thermiquement à l'instant « t » ? (Cocher la case du numéro qui vous convient)

Très froid	Froid	Légèrement froid	Ni froid ni chaud	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

- Souhaitez-vous modifier la température de la salle ? / l'enquêté

Augmenter la fraîcheur ☐ Augmenter la chaleur ☐ Ne rien changer ☐

- Les paramètres climatiques de la pièce / l'enquêteur

(Va)	(Tg)	(T, Ta)	(Tr)	(HR)	(Tn)

- Le travail fourni (Métabolisme) / l'enquêteur

Occupation il y'a 30 mn	Occupation il y'a 60 mn

Travail de bureau	Lecture
Marche en terrain plat	Conduite
Marche en montée	Douche puis habillage
Promenade en pente	Nettoyage
Course	Cuisine
Couché au repos	Lavage de vaisselle
Assis au repos	Repas

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at:
<https://www.emerald.com/insight/2398-4708.htm>

A model for thermal comfort assessment of naturally ventilated housing in the hot and dry tropical climate

A model for
thermal
comfort
assessment

Arnaud Louis Sountong-Noma Ouedraogo and Adamah Messan

*Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD),
Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE),
Ouagadougou, Burkina Faso, and*

Daniel Yamegueu and Yezouma Coulibaly

*Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE),
Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE),
Ouagadougou, Burkina Faso*

Received 3 February 2021
Revised 15 March 2021
19 April 2021
Accepted 24 April 2021

Abstract

Purpose – A major challenge faced by West Africa is to find comfortable housing as a result of climate change and population growth. The climatic adaptation of buildings and their indoor environment become an essential condition for maintaining the health and productivity of the occupants. This paper proposes a model to assess the thermal comfort of naturally ventilated buildings in hot and dry climates in Burkina Faso.

Design/methodology/approach – The proposed method is an adaptive model which relies on a combination of parameters such as the operative temperature, the new effective temperature and the basic parameters of thermal comfort. It consists in proposing the zones of thermal comfort on the diagram of the humid air for each climatic region.

Findings – A decision-making tool is set up for evaluating the comfort of buildings to better consider the bi-climatic concept through a long-term comfort index. This comfort index is defined and is used to assess the degree of thermal discomfort for various types of housing. Two natural ventilation pilot buildings located in Ouagadougou were considered. The results show that the pilot building whose wall are made of Earth blocks achieves 26.4% of thermal comfort while the building made of hollow cement block achieves 25.8% of thermal comfort.

Originality/value – The decision-making tool proposed in the present study allow building stakeholders to better and easily design, assess and improve the thermal environment of buildings.

Keywords Thermal comfort, Operative temperature, New effective temperature, Climatic zone, Comfort zone, Decision-making tool

Paper type Research paper

1. Introduction

Sub-Saharan Africa is experiencing strong growth in urban cities. The urban population was expected to reach 50% in 2020 and 65% in 2050 according to UN Habitat (ONU Habitat, 2014). Burkina Faso, one of the landlocked sub-Saharan countries, is endowed with limited natural resources and is located in extreme climate, arid and tropical depending on the season and the region. Burkina Faso had an urbanization rate of 32% in 2016, and this rate was estimated to be 34% in 2020 and 40% in 2025 (ONU Habitat, 2014). In this context, it becomes essential to be able to offer to local residents affordable, healthy and thermally comfortable housing adapted to increasingly severe climatic conditions (Hema *et al.*, 2017; Neya *et al.*, 2020).



The authors are grateful to the "German Academic Exchange Service" (DAAD) for supporting this research within the framework of the "In Region Scholarship Programme-2iE Burkina Faso, 2016" and through the grant number 57313342/2016.

International Journal of Building
Pathology and Adaptation
© Emerald Publishing Limited
2398-4708
DOI 10.1108/IJBPA-02-2021-0011