



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

**T H E S E**

pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Spécialité : Energie

Présentée et soutenue publiquement  
par

NEYA Ibrahim

le 15 décembre 2020

Titre :

---

**Bâtiment et bioclimatisme en Afrique subsaharienne:  
outils d'aide à la conception**

---

JURY

M. Abdoulaye OUEDRAOGO, Professeur Titulaire, Université Joseph KI-ZERBO	Président
M. Dieudonné Joseph BATHIEBO, Professeur Titulaire, Université Joseph KI-ZERBO	Rapporteur
M. Dorothé Barthélémy AZILINON, Professeur Titulaire, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar	Rapporteur
M. Adamah MESSAN, Maître de Conférences, Institut 2iE	Examineur
M. Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître de Conférences, Institut 2iE	Examineur
M. Daniel ROUSSE, Professeur Titulaire, Université du Québec	Examineur
M. Yézouma COULIBALY, Maître de Conférences, Institut 2iE	Directeur de thèse

Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE) & Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD)

# Dédicace

Je dédie cette thèse à :

- Ma mère Maimouna, mon père Gilbert et tous mes enseignants qui m'ont permis par l'éducation de progresser dans ma vie
- Mes sœurs Ramata, Awa et mes frères Claude, Béyon, Bessiou, Issaka et Salif qui ont toujours été présents pour moi et m'ont beaucoup inspiré à travers leur exemplarité
- Mes managers et amis Neil Bianchi et Billy Yarro de qui j'ai beaucoup appris

# Remerciements

Je rends grâce à Dieu de m'avoir accordé la santé et la force de réaliser cette recherche au milieu de personnes qui ont dévoué leur vie à servir la société au travers de leurs connaissances. Je voudrais tout d'abord adresser mes sincères remerciements à l'ensemble de mes encadreurs pour leur accompagnement dans le cadre de cette étude.

Particulièrement, je dis ma reconnaissance au professeur Yézouma COULIBALY pour son inconditionnelle disponibilité, sa grande culture scientifique et sa grande rigueur scientifique qui ont permis de canaliser cette thèse tout en approfondissant les notions scientifiques qui y sont examinées.

Ma gratitude va aussi à l'endroit du professeur Adamah MESSAN qui de par son exemplarité, sa vision stratégique et son leadership efficace a permis non seulement la disponibilité des ressources indispensables à cette thèse, mais aussi l'orientation des travaux vers une problématique à la fois pressante et indispensable à l'essor des pays en voie de développement. Au Professeur Daniel YAMEGUEU, celui qui m'a invité à candidater à cette thèse et qui toujours s'est attelé à instaurer un climat de travail agréable, je dis merci pour son immense contribution à cette thèse.

Je remercie les professeurs Dieudonné Joseph BATHIEBO et Dorothé Barthélémy AZILINON, les rapporteurs de cette thèse qui de par leur grande maîtrise de la thématique centrale de cette thèse ont élaboré des analyses approfondies qui contribuent à améliorer la qualité du document de thèse.

Je témoigne aussi ma gratitude au Professeur Abdoulaye OUEDRAOGO, président du jury de thèse et au professeur Daniel ROUSSE, examinateur de la thèse pour leur contribution significative au débat scientifique de thèse qui ont permis de dégager des pistes supplémentaires de recherche pour compléter les résultats obtenus à la suite de ces travaux. Je suis reconnaissant au Professeur Wennd Kouni Igor OUEDRAOGO pour l'immense travail qu'il réalise en vue de créer pour les doctorants un cadre agréable permettant d'optimiser leur productivité.

Je saisis la présente opportunité pour remercier les mentors que j'ai eu la grâce d'avoir dans le monde de la recherche. En l'occurrence, sans que la liste ne soit exhaustive, je remercie le Professeur Kokouvi Edem N'TSOUKPOE, le professeur Julien RAMOUSSE, le professeur Moussa SORO et le Dr Yohan RICHARDSON avec qui j'ai beaucoup appris avant de m'engager en thèse.

Je ne veux en aucun cas oublier combien ces valeureuses personnes que sont les doctorants du 2iE ont inlassablement contribué au succès de ces travaux. Je ne vous cite pas ici, mais sachez que je vous ai dans mon cœur et nos relations ne sauraient être décrites que par des mots.

À ma famille, ces inconditionnels présents, je suis infiniment reconnaissant à Dieu de vous avoir, car vous avez toujours surpassé mes attentes et êtes pour moi une source intarissable d'inspiration. Merci à vous tous.

Ce travail est le fruit de la fructueuse collaboration entre les laboratoires Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) et Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMhAD). Je remercie alors le personnel de ces laboratoires et le leadership bienveillant qui y est implémenté pour avoir mis en place les ressources nécessaires à la réalisation de ces travaux de recherche.

À mes amis, mes collègues et mes proches non nominés, je ne vous ai pas oubliés. Je vous ai toujours avec moi comme vous m'avez toujours avec vous. Je ne doute pas que nos projets continueront de grandir de même que notre amour pour un monde meilleur de paix et d'amour.

# Résumé

En Afrique, le secteur du bâtiment s'inspire beaucoup des constructions occidentales. Cependant, ces habitudes de construction conduisent le plus souvent à une inadéquation au climat et à un manque de confort notamment thermique des bâtiments. Cette thèse vise à approfondir la réflexion sur la valorisation des matériaux locaux dans l'habitat. Elle s'appuie sur des mesures passives liées à l'architecture bioclimatique pour assurer le confort thermique dans les bâtiments en évolution libre. Pour ce faire, un bâtiment pilote fait de briques en terre compressée a été réalisé au Burkina Faso, en zone de climat tropical chaud et sec. Des expérimentations sur site et simulations à partir du logiciel Energyplus ont permis de réaliser la validation empirique du modèle thermique du bâtiment pilote réalisé. Par suite, l'impact de stratégies bioclimatiques comme l'inertie thermique, l'isolation thermique et la protection solaire a été examiné au travers d'indicateurs comme le déphasage, le facteur d'amortissement et le nombre d'heures dans la plage de températures opératives acceptables. L'expérimentation pour les périodes chaude et froide de février et novembre a montré que la température intérieure du bâtiment dépasse en général 30 ° C. Les facteurs d'amortissement de l'onde thermique sont respectivement de 57 % et 50 % pour les deux périodes citées précédemment. On constate que le bâtiment connaît des périodes d'inconfort évalué à 64 % du temps annuel d'occupation pour une acceptabilité de 80%. L'étude de l'isolation thermique a montré que l'utilisation d'une isolation de 0,15 m de paille avec 0,02 m de chaux donne des performances thermiques identiques à 0,10 m de laine de verre. De plus, l'isolation externe comme interne a permis de réduire la température maximale aux heures chaudes et réduire ainsi les écarts diurnes. L'utilisation de masques solaires permet de réduire de 21 à 30 % les flux solaires dans le bâtiment. Celle de vitrages sélectifs permet de réduire les apports calorifiques solaires de 80 à 90 %.

**Mots Clés :** comportement thermique d'un bâtiment, climat tropical, simulation thermique dynamique, Matériaux de construction, confort thermique, climatisation passive

# Abstract

The building sector in Africa still uses building techniques of western countries. However, these building habits lead mostly to inappropriate indoor climate and increase thermal discomfort in the buildings. This thesis aims to examine the use of local building materials through passive strategies of bioclimatic architecture to improve thermal comfort of free running dwellings. For this purpose, a test cell made of compressed earth blocks was built in Burkina Faso, in a dry and hot tropical climate area. Experimentation of the test cell and simulation under EnergyPlus were performed to validate the building thermal model. Then, the impact of bioclimatic passive strategies as thermal inertia, thermal insulation, solar shading were examined through factors like the time lag, decrement factor and number of hours inside the range of acceptable operative temperatures in the building. The experiment in February and November months showed that the temperature inside the building was beyond 30 °C. For hot and cold months, respectively February and November; the values of the decrement factor were respectively 57% and 50%. We could notice that the building experiences discomfort periods of about 64 % of the yearly occupancy time for an acceptability of 80%. The analysis of thermal insulation showed that insulation with 0.15 m of straw mixed with 0.02 m of lime and insulation with 0.10 m of glass wool give the same thermal performance. Moreover, the external and internal insulations could reduce the maximal temperature and also reduce the daily temperature amplitude. As for the solar shading strategies, they could reduce by 21 to 30% the heat flow due to solar radiations. The use of advanced glazing could reduce the heat flow due to solar radiation by 80 to 95%.

**Key words:** building thermal behavior, tropical climate, dynamic thermal simulation, Building materials, thermal comfort, passive air conditioning

# Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique .....	5
Introduction.....	6
1.1 État de l’art, concepts et origines de l’architecture bioclimatique.....	6
1.2 Confort thermique dans l’architecture bioclimatique .....	9
1.3 Outils de conception de l’architecture bioclimatique .....	11
1.3.1 Les outils simplifiés d’analyse bioclimatique.....	11
1.3.2 Les outils détaillés d’analyse bioclimatique du bâtiment .....	16
1.4 État des connaissances sur les stratégies bioclimatiques .....	19
1.4.1 Études de l’architecture bioclimatique en Afrique .....	19
1.4.2 Matériaux locaux de construction.....	22
1.4.3 Inertie thermique des matériaux.....	24
1.4.4 Protections solaires des habitats.....	26
1.5 Stratégies bioclimatiques en climat tropical chaud et sec : cas du Burkina Faso .....	28
1.5.1 Climat, énergie et matériaux de logement au Burkina Faso .....	28
1.5.2 Caractéristiques géographiques et climatiques de la zone d’étude.....	29
1.5.3 Etudes bioclimatiques au Burkina Faso.....	29
Conclusion .....	30
Chapitre 2 : Modèle et expérimentation.....	32
Introduction.....	33
2.1 Expérimentation.....	33
2.1.1 Présentation de la plateforme.....	33
2.1.2 Présentation du bâtiment pilote.....	34
2.1.3 Instrumentation .....	36
2.1.4 Méthodologie expérimentale .....	38
2.2 Modélisation des échanges de chaleur et de masse .....	39

2.2.1 Conduction.....	40
2.2.2 Convection.....	42
2.2.3 Échange par rayonnement à grandes longueurs d'onde.....	43
2.2.4 Échange par rayonnement à courtes longueurs d'onde.....	45
2.2.5 Débit d'infiltration.....	46
2.2.6 Débit de ventilation naturelle.....	47
2.2.7 Bilan de chaleur pour les parois opaques.....	48
2.2.8 Bilan de chaleur de la zone.....	50
2.2.9 Interdépendance des équations de transferts thermiques.....	50
2.3 Considérations complémentaires du modèle.....	51
2.3.1 Environnement d'implémentation du modèle mathématique du bâtiment.....	51
2.3.2 Prise en compte des masques solaires dans le modèle.....	53
2.3.3 Propriétés thermophysiques et optiques des matériaux.....	55
2.3.4 Paramètres d'évaluation du modèle.....	56
2.3.5 Déphasage et amortissement de l'onde thermique dans le bâtiment.....	57
2.3.6 Confort thermique.....	59
Conclusion.....	61
Chapitre 3 : Résultats et Analyses.....	62
Introduction.....	63
3.1 Résultats expérimentaux.....	63
3.1.1 Performance thermique du bâtiment pilote en période chaude.....	63
3.1.2 Performance thermique du bâtiment pilote en novembre.....	65
3.2 Application du diagramme de Milne et Givoni.....	67
3.3 Simulation et validation du modèle.....	70
3.3.1 Simulation.....	70
3.3.2 Validation.....	73
3.4 Impact de l'isolation thermique et épaisseur de matériaux sur l'inertie thermique.....	78



3.4.1 Influence de l'isolation interne et externe.....	78
3.4.2 Influence de l'épaisseur des murs .....	80
3.4.3 Influence combinée de l'isolation et de l'épaisseur des blocs .....	83
3.5 Impact des flux solaires sur le confort thermique .....	87
3.5.1 Flux solaires du bâtiment pilote .....	87
3.5.2 Impact des gains solaires sur le confort thermique .....	91
3.5.3 Impact des protections solaires existantes du bâtiment pilote .....	93
3.5.4 Impact des masques solaires sur le confort thermique.....	96
3.5.5 Impact des technologies de vitrage sur le confort thermique .....	101
Conclusion .....	105
Conclusion générale.....	107
Bibliographie.....	111
Annexes.....	120

# Liste des figures

Figure 1.1 : Diagramme bioclimatique de Olgay[40] .....	12
Figure 1.2 : Diagramme bioclimatique de Givoni [40].....	13
Figure 1.3 : Diagramme bioclimatique de Givoni et Milne [40] .....	14
Figure 1.4 : Diagramme bioclimatique de Givoni pour pays en voie de développement [40]	16
Figure 1.5 : Répartition de l'utilisation des outils en phase d'optimisation des bâtiments[54] .....	18
Figure 1.6:Stratégie de protection solaire : (a) protection par arbres ; (b) débord de toiture ; (c) façade mobile ; (d) masque proche latéral droit et gauche ; (e) proche horizontal (casquette) ; et (f) persienne [108] .....	26
Figure 1.7: Diagramme bioclimatique de Givoni pour la ville de Ouagadougou [2] .....	30
Figure 2.1 : Bâtiments pilotes de la plateforme expérimentale bioclimatique du 2iE .....	33
Figure 2.2 : Bâtiment pilote a) façade Sud b) façade Ouest .....	34
Figure 2.3 : Plans des bâtiments pilotes a) vue de dessus b) coupe verticale .....	35
Figure 2.4: Enregistreurs de temperature et d'humidité .....	37
Figure 2.5 : Station météo a) vue des équipements principaux b) vue des pyranomètres c) vue d'ensemble .....	38
Figure 2.6:Dispositif de collecte et traitement des données .....	39
Figure 2.7 : Zones thermiques du bâtiment pilote .....	40
Figure 2.8:Flux de chaleur intervenant au niveau d'une paroi opaque.....	49
Figure 2.9:Diagramme des flux d'énergie du bilan thermique du bâtiment .....	51
Figure 2.10:Méthodologie de simulation thermique dynamique avec Energyplus .....	52
Figure 2.11:Modèle du bâtiment pilote sous EnergyPlus a) vue de face b) vue de profil .....	53
Figure 2.12 : Diagramme de la course solaire de Ouagadougou pour l'année climatique type .....	54
Figure 2.13:Diagramme d'ombrage du soleil montrant l'ombrage pour un masque solaire horizontal d'angle 50 ° en plein Sud.....	54
Figure 2.14:Réponse thermique de la propagation d'onde au travers d'un mur [97] .....	58
Figure 2.15:Plage de températures opératives acceptables dans les bâtiments en évolution libre [137] Adapté .....	60
Figure 3.1 : Températures expérimentales interne et externe du bâtiment pilote en février ...	63

Figure 3.2 : Humidités relatives intérieure et extérieure du bâtiment pilote en février .....	64
Figure 3.3:Températures des parois internes des murs du bâtiment pilote en février .....	64
Figure 3.4 : Températures intérieure et extérieure du bâtiment pilote en novembre.....	65
Figure 3.5:Humidités intérieure et extérieure du bâtiment pilote en BTC ciment en novembre .....	66
Figure 3.6:Températures internes des murs du bâtiment pilote en novembre .....	66
Figure 3.7 : Températures moyennes journalières de Ouagadougou.....	67
Figure 3.8 : Humidités relatives moyennes journalières de Ouagadougou .....	68
Figure 3.9:Diagramme de Givoni et Milne de la ville de Ouagadougou.....	69
Figure 3.10 : Températures simulées sur les surfaces interne et externe du mur Nord .....	71
Figure 3.11 : Températures simulées sur les surfaces interne et externe du mur Sud .....	72
Figure 3.12 : Températures simulées sur les surfaces interne et externe du mur Est .....	72
Figure 3.13 : Températures simulées sur les surfaces internes et externes du mur Ouest.....	73
Figure 3.14 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Est ....	74
Figure 3.15 : Corrélation entre températures internes simulée et mesurée de la paroi Est.....	74
Figure 3.16 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Ouest	75
Figure 3.17:Corrélation entre températures internes simulée et mesurée de la paroi Ouest....	75
Figure 3.18 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Nord .	76
Figure 3.19 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Sud ...	76
Figure 3.20 : Corrélation de températures simulée et mesurée au niveau de la zone habitable .....	77
Figure 3.21 : Variantes d'isolation du bâtiment pilote a) cas de référence b) isolation avec chaux + paille c) isolation avec la laine de verre .....	78
Figure 3.22 : Température intérieure en fonction du type d'isolant externe .....	78
Figure 3.23:Température intérieure en fonction du type d'isolant interne .....	79
Figure 3.24:Variantes d'épaisseur de paroi du bâtiment pilote .....	81
Figure 3.25 : Température intérieure en fonction de l'épaisseur des murs.....	81
Figure 3.26:Température intérieure pour BTC 0,14 m en fonction du type d'isolation.....	83
Figure 3.27:Température intérieure pour BTC 0,22 m en fonction du type d'isolation.....	84
Figure 3.28:Température intérieure pour BTC 0,35 m en fonction du type d'isolation.....	85
Figure 3.29:Température intérieure pour BTC 0,50 m en fonction du type d'isolation.....	85
Figure 3.30:Flux solaires annuels sur les surfaces externes des murs du bâtiment pilote .....	87
Figure 3.31:Profil horaire des flux solaires annuels sur les surfaces externes.....	88

Figure 3.32:Flux solaires annuels sur les surfaces internes principales du bâtiment pilote ....	89
Figure 3.33:Profil horaire des flux solaires annuels sur les surfaces internes .....	89
Figure 3.34 : Proportion annuelle de flux solaires directs au travers du vitrage .....	90
Figure 3.35 : Températures moyennes annuelles horaires.....	91
Figure 3.36:Températures horaires du 1er avril.....	92
Figure 3.37 : Acceptabilité des températures opératives du bâtiment pilote .....	93
Figure 3.38 : modèles de bâtiment sans comble a. façade Nord b. modèle thermique.....	94
Figure 3.39:Températures opératives dans le bâtiment avec ou sans comble .....	94
Figure 3.40 : Températures opératives en fonction de la température mensuelle moyenne....	95
Figure 3.41:Nombre d’heures dans les plages de températures opératives acceptables.....	95
Figure 3.42 : Inconfort local dû aux températures radiantes de la toiture .....	96
Figure 3.43 : Course du soleil avec l’ombrage lié à un pare-soleil d’angle altitude 50 ° .....	97
Figure 3.44 : Course du soleil avec l’ombrage lié à un pare-soleil d’angle azimut de 60 ° ....	97
Figure 3.45 : Flux solaires des vitrages suivant les variantes de masques solaires .....	98
Figure 3.46:Températures opératives suivant les dispositions de masques solaires.....	99
Figure 3.47 : Températures opératives en fonction des températures mensuelles moyennes pour les variantes de masques solaires.....	99
Figure 3.48 : Durée annuelle de températures acceptables à 80 % pour les scénarios d’ombrages.....	100
Figure 3.49 : Durée annuelle de températures acceptables à 90 % pour les scénarios d’ombrages.....	101
Figure 3.50:Flux solaires au travers des différents vitrages .....	102
Figure 3.51:Impact sur la température opérative des différents vitrages.....	102
Figure 3.52:Températures opératives en fonction des moyennes mensuelles de températures extérieures suivant les scénarios de vitrages.....	103
Figure 3.53:Impact des vitrages sur le confort thermique adaptatif à 80 % d’acceptabilité..	103
Figure 3.54:Impact des vitrages sur le confort thermique adaptatif à 90 % d’acceptabilité..	104

# Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Paradigmes influençant l'architecture durable des XXe et XXIe siècles [13].....	7
Tableau 1.2 : Stratégies bioclimatiques en fonction des conditions climatiques [15], [16] .....	9
Tableau 1.3 : Quelques articles de référence sur l'architecture bioclimatique en Afrique.....	20
Tableau 2.1 : superficie des éléments de l'enveloppe du bâtiment pilote .....	35
Tableau 2.2 : Ratio Fenêtre-mur du bâtiment pilote .....	36
Tableau 2.3 : Capacité thermique du bâtiment pilote en régime stationnaire.....	36
Tableau 2.4 : Propriétés thermophysiques et optiques des matériaux utilisés [130]–[132].....	55
Tableau 2.5 : Propriétés des différentes technologies de vitrage.....	55
Tableau 2.6 : Calendrier prévisionnel d'occupation .....	60
Tableau 3.1:Températures des parois internes du bâtiment pilote en février .....	65
Tableau 3.2:Températures de parois internes du bâtiment pilote .....	66
Tableau 3.3 : Indicateurs statistiques de validation du modèle .....	77
Tableau 3.4 : Déphasages et facteurs d'amortissement de température par les parois du pilote .....	79
Tableau 3.5 : Déphasages et facteurs d'amortissement de température par les parois .....	80
Tableau 3.6 : Températures intérieures pour différentes épaisseurs de murs .....	81
Tableau 3.7:Variantes des cas de simulation de masques solaires proches .....	98

# Liste de symboles

## Symboles latins

Symboles	Grandeurs	Unités
A	surface	m <sup>2</sup>
B <sub>SVR</sub>	facteur de réflexion lumineuse intérieur	[-]
B <sub>SSR</sub>	facteur de réflexion solaire intérieur	[-]
C <sub>p</sub>	Chaleur massique	J·kg·K
C	coefficient	[-]
E	effectivité de l'ouverture d'aération	[-]
e	épaisseur	m
F <sub>SVR</sub>	facteur de réflexion lumineuse extérieur	[-]
F <sub>SSR</sub>	facteur de réflexion solaire extérieur	[-]
F	facteur de forme d'une surface	[-]
Fr	fraction ouverte du canal de ventilation	[-]
g	Facteur solaire	[-]
ΔH	hauteur	m
h	coefficient de transfert de chaleur	W·m <sup>2</sup> ·K
I	Irradiance solaire	W·m <sup>-2</sup>
P	périmètre	m
Q̇	débit	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
q''	densité de flux	W·m <sup>-2</sup>
T	température	K
R <sub>u</sub>	coefficient de rugosité	[-]

R	coefficient de corrélation	[-]
V	vitesse	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
X	coefficient CTF extérieur	[-]
Y	coefficient CTF croisé	[-]
Z	coefficient CTF intérieur	[-]
W	coefficient de direction du vent	[-]

### Symboles grecs

Symboles	Grandeurs	Unités
$\varepsilon$	émissivité	[-]
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
$\phi$	angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale	radians
$\alpha$	absorption solaire	[-]
$\theta$	angle d'incidence des rayons solaires par rapport à l'horizontale	radians
$\gamma$	facteur d'éclairement solaire du faisceau intérieur	[-]
$\phi$	angle d'azimut solaire	radians
$\lambda$	conductivité thermique	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$\rho$	masse volumique	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\tau_l$	coefficient de transmission lumineuse	[-]
$\varepsilon$	émissivité dans l'infrarouge	[-]
$\varepsilon$	résidu absolu moyen	$^{\circ}\text{C}$
$\psi$	angle effectif	radians
$\omega$	angle de direction des vents	radians
$\Phi$	coefficient de flux CTF	[-]

## Indices

k	conduction
in	intérieur
ex	extérieur
j	rang de coefficient CTF, $j=0,1, 2\dots.nz$
nz	nombre de coefficients CTF
nq	nombre de coefficients CTF de flux ( $nq=nz$ )
$\delta$	pas de temps de calcul de conduction
conv	convection
surf	surface
air	air
for	forcé
nat	naturel
ciel	ciel
sol	sol
direct	rayonnement direct
diffus	rayonnement diffus
albedo	albedo
inf	infiltration
tirage	tirage thermique
vent	vent
décharge	décharge
sim	simulé
mes	mesuré



## Acronymes

CTF	Fonction de Transfert par Conduction : « Conduction Transfer Function »
IBPSA	International Building Performance Simulation Association
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AIA	Institut américain d'architecture "American Institute of Architecture"
AIE	Agence Internationale de l'Energie
ASES	Société américaine d'énergie solaire "American Solar Energy Society »
ASHRAE	Société américaine du chauffage, réfrigération et conditionnement d'air "American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning"
BTC	Brique de terre compressée/comprimée
EN	Norme européenne "European norm"
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISO	Organisation internationale de normalisation « International Organization for Standardization »
PLEA	Architecture passive et à faible consommation énergétique "Passive and Low Energy Architecture"
TMY	Typical Meteorological Year
USGBC	Conseil américain de bâtiment vert "US Green Building Council"

# Introduction générale

Le bâtiment, au-delà de l'aspect sécuritaire, doit être un cadre assurant le confort et le bien-être de ses habitants. La satisfaction des habitants avec l'environnement thermique interne des locaux ou confort thermique dépend de plusieurs facteurs d'ordre physiologique, comportemental et psychologique. Lorsque les conditions internes des locaux ne sont pas acceptables pour les occupants, les systèmes de climatisation ou de ventilation peuvent être utilisés pour obtenir le confort thermique. Par exemple, les bâtiments en climat tropical chaud et sec font face à d'importants apports thermiques liés aux forts flux de radiations solaires et aux températures extérieures élevées. Il s'ensuit d'énormes besoins en refroidissement qui accroissent leur consommation énergétique en climatisation et leur coût d'exploitation. Les systèmes de conditionnement d'air sont coûteux et donc pas financièrement accessibles aux populations à faible revenu. Au regard des contraintes liées à l'utilisation de ces systèmes actifs, le retour à l'architecture bioclimatique, dans l'optique de construire des bâtiments agréables à faible coût de fonctionnement est alors primordiale.

L'architecture bioclimatique promeut la prise en compte des ressources climatiques (vent, soleil, eaux), des ressources locales (paille, terre, bambous, arbres) et la topographie du site pour réaliser des bâtiments assurant le confort des occupants. Elle est en conformité avec la notion de développement durable. Certes, l'architecture bioclimatique a été découverte dans les années 1950, mais son essor n'a réellement débuté qu'à la suite de la crise énergétique de 1973. Au regard d'une situation énergétique mondiale marquée par un épuisement inéluctable des ressources fossiles, une aggravation de la pollution environnementale et un coût croissant de l'énergie, une révision des modes de consommation et de production de l'énergie s'imposait. Les politiques internationales s'accordent ainsi sur une utilisation efficiente des ressources impliquées dans le cycle de vie des bâtiments pour amoindrir leur impact environnemental et leur dépendance énergétique. Au nombre des résolutions adoptées s'inscrivent les réglementations sur les performances thermiques des bâtiments qui sont de plus en plus strictes de nos jours. Ainsi, dans les pays européens, des labels et certifications existent en plus de codes et standards pour réglementer la construction des bâtiments à haute performance énergétique. La nouvelle directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments adoptée en mai 2018 incluant des stratégies promouvant des avancées d'ici 2050 en est un exemple. Les progrès attendus touchent à la rénovation énergétique du parc de bâtiments

existant, la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 80 à 95% d'ici 2050 par rapport à 1990 ainsi que l'automatisation intelligente et contrôle des systèmes énergétiques dans les bâtiments. De telles stratégies sont envisagées à l'échelle mondiale, y compris en Afrique subsaharienne, même si les progrès y sont moins notables. En effet, le contexte global de pauvreté marqué par le manque de ressources financières, un faible accès à l'électricité et un choix préférentiel pour des matériaux comme le ciment y rend difficile l'accès au logement à faible consommation d'énergie, écologique et confortable.

En Afrique, le secteur du bâtiment s'inspire beaucoup des constructions occidentales au détriment des architectures anciennes qui prenaient mieux en compte les contraintes climatiques et la valorisation des ressources locales [1]. Ce choix se justifie par plusieurs facteurs comme la bonne maîtrise de ces techniques de construction, la recherche de l'esthétique, du prestige social ou l'ignorance du potentiel des matériaux locaux pour le confort thermique [2] et le développement durable. Cependant, ces nouvelles constructions réalisées généralement en parpaing creux avec une toiture en tôle ondulée et de larges fenêtres vitrées conduisent à une inadéquation des bâtiments au climat et à un accroissement des charges de climatisation.

De plus, il existe des préoccupations mondiales liées à la consommation d'énergie, à l'abondance des matériaux et à la pollution de l'environnement en rapport avec l'utilisation du ciment. Une récente revue de la littérature [3] a montré que le monde produit 4 milliards de tonnes de ciment Portland avec une croissance de production annuelle de 4 % [4]. Cette production intensive est responsable de 5 % d'émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale [5]. D'autre part, la production de ciment Portland est associée à une consommation d'énergie élevée en raison de la calcination du clinker et du broyage à 1400-1450 °C. A ces préoccupations, est associée la question de l'accessibilité financière du ciment, plus difficile dans les pays les moins avancés d'Afrique. Pour ces pays le recours aux matériaux locaux s'impose donc comme une alternative viable.

Dans la même logique, l'écoconstruction en Afrique subsaharienne passe par la valorisation des matériaux locaux. Par exemple, les matériaux locaux à base de terre y sont abondamment disponibles et peuvent faciliter l'accès au logement à faible consommation d'énergie tout en soutenant le développement durable. Les blocs d'adobes sont les matériaux de construction de murs en terre les plus économiques. En plus d'être des matériaux de construction améliorant le confort thermique, ils sont également écologiques [6]. Cependant, la faible durabilité des adobes les rend vulnérables aux vents et aux effets érosifs de l'eau

pendant les saisons pluvieuses. Afin de remédier à cette situation, des techniques de stabilisation physique, mécanique ou chimique sont utilisées pour accroître la résistance mécanique et la durabilité des briques en terre [7]–[9]. L'effet de la stabilisation permet d'obtenir des briques en terre plus résistantes telles que les Briques en Terre Comprimée stabilisée (BTC).

La plupart des bâtiments en matériaux à base de terre en Afrique subsaharienne sont sans accès aux systèmes mécaniques pour assurer le confort. Cette situation s'explique principalement par le coût de revient élevé lié aux équipements et à l'électricité. Le taux de pénétration du climatiseur dans les ménages est faible en Afrique. Il est de 6 % dans les régions chaudes de l'Afrique subsaharienne [10]. Il importe alors de réaliser une exploitation intelligente des ressources climatiques et environnementales pour garantir le confort thermique de telles maisons. En effet, la construction de bâtiments écologiques et économes en énergie nécessite l'intégration de stratégies passives, qui exploitent au mieux les conditions climatiques externes pour assurer le confort du bâtiment. C'est pourquoi le choix d'une architecture bioclimatique orientée vers la valorisation des matériaux locaux est une stratégie à promouvoir pour des bâtiments décents en Afrique subsaharienne. C'est dans l'optique de contribuer à une telle orientation que la présente thèse a été réalisée. Elle vise à améliorer les connaissances pour le développement de modes de construction de bâtiments performants en matériaux locaux en Afrique subsaharienne.

Cette thèse a donc comme objectif général d'approfondir la réflexion sur la valorisation des matériaux locaux dans l'habitat à travers l'adoption de mesures passives liées à l'architecture bioclimatique pour assurer le confort thermique. Les outils bioclimatiques simplifiés et détaillés y sont utilisés de manière à valider leur pertinence dans l'adoption des stratégies bioclimatiques en climat tropical chaud et sec.

Les objectifs spécifiques associés à cette étude sont :

1. Faire un état de l'art des stratégies et outils bioclimatiques applicables en Afrique subsaharienne
2. Caractériser la réponse thermique de l'enveloppe d'un bâtiment en BTC face aux sollicitations climatiques extérieures par une expérimentation
3. Vérifier la validité des modèles de simulation thermique
4. Étudier l'impact de l'épaisseur des matériaux BTC et des isolants (laine de verre et paille) sur l'inertie thermique des constructions

## 5. Étudier l'influence des flux solaires sur le comportement thermique des bâtiments en BTC

La thèse est organisée en trois chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art des connaissances sur l'architecture bioclimatique en général, avec un centre d'intérêt sur les recherches scientifiques réalisées en Afrique subsaharienne. Les origines de l'architecture bioclimatique, les stratégies et outils associés de même que le concept de confort thermique y sont présentés. Le deuxième chapitre traite de la méthodologie utilisée lors de l'expérimentation et de la modélisation d'un bâtiment pilote fait en BTC qui constitue le cas d'étude. Le troisième chapitre traite des résultats de l'expérimentation, de la modélisation et de la validation empirique. L'influence de l'épaisseur des parois et de leur niveau d'isolation thermique sur l'écrêtement et le déphasage des ondes thermiques est aussi analysée. Enfin, les résultats relatifs à l'impact des apports solaires sur le confort thermique sont présentés.

# **Chapitre 1 : Revue bibliographique**

## **Introduction**

Ce premier chapitre de thèse présente l'état de l'art sur l'architecture bioclimatique et ses limites. D'abord, les origines de l'architecture bioclimatique, le confort thermique et les outils d'analyse bioclimatique sont présentés. Ensuite, l'attention est portée sur les connaissances de l'architecture bioclimatique en Afrique et les champs de recherche que sont les matériaux locaux, l'inertie thermique et la protection solaire des bâtiments. Enfin, les performances des stratégies passives pour le cas du Burkina Faso sont présentées.

### **1.1 État de l'art, concepts et origines de l'architecture bioclimatique**

Les crises énergétiques de 1973 et 1979 ont été à la base de réformes promouvant de nouveaux mécanismes de production et consommation de l'énergie [11]. Dès lors, l'utilisation efficiente et rationnelle des énergies disponibles ou efficacité énergétique s'est posée comme une réelle priorité en matière d'énergie [12]. Le secteur du bâtiment en a été influencé au travers de recherches promouvant de nouvelles politiques énergétiques. Cette crise mondiale est ainsi à la base de concepts comme celui de bâtiments passifs, bâtiments à énergie positive, bâtiments à énergie nulle, bâtiments à basse consommation, bâtiments verts et bâtiments durables. L'idée maîtresse dans ces concepts est de mettre l'accent sur des thématiques centrales du développement durable à l'échelle mondiale.

Ces types de bâtiments innovants sont associés à plusieurs formes d'architecture qui promeuvent des concepts relatifs à l'efficacité énergétique, à la gestion rationnelle des ressources, à la protection de l'environnement et à la lutte contre le changement climatique. Le Tableau 1.1 récapitule les différents paradigmes dans l'histoire de l'architecture des XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles [13] en mettant en exergue les valeurs prioritaires de chaque type d'architecture. Toutefois, les principes de ces nouveaux concepts étaient déjà incorporés dans les racines de l'architecture bioclimatique développée dans les années 1950 par les frères Olgay. Il n'y a donc pas un passage radical d'une forme d'architecture à une autre, mais une mise en relief d'idées et innovations qui contribuent au développement durable.

Les premiers travaux mentionnant l'expression « architecture bioclimatique » sont ceux de Victor Olgay en 1953. En effet, les frères Olgay ont fait de l'architecture bioclimatique une science sur la base de sciences comme la physiologie, la climatologie et la physique du bâtiment

[14]. Les études antérieures aux travaux des frères Olgay sur l'architecture bioclimatique en 1949 sont considérées comme plus artistiques que scientifiques [13], [14]. Les travaux concernés [13] sont : l'architecture organique de Wright en 1906, les masques solaires de Corbusier et Breuer en 1906, l'hygiène de Atkinson en 1906, le modèle biologique de Meyer en 1926, le biorégionalisme de Neutra en 1929 et le principe de précaution et de santé de Aalto en 1935.

Tableau 1.1 : Paradigmes influençant l'architecture durable des XXe et XXIe siècles [13]

Paradigmes	Années	Influenceurs	Valeurs
Architecture bioclimatique	1908-1968	Olgay, Wright, Neutra	Découverte
Architecture environnementale	1969-1972	Ian McHarg	Harmonie
Architecture consciencieuse de l'énergie	1973-1983	AIA, Balcomb, ASES, PLEA	Efficacité énergétique
Architecture durable	1984-1993	Brundtland, AIE, Feist	Efficacité en ressources
Architecture verte	1993-2006	USGBC, Van der Ryn	Neutralité carbone
Architecture à carbone neutre	2006-2015	GIEC, Mazria	Résilience
Architecture régénérative	2016 — Futur	Lyle, Braungart, Benyus	Récupération

L'architecture bioclimatique est un concept fondé sur l'harmonie entre l'homme, son environnement et son climat. L'expression « architecture bioclimatique » peut donc être comprise comme une utilisation optimale des sources d'énergie comme le soleil et le vent pour créer des ambiances thermiques acceptables pour les occupants d'un bâtiment. Autrement dit, l'architecture bioclimatique consiste à assurer le confort humain tout en maintenant un équilibre sain entre l'homme, le climat et la nature. L'architecture bioclimatique intègre aussi la gestion rationnelle des ressources disponibles et la réduction de la pollution environnementale, et est de ce fait écologique. Szokolay [14] présente l'approche bioclimatique en trois points :

- L'homme est le centre de l'architecture bioclimatique



- L'homme est confronté à des conditions climatiques souvent défavorables
- La tâche est de créer un filtre entre l'homme et son climat

Au fait, les ressources climatiques et environnementales sont filtrées pour créer des environnements intérieurs aux conditions acceptables par les occupants. Pour ce faire, il convient de supprimer, retarder ou favoriser l'impact de plusieurs facteurs déterminants tels que le rayonnement solaire, la température, l'humidité et la vitesse du vent. Par exemple, dans les climats tempérés, les stratégies solaires passives consistent à piéger et stocker l'énergie solaire pour le chauffage des bâtiments. Les climats méditerranéens, qui connaissent à la fois des périodes chaudes et froides optent pour des stratégies permettant d'exploiter l'énergie solaire en hiver tout en limitant les flux solaires en été. Dans les milieux chauds, les stratégies solaires passives consistent par contre à réduire au strict minimum les flux solaires dans le bâtiment. En effet, les flux solaires dans de tels milieux accroissent les apports calorifiques et par suite les problèmes d'inconfort, plus accentués en période chaude de pointe. Les travaux de Watson [15], [16] sur l'architecture bioclimatique permettent de recommander différentes techniques pour climats tropicaux suivant les modes de transfert de chaleur dominant (Tableau 1.2).

L'une des pistes de recherche en vogue sur l'architecture bioclimatique est sans nul doute la proximité qu'elle peut entretenir avec toutes formes d'architecture propre à une civilisation, une époque ou une culture, bien regroupées sous le nom d'architecture vernaculaire. Beccali et al. [17] ont examiné les implications des architectures bioclimatique et vernaculaire sur le confort thermique en climat chaud et humide. Convertino et al. [18] ont examiné l'influence des couleurs des finitions de l'architecture vernaculaire combinée à celle bioclimatique sur les confort thermique et visuel des occupants en régions méditerranéennes. Les travaux de Canas et Martin [19] ont permis de découvrir les similitudes entre l'architecture vernaculaire et l'architecture bioclimatique en Espagne. Plusieurs auteurs dans la littérature [18], [20] –[25] ont aussi montré que les constructions vernaculaires peuvent avoir des caractéristiques bioclimatiques. Les différentes recherches menées visent avant tout à développer des stratégies passives efficaces pour assurer le confort des occupants. La compréhension du concept de confort thermique est donc essentielle à toute mise en œuvre de stratégies bioclimatiques.

Tableau 1.2 : Stratégies bioclimatiques pour climats tropicaux [15], [16]

<b>Stratégie bioclimatique</b>	<b>Transfert de chaleur</b>	<b>Techniques</b>	<b>Conditions de mise en application</b>
Minimiser le flux de chaleur par conduction	Conduction	isolation	Températures extérieures très basses ou très élevées pour le confort Inefficacité des stratégies de refroidissement naturel
Décaler le flux de chaleur périodique	Conduction, radiation	grand déphasage des matériaux de mur	Climat chaud et aride avec de grandes amplitudes de température
Minimiser les infiltrations	convection	isolation, étanchéité	Présence de fuites d'air au travers des fenêtres, portes ; fissures de murs et joints
Pouvoir un stockage thermique	conduction, convection, radiation	matériaux à grande inertie thermique	Besoin d'amortir les amplitudes de températures extérieures et de stocker la chaleur
Minimiser les flux solaires	radiation	masques solaires, isolation, barrières radiatives	Nécessité de se protéger des surchauffes liées au rayonnement solaire direct
Promouvoir la ventilation nocturne	convection	ventilation naturelle ou mécanique	Besoin de refroidissement par l'air
Promouvoir le refroidissement radiatif	radiation	matériaux de grande émissivité	Refroidissement suites aux échanges radiatifs avec le milieu extérieur
Promouvoir le refroidissement par évaporation	Évaporation	humidification de l'air, arrosage de toitures...	Besoin de ramener la température dans la plage de confort tout en ayant une humidité acceptable

## 1.2 Confort thermique dans l'architecture bioclimatique

Le confort thermique est la pierre angulaire de l'architecture bioclimatique. La notion de confort thermique dépend de paramètres d'ordre physiologique, comportemental et psychologique. Plusieurs standards d'évaluation du confort thermique ont été développés dont

les modèles de ASHRAE [26], de la norme européenne EN 15 251 [27] et de ISO 7730 [28]. Plusieurs auteurs ont aussi mis en place des modèles de confort thermique applicables dans certaines régions comme Sanghai en chine[29], l'Inde [30], [31], le climat chaud et humide [30], [32], [33]. Rodriguez et D'Alessandro [34] ont souligné d'après les travaux de Taleghani les différences notables qui existent dans les prédictions des modèles de confort thermique. Ces écarts sont liés aux différences dans les formulations des équations, des conditions aux frontières, des bases de données empiriques et des températures de référence.

La norme ASHRAE définit le confort thermique comme un état d'esprit dans lequel les occupants sont satisfaits des conditions thermiques de leur environnement. Autrement dit, le confort thermique est l'absence d'inconfort exprimée par des occupants qui n'ont ni chaud ni froid. Les paramètres pour quantifier le confort sont en étroite relation avec le bilan thermique des occupants. Il s'agit de paramètres objectifs comme la température de l'air, la température radiante, la vitesse de l'air, l'humidité relative, le métabolisme et l'isolation de l'habillement. Plusieurs expériences ont été menées dans des enceintes thermiques et deux principaux indicateurs ont été trouvés pour mesurer le degré de confort. Ce sont les notions de vote moyen prévisible (de l'anglais « Predicted Mean Vote (PMV) ») et de pourcentage prévisible d'insatisfaits (de l'anglais « Predicted Percentage of Dissatisfaction (PPD) »).

La méthode précédente de ASHRAE, bien connue sous le nom de modèle de Fanger, a été limitée aux bâtiments à air conditionné suite aux résultats de travaux empiriques sur le confort thermique [35]–[38]. En effet, De Dear et Brager [35] ont constaté que le modèle de bilan thermique néglige les expériences thermiques et la dimension psychologique du confort thermique à l'intérieur des bâtiments en évolution libre. Ils ont alors proposé une révision du standard ASHRAE avec des plages élargies de confort pour les bâtiments en évolution libre. Cette étude a induit différentes études dans différentes régions du monde pour mieux prendre en compte l'acclimatation des populations.

Selon une revue bibliographique de 2019 [34], l'Afrique est le continent de la zone tropicale avec le plus faible nombre de publications dans le domaine du confort thermique. Le Nigeria, le Cameroun, le Kenya, la Tanzanie et Madagascar occupent les premiers rangs tandis que l'Éthiopie, la République Démocratique du Congo, le Soudan, le Soudan du Sud, le Mozambique et l'Angola occupent les dernières places. Le classement a été réalisé sur la base de l'impact du nombre de publications sur le confort thermique intérieur. Il convient de noter que la multiplicité de modèles de confort thermique, notamment adaptatifs entraîne une multiplication équivalente de zones de confort et induit des modifications de frontières des

diagrammes bioclimatiques. Toutefois, le manque d'études appropriées sur le confort thermique en Afrique ne facilite pas la prise en compte de l'acclimatation des Africains dans la définition des diagrammes bioclimatiques.

### **1.3 Outils de conception de l'architecture bioclimatique**

De nombreux outils de conception ont été élaborés pour l'estimation du potentiel bioclimatique des habitats. On peut les classer en deux grandes catégories : les outils simplifiés et les outils détaillés. Les outils simplifiés regroupent l'ensemble des graphiques utilisés pour l'estimation du potentiel bioclimatique sur la base des données climatiques. Les outils détaillés apportent en plus de la prise en compte du climat, les spécificités propres à chaque bâtiment. Les deux types d'outils peuvent être combinés de sorte à optimiser la conception des bâtiments. Dans ce cas, les stratégies passives les plus pertinentes dans une zone climatique sont déterminées avec un outil simplifié et appliquées au bâtiment pour déterminer leur impact sur la performance thermique du bâtiment. Une telle approche a été utilisée par Semahi et al. [39] pour évaluer le potentiel bioclimatique de huit zones climatiques en Algérie. Cette méthode est aussi appliquée dans la présente étude pour évaluer l'impact des masques de protection solaire sur le confort thermique intérieur.

#### **1.3.1 Les outils simplifiés d'analyse bioclimatique**

La majeure partie des outils simplifiés reste des graphiques basés sur des paramètres climatiques comme les diagrammes bioclimatiques. Le but des diagrammes bioclimatiques est d'utiliser les conditions climatiques extérieures ou intérieures pour déterminer les stratégies passives à adopter en phase de conception. Plusieurs diagrammes bioclimatiques ont été élaborés au fil des années, les plus utilisés sont décrits dans cette section.

##### **1.3.1.1 Diagramme bioclimatique d'Olgay**

Le diagramme bioclimatique d'Olgay établit l'influence de quatre paramètres climatiques sur le confort : la température extérieure sèche, l'humidité relative extérieure, l'irradiance solaire et la vitesse des vents. Le confort selon Olgay est un état dans lequel les dépenses énergétiques biologiques de l'homme sont minimisées pour accroître sa productivité et sa santé. Le diagramme d'Olgay est présenté sur la Figure 1.1.

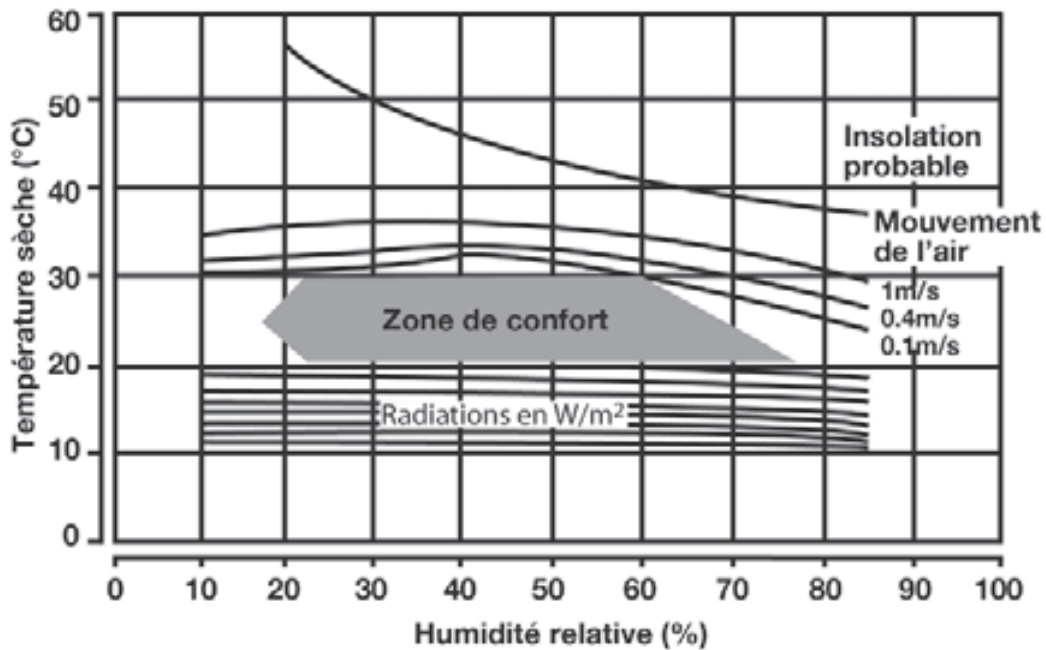


Figure 1.1 : Diagramme bioclimatique de Olgay[40]

Le diagramme bioclimatique d'Olgay [41] présente en abscisse l'humidité relative et en ordonnée la température sèche. L'utilisation du diagramme commence par la représentation des données climatiques sur le graphique. Les valeurs mensuelles moyennes peuvent être utilisées à cet effet. Lorsque les points sont dans la zone de confort, les conditions sont dites confortables à l'ombre. Lorsque les points sont hors de la zone de confort, des actions correctives s'avèrent utiles pour établir et maintenir le confort.

Pour les points au-dessus de la zone de confort, la ventilation naturelle est recommandée. Les courbes montrent les vitesses de vent acceptables pour rétablir le confort. Dans le cas de températures élevées et humidités faibles, le refroidissement par évaporation s'avère aussi nécessaire. Cette seconde mesure a pour effet d'humidifier l'air et de réduire la température extérieure de sorte à revenir à la limite supérieure de la zone de confort.

Pour les points en dessous de la zone de confort, dans le cas de faibles températures, le rayonnement solaire peut au travers de la température radiante rétablir les conditions de confort. Le diagramme originel correspond à la latitude de 40 ° nord et pour chaque réduction de latitude de 5 °, la température correspondante doit être majorée de 1,35 °C.

Le diagramme d'Olgay est basé sur l'hypothèse suivant laquelle les conditions internes et externes des bâtiments sont assez proches. La méthode graphique proposée est acceptable dans des bâtiments où de faibles variations de conditions intérieures et extérieures sont observées. Dans le cas de bâtiments à forte inertie thermique, fréquents dans les pays chauds, l'amortissement et le déphasage des flux extérieurs vers l'intérieur des bâtiments annulent la

proximité des environnements interne et externe ; et par la suite l'applicabilité du diagramme de Olgyay. Pour pallier cette insuffisance, Givoni a développé un diagramme bioclimatique qui se fonde sur les conditions intérieures des bâtiments. Ces conditions intérieures sont soit calculées soit mesurées.

### 1.3.1.2 Diagramme de Givoni

Le (premier) diagramme de Givoni a été élaboré et publié en 1969 [42]–[44] à partir du diagramme psychrométrique. La température sèche est en abscisse et l'humidité absolue en ordonnée. La Figure 1.2 montre le diagramme de Givoni.

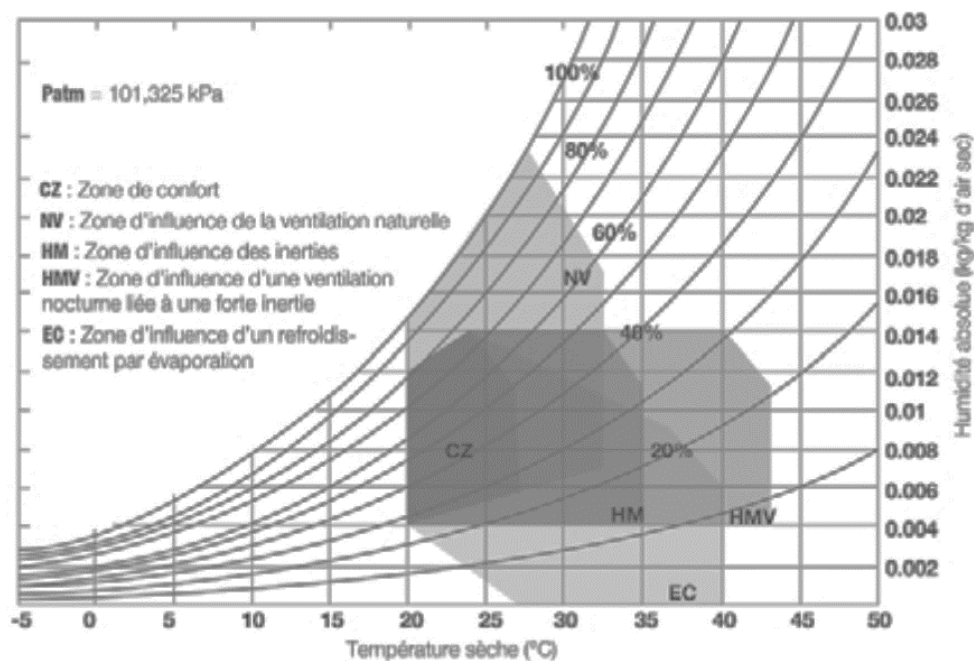


Figure 1.2 : Diagramme bioclimatique de Givoni [40]

Les stratégies passives sont choisies en représentant un segment de points correspondant à des valeurs mensuelles moyennes de coordonnées (température sèche maximale, humidité absolue minimale) et (température sèche minimale ; humidité absolue maximale). Une telle représentation est disponible à la Figure 1.7. Les différentes stratégies passives envisagées sont [42] :

- La ventilation naturelle
- L'inertie thermique avec ou sans ventilation nocturne
- Le refroidissement par évaporation directe ou indirecte

Le diagramme initial de Givoni a ensuite été élargi par Givoni et Milne en 1979 [45].

### 1.3.1.3 Diagramme de Givoni et Milne

Le diagramme bioclimatique de Givoni et Milne possède plus de stratégies passives pour assurer les conditions de confort thermique (Figure 1.3). Il s'agit de stratégies additionnelles liées à l'utilisation d'outils mécaniques pour l'humidification/déshumidification et le refroidissement/chauffage.

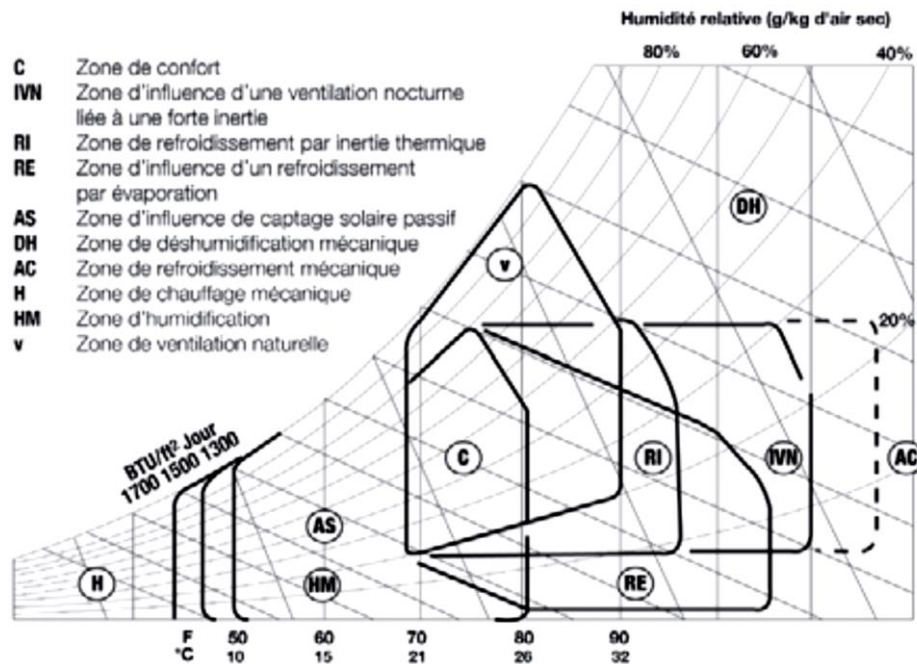


Figure 1.3 : Diagramme bioclimatique de Givoni et Milne [40]

Ce diagramme permet de représenter l'ensemble des données climatiques annuelles et d'estimer leur proportion dans différentes zones de stratégies pour choisir les mesures les plus adéquates [46]. Les masques solaires sont recommandés pour les climats chauds à partir d'une irradiation de  $157,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  et dans les climats froids avec une forte couverture solaire, à partir de  $630,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . La zone de confort élargie en forte inerte thermique s'étend jusqu'à  $8,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$  de la limite supérieure de la zone de confort thermique. Lorsqu'on associe l'inertie et la ventilation naturelle, le confort thermique est obtenu jusqu'à  $16,67 \text{ }^{\circ}\text{C}$  de la limite supérieure de la zone de confort thermique. Le potentiel du refroidissement par évaporation est évalué en s'appuyant sur les extremums de la température humide qui tombent dans la plage de confort. Les vitesses de ventilation naturelle influençant le confort sont comprises entre  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $0,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pour des personnes sédentaires dans des bureaux, notamment pour éviter que les papiers ne s'envolent dans l'espace. Cette limite s'étend à  $1,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pour les résidences. La vitesse de vent de  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  correspond à une sensation thermique équivalente à une réduction

de température de 2,5 ° C. De même, une vitesse de vent de 0,82 m· s<sup>-1</sup> correspond à une réduction de température de 3, 7° C.

#### **1.3.1.4 Diagramme de Givoni pour les milieux chauds**

Dans une publication parue en 1992 [47], Givoni porte un regard critique sur l'universalité des zones de confort définies sur la base du diagramme d'Olgay et le diagramme psychométrique conventionnel de ASHRAE. Le diagramme psychométrique a l'avantage d'exploiter un outil bien connu des ingénieurs et architectes pour définir les conditions de température d'air et d'humidité dans lesquelles l'utilisation de systèmes mécaniques de climatisation est indispensable. Si son utilisation est satisfaisante pour les bureaux et résidences conditionnés, elle présente des limites lorsqu'elle est appliquée aux bâtiments en évolution libre. Ceci se justifie par des facteurs d'acclimatation et d'attentes d'occupants de tels locaux qui sont en général plus larges que dans les bâtiments conditionnés. Aussi, des questions se posent en ce qui concerne les limites d'influence de la vitesse des vents en relation avec les humidités élevées dans les zones chaudes et humides. Givoni plaide alors pour que ces variabilités de sensation thermique soient prises en compte dans l'élaboration des limites de zone de confort et par suite de stratégies passives à adopter.

La dernière version du diagramme de Givoni publiée en 1998 [40] propose alors une prise en compte de l'acclimatation des pays en voie de développement et aux climats chauds. Ce diagramme connaît un élargissement des limites supérieures de confort thermique. La Figure 1.4 montre l'agrandissement de la plage de confort sur le diagramme bioclimatique de Givoni. Les conditions définies comme acceptables pour les pays chauds sont fixées entre 18 et 25 °C en période froide et 20 à 27 °C en période chaude sous l'hypothèse que les occupants sont sédentaires avec un habillement ordinaire. L'acclimatation est prise en compte en considérant 2 °C de plus sur la limite supérieure de température de confort et 2g·kg<sup>-1</sup>AS supplémentaire sur la limite supérieure de la teneur en vapeur d'eau. Ces conditions sont applicables uniquement dans les bâtiments en évolution libre.

Givoni recommande le refroidissement par évaporation dans les pays chauds et secs avec une température maximale de bulbe sèche de 44 °C et une température maximale de bulbe humide de 24 °C. La ventilation nocturne est conseillée pour des climats arides et désertiques où la température maximale est inférieure à 36 °C [42]. Au-delà de cette température, Givoni [42] préconise l'association de techniques de refroidissement comme le refroidissement par



évaporation ou les systèmes de compression ou absorption en conditionnement d'air pour établir et maintenir le confort.

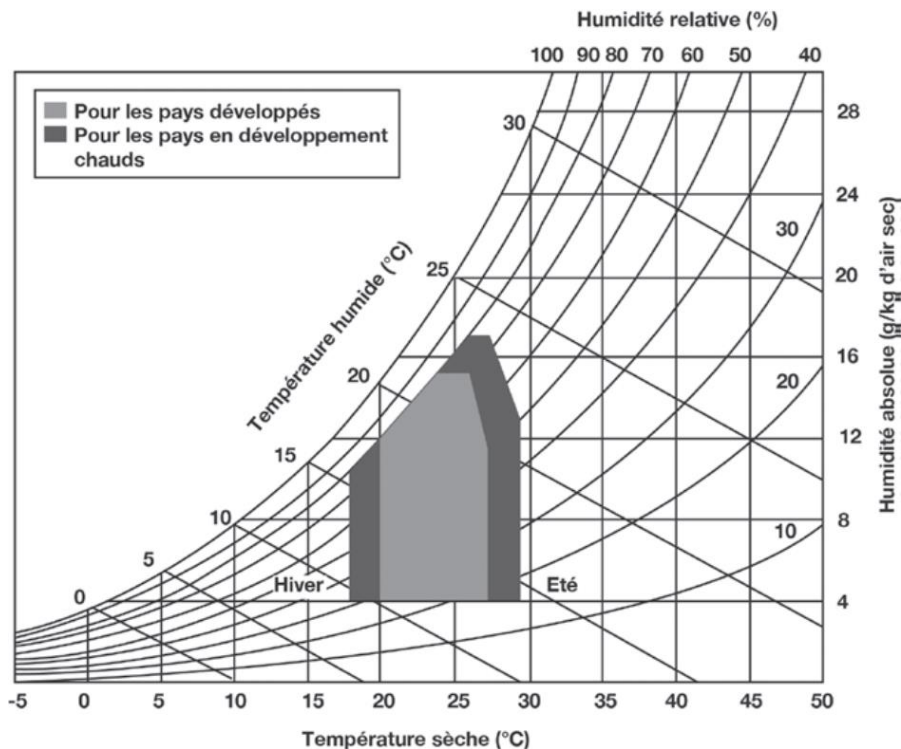


Figure 1.4 : Diagramme bioclimatique de Givoni pour pays en voie de développement [40]

### 1.3.1.5 Autres outils simplifiés d'analyse bioclimatique

Szokolay a proposé une méthode d'analyse bioclimatique basée sur un diagramme stéréographique [48] avant d'introduire deux indices climatiques pour caractériser les variations de température et d'humidité [49]. Dekay et Brown ont proposé en 2004 un diagramme bioclimatique inspiré à la fois des travaux d'Olgay et de Givoni. D'autres outils d'analyse bioclimatique [50], [51] sont le monogramme de température effective corrigée, les triangles de confort de Evans, les indexes de Mahoney, les tables de besoins climatiques d'Olgay, les diagrammes horizontaux de course solaire de Hang et Olgay et les diagrammes verticaux de course solaire de Bennett et Mazria.

### 1.3.2 Les outils détaillés d'analyse bioclimatique du bâtiment

Les premiers outils de simulation énergétique du bâtiment ont été élaborés dans les années 1960 [52]. Mais ce n'est qu'avec les crises énergétiques des années 1970, que le besoin d'outils plus performants a connu un réel engouement dans le monde de la recherche. En effet,

il convenait de faciliter le développement de bâtiments innovants à basse consommation énergétique. Les scientifiques ont alors accru la puissance de prédiction des outils de simulation grâce au développement de méthodes plus complexes et précises de résolution des algorithmes. Les données couramment prédites concernent les variables du climat intérieur, la consommation énergétique ou le coût énergétique des systèmes de chauffage et de refroidissement. La fiabilité des prédictions des outils avancés dépend de plusieurs facteurs comme la complexité des phénomènes à décrire, l'exactitude de la modélisation physique du bâtiment, l'exactitude des paramètres d'entrée y compris les propriétés physiques et la fiabilité de la validation empirique.

La qualité de la modélisation est intrinsèquement liée à la complétude des mécanismes physiques déterminant les interactions du bâtiment avec son environnement, de la prise en compte de la complexité des théories physiques et de la capacité des outils numériques à résoudre les algorithmes ainsi formulés. L'intérêt de la simulation thermique dynamique réside dans la prise en compte du phénomène d'inertie thermique dans l'évolution de variables comme la température, l'humidité, la qualité de l'air et les charges thermiques. Les outils de simulation énergétique permettent à partir de la connaissance des charges externes et internes du bâtiment et des caractéristiques de son enveloppe, de réaliser des calculs sur un moteur de simulation pour obtenir des résultats sous formes numérique et graphique. La base de données de l'Association Internationale de la simulation des performances des bâtiments (IBPSA) compte 203 logiciels avancés dans la simulation des performances énergétiques des bâtiments [53].

La Figure 1.5 [54] montre les proportions d'utilisation des outils de simulation pour des études d'optimisation. Les programmes de simulation énergétique les plus connus sont EnergyPlus, ESP-R, TRNSYS, DesignBuilder, IDA ICE, Wufi, IES Virtual Environment, Tas Building Designer et eQUEST. On note aussi des programmes performants comme COMSOL qui utilise un code en éléments finis pour un traitement des transferts de masse et de chaleur dans les bâtiments. La Figure 1.5 montre que EnergyPlus et TRNSYS sont les deux outils les plus utilisés dans le contexte des études d'optimisation.

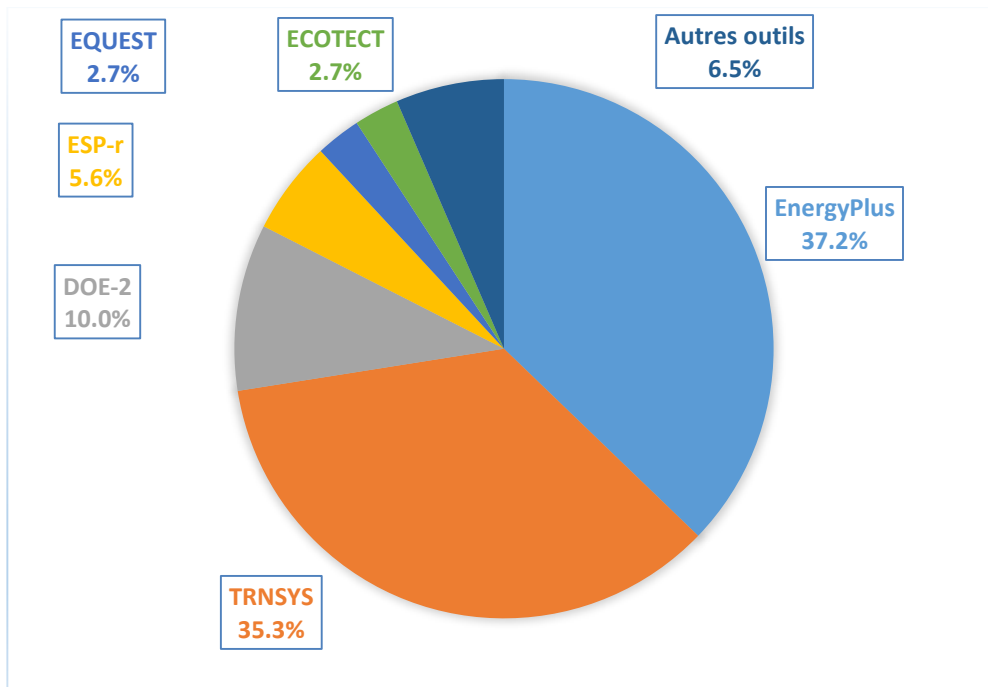


Figure 1.5 : Répartition de l'utilisation des outils en phase d'optimisation des bâtiments[54]

Le niveau avancé des outils de simulation thermique dynamique disponibles permet de prendre en compte la complexité des mécanismes de transfert de chaleur et de masse des bâtiments. Toutefois, des questions demeurent en ce qui concerne leur capacité à prédire les réelles performances des bâtiments. En effet, bien que des standards de validation de ces outils existent et confirment leurs résultats, il demeure aussi vrai que tous les cas possibles de simulation ne peuvent être vérifiés. De plus, quelques études scientifiques ont trouvé des écarts entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs simulées [55], [56]. Les écarts entre températures simulées et mesurées peuvent atteindre 11,4°C [56]. Afin de pallier cette situation, la validation empirique [52] est utilisée pour vérifier la qualité des modèles développés pour la simulation thermique dynamique.

La validation empirique a pour objectif de vérifier si le modèle utilisé pour la simulation dynamique thermique peut reproduire avec précision le comportement thermique du bâtiment en situation réelle. Pour ce faire, elle confronte les résultats expérimentaux aux résultats simulés. Elle est considérée comme la seule méthode de validation fiable. En effet, elle permet de prendre en compte le contexte et de faire des corrections si nécessaires pour rapprocher données expérimentales et données simulées. Toutefois, elle reste très dépendante d'une modélisation détaillée et d'une expérimentation rigoureuse du bâtiment. L'utilisation de bâtiments pilotes (bâtiments de petite taille dans notre cas) a été démontrée comme une

stratégie efficace afin d'obtenir des données de qualité à un coût réduit pour une validation des modèles [57].

En effet, les bâtiments pilotes constituent un bon compromis entre les expériences de laboratoire et les expériences de construction à grande échelle [57]. Rojas et al. [58] ont utilisé deux bâtiments pilotes de dimensions intérieures 2,8 m x 2,8 m x 2,8 m pour analyser les performances thermiques d'enveloppes en parpaing au Mexique. Pisello et al. [59] ont utilisé des bâtiments pilotes de 3,02 m x 3,02 m x 2,85 m pour étudier les performances hygrothermiques et énergétiques d'enveloppes modernes de bâtiments en Italie. Piccolo [60] a réalisé une étude sur les performances thermo-chimiques d'une fenêtre intelligente placée dans un bâtiment pilote de 0,43 m x 0,42 m x 0,44 m. Un bâtiment pilote de 3,10 m x 3,10 m x 2,50 m a aussi été utilisé en France pour analyser l'impact des matériaux à changement de phase sur le climat intérieur des bâtiments. Manz et al. [61] ont utilisé un bâtiment pilote de 4,626 m x 2,850 m x 2,360 m pour produire des données fiables servant à valider les modèles de simulation des flux solaires au travers de fenêtres avec ou sans masques solaires. Khalifa et Marshall [62] ont utilisé un bâtiment pilote de 2,95 m x 2,35 m x 2,08 m pour valider les coefficients de transfert de chaleur par convection pour les surfaces internes. Bauman [63] a utilisé un bâtiment de 5,64 m x 4,42 m x 4,06 m pour valider le modèle BLAST dans des bâtiments exposés au rayonnement solaire et ayant une forte inertie thermique. Un bâtiment de 2,31 m x 2,58 m x 2,58 m a aussi servi à étudier les effets de thermocirculation dans un mur Trombe [64]. Dans le cadre de cette thèse, un bâtiment pilote de 4,06 m x 3,06 m x 4,33 m sera utilisé.

## **1.4 État des connaissances sur les stratégies bioclimatiques**

### **1.4.1 Études de l'architecture bioclimatique en Afrique**

Cette section s'intéresse à la contribution scientifique d'études de référence sur l'architecture bioclimatique en Afrique. Le Tableau 1.3 récapitule plusieurs articles ayant mis un focus sur l'architecture bioclimatique en Afrique. Ce tableau spécifie le contexte de réalisation des travaux scientifiques (pays, date, climat, but et objectifs).

Les différentes études réalisées montrent une plage étendue d'axes de recherche sur l'architecture bioclimatique. Les thèmes couverts concernent l'examen du potentiel bioclimatique à l'échelle urbaine, l'identification de stratégies passives adaptées au climat, les

outils d'analyse bioclimatique adaptés au contexte d'étude, l'identification de risques associés à la performance énergétique de bâtiments bioclimatiques et l'évaluation du potentiel bioclimatique. On constate un intérêt plus fort pour l'architecture bioclimatique dans les pays du Maghreb comparés à ceux de l'Afrique subsaharienne.

Un manque notable de publications concernant les impacts socio-économiques et environnementaux de l'architecture bioclimatique est à noter. Peu d'études multifactorielles ont jusqu'à présent été faites à destination des pays de l'Afrique subsaharienne. Une évolution de cette situation est donc souhaitable dans cette partie du monde. C'est l'un des objectifs de cette thèse.

Tableau 1.3 : Quelques articles de référence sur l'architecture bioclimatique en Afrique

Ref.	Objectif	Climat	Pays	Année
[65]	L'auteur propose une évaluation du potentiel bioclimatique à travers des indicateurs liés à l'environnement extérieur et aussi des indicateurs de performance énergétique des enveloppes des bâtiments	chaud et humide	Djibouti	2020
[66]	L'article se focalise sur une nouvelle construction de terre « earthbag » et son potentiel à contribuer au confort thermique comparativement à un pilote en adobe suite à une utilisation de mesures bioclimatiques	Chaud et semi-aride	Ouagadougou -Burkina Faso	2019
[39]	L'article évalue sur la base du diagramme bioclimatique et de simulations le potentiel bioclimatique de zones climatiques		Algérie	2019
[67]	L'auteur étudie l'influence de la ventilation naturelle dans des bâtiments non isolés	Désertique chaud et sec	Ghardaia-Algerie	2018
[17]	L'article étudie les différentes approches de confort thermique adaptatif avec un focus sur les matériaux locaux et la ventilation naturelle	Savane	Maputo-Mozambique	2018
[68]	L'auteur analyse l'influence de la ventilation et de l'isolation sur la performance énergétique d'une toiture à double peau	chaud et humide	Djibouti	2017
[69]	L'article consiste à faire ressortir les liens entre l'architecture vernaculaire de la cité de Casbah avec l'architecture durable	Méditerranée	Casbah-Alger	2017

[70]	L'article évalue différents scénarios de construction associés à une analyse économique afin de promouvoir les matériaux locaux	tempéré chaud	Nairobi-Kenya	2017
[71]	L'auteur a réalisé une étude de capitalisation pour évaluer les risques liés à la performance énergétique des bâtiments sur la base des principes de l'architecture bioclimatique	tropical savane	Bamako-Mali	2017
[72]	L'article propose une amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment pilote bioclimatique par des stratégies passives et actives	tempéré chaud	Algiers-Algerie	2017
[73]	L'auteur analyse les performances énergétiques d'un mur capteur « Trombe » sur un pilote expérimental	tempéré chaud	Borj Cedria-Tunisie	2014
[74]	La publication propose les stratégies passives à adopter pour le confort externe sur la base de diagrammes bioclimatiques		Égypte	2011
[75]	L'auteur propose différents graphiques pour la conception bioclimatique		Maroc	2004
[76]	L'auteur propose différents diagrammes bioclimatiques pour la construction sur la base de données climatiques et de stratégies de contrôle de l'environnement interne		Nigeria	2001
[77]	L'article porte sur des considérations théoriques pour la prise en compte de stratégies passives dans la réalisation d'un habitat bioclimatique	chaud et humide	Ife-Nigeria	1989
[78]	L'auteur évalue les dispositions à prendre en compte en zone saharienne pour la planification urbaine en vue d'un accroissement du potentiel bioclimatique des zones urbaines	Sahélien	Sahara	1988

On note que la plupart des études ont été réalisées dans des bâtiments à air conditionné, laissant de côté les bâtiments en évolution libre. Pourtant ce type d'habitat, majoritairement à usages résidentiels constitue la plus grande frange de l'habitat en Afrique subsaharienne. En effet, suivant le rapport 2019 de l'AIE sur l'Afrique [10], seulement 6 % des ménages ont accès à un climatiseur dans les pays chauds d'Afrique subsaharienne. Dans certains de ces pays, les charges thermiques trop élevées contraignent les populations à vivre dans des conditions permanentes d'inconfort. Par exemple, au Burkina Faso, la climatisation représente environ 60-65 % de la consommation électrique des bâtiments publics types [79] et la majorité des

résidences sont en évolution libre. Les stratégies passives de l'architecture bioclimatique représentent une réelle opportunité pour améliorer les conditions thermiques internes des bâtiments dans ces pays. Les différents facteurs influençant l'architecture bioclimatique nécessitent ainsi un approfondissement et une intégration de solutions locales pour répondre aux préoccupations du développement durable. Des réflexions fondamentales de la thermique du bâtiment et des applications sur le bioclimatisme ou la conception passive des bâtiments en zone tropicale ont fait l'objet de publications de Coulibaly [80], [81]. Les réflexions menées dans ces travaux permettent d'éviter une vision de l'architecture bioclimatique seulement applicable en milieu tempéré, en tenant compte des spécificités de la zone tropicale chaude.

Notre étude vise à limiter les impacts du climat extérieur sur le confort thermique des bâtiments en évolution libre en mettant l'accent sur l'utilisation des matériaux locaux. Les flux solaires sont réduits au travers de stratégies passives comme l'inertie thermique, l'isolation thermique, les masques solaires et les vitrages à haute performance. Ces travaux permettront une analyse comparative de ces solutions à travers leurs performances thermiques et pourront faciliter la mise en place de réglementation dans le secteur de la thermique du bâtiment et de l'efficacité énergétique.

#### **1.4.2 Matériaux locaux de construction**

En Afrique, plusieurs matériaux de construction à faible coût et écologiques tels que la terre, le bois, la paille et le bambou sont mis en œuvre depuis plusieurs siècles. Face à une démographie galopante combinée à une urbanisation rapide, la réalisation de bâtiments décents aux conditions thermiquement acceptables [40] est une nécessité pour un développement inclusif et stable. Toutefois, les bâtiments situés dans les régions chaudes font face à d'importants flux de chaleur liés à de fortes radiations solaires et à l'air ambiant extérieur souvent chaud. Il s'ensuit un inconfort thermique qui accroît leur consommation énergétique et leur coût d'exploitation quand ils sont climatisés. Cet état des choses justifie l'intérêt grandissant pour les maisons à faible consommation d'énergie réalisées avec des éco-matériaux locaux. Dans ce contexte, le retour aux matériaux en terre, bien connus pour offrir des conditions thermiques acceptables au travers des bâtiments anciens, à l'exemple de la grande mosquée de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso, est de plus en plus envisagé.

Les blocs en adobe sont les matériaux de construction de murs en terre les plus économiques. En plus d'améliorer le confort, ils sont également écologiques [6], contrairement aux parpaings, du fait du clinker dans ces derniers. Dans certains pays comme le Burkina Faso,

les maisons en adobe représentent environ 82 % des habitats en milieu rural [82]. Cependant, ils restent mal acceptés dans nombre de pays africains [6] qui préfèrent les briques en ciment pour des raisons de prestige social ou de résistance aux intempéries. En effet, la faible résistance mécanique des adobes les rend plus sensibles aux vents et aux effets érosifs de l'eau de pluie. Afin de remédier à cette situation, des techniques de stabilisation physique, mécanique ou chimique sont utilisées pour accroître la résistance mécanique et la durabilité des briques en terre [7], [9], [83], [84]. Les travaux de Hall et al. [85] ont examiné les choix de techniques de stabilisation appropriées suivant les caractéristiques des sols utilisés.

Les Briques en Terre Comprimée stabilisée (BTC) font partie de cette catégorie de briques, considérée compétitive en termes de rapport qualité/coût par rapport aux briques creuses en ciment. Les investigations de Bahar et al. [86] sur les BTC ont montré que la combinaison de la stabilisation chimique et physique conduit à une bonne force de compression et une meilleure durabilité. D'autres études ont souligné que les BTC offrent une meilleure durabilité que les matériaux en adobe [6], [87] et une réponse thermique identique ou meilleure que les parpaings dans les régions chaudes [1], [2], [6], [88]. La présente étude vise à étudier les performances thermiques des maisons en BTC comme une alternative aux maisons en parpaings. La paille est aussi prise en compte dans cette étude comme un isolant dont la complémentarité avec les matériaux en terre a été prouvée par des investigations scientifiques.

Tiskatine et al [89] ont étudié la performance thermique des argiles rouges stabilisées au ciment en ce qui concerne l'incorporation d'isolants sous forme de sciure, de pétiole, de paille, de coquille d'argan et de fibres de palme. Ils ont constaté que les meilleures performances d'isolation thermique étaient obtenues avec de la paille. Quagliarini et Lenci [90] ont examiné l'influence de la paille en tant que liant naturel utilisé dans les anciennes briques d'adobe romaines. Cette étude a conclu que la paille influence à la fois la plasticité, la rupture et le rétrécissement des blocs d'adobe. Aouba et al [91] ont montré que l'incorporation de paille de blé dans des briques en terre cuite réduisait leur conductivité thermique de 35 %. Pritchard et Pitts [92] ont présenté la paille comme un isolant thermique et phonique, écologique et très économique. D'autres travaux [92] –[96] ont aussi mis en évidence les avantages de l'utilisation de la paille dans la construction de bâtiments. Les matériaux locaux étudiés ici, les BTC et la paille seront analysés au regard de leurs performances sur le confort thermique et l'inertie thermique.



### 1.4.3 Inertie thermique des matériaux

L'inertie thermique permet d'exploiter la capacité de stockage thermique des matériaux. En effet, les matériaux à forte inertie thermique absorbent la chaleur au cours des périodes chaudes. Ensuite, cette énergie stockée est libérée aux heures fraîches ou moins chaudes. L'inertie thermique d'un matériau est fonction de propriétés thermophysiques comme la densité, la chaleur spécifique et le volume de matériau. La qualité d'une inertie thermique est donnée par son impact sur le milieu intérieur au regard des sollicitations ambiantes.

Deux effets bien connus de l'inertie thermique sont l'écrêtement (facteur d'amortissement) et le déphasage. L'écrêtement caractérise la capacité du matériau à amortir les flux thermiques. Le déphasage est le temps nécessaire pour observer l'effet d'un flux thermique appliqué sur une face du matériau sur l'autre paroi du matériau. L'inertie thermique est appréciée dans les climats présentant de larges variations diurnes comme les climats chauds et secs. Dans de tels milieux, il convient de privilégier les matériaux favorisant l'obtention de températures intérieures amorties avec un grand déphasage avec les températures extérieures. En effet, l'une des qualités d'une bonne inertie thermique a trait à la capacité des matériaux à absorber les gains thermiques internes dus à la température extérieure et aux flux solaires. L'idéal est que les pics de températures journalières extérieures n'influencent l'intérieur des bâtiments que lors de l'occurrence des températures minimales extérieures.

L'inertie thermique est particulièrement utile pour améliorer les conditions thermiques intérieures du bâtiment en évolution libre. Verbeke et Audenaert [97] ont réalisé un état de l'art des effets d'inertie thermique en termes de réduction des charges de refroidissement et de chauffage. La stabilité des températures moyennes intérieures observée dans les églises médiévales montre les avantages pratiques de l'inertie thermique. Certaines études sur les habitations en terre [98] ou en pierre [99] ont prouvé que l'inertie thermique assure la stabilité thermique de l'environnement intérieur du bâtiment. Contrairement à cette observation générale, certains auteurs ont souligné que la demande nette de refroidissement des bâtiments climatisés augmente avec l'inertie thermique dans les régions chaudes. Cela a été remarqué par exemple dans le climat méditerranéen de l'Italie [100] et le climat chaud du désert de Las Vegas [101]. En effet, dans les bâtiments climatisés, de l'énergie est nécessaire pour refroidir la masse liée à l'inertie thermique. Les méthodes utilisées dans les différentes études, la portée de ces études et le type de bâtiments expliquent en partie les écarts constatés dans l'impact de l'inertie thermique. Les travaux de Camacho-Montano et al. [102] ont examiné le confort thermique durant les périodes chaudes d'été en Allemagne suivant le niveau d'inertie thermique des

bâtiments. Cette étude a montré que l'inconfort dans les bâtiments à forte inertie est observé durant 20 % du temps d'occupation contre 25 % dans les bâtiments à faible inertie thermique. Des stratégies passives recommandées par ces auteurs pour réduire en dessous de 5 % les temps d'inconfort concernent la ventilation naturelle et la protection solaire avec des vitrages électrochimiques ou des masques solaires. Cependant, l'inertie thermique n'est pas le seul phénomène qui détermine le comportement thermique des bâtiments. D'autres paramètres tels que l'emplacement et l'environnement du bâtiment, son scénario d'occupation et son isolation influencent également sa réponse thermique [103].

Pour distinguer l'impact de l'inertie thermique du bâtiment des autres paramètres d'influence », des auteurs [104], [105] ont utilisé une approche numérique (modèles théoriques et simulations). Guglielmini et al. [104] ont analysé l'influence de la capacité thermique des murs périphériques et des structures intérieures sur le confort thermique. Ils ont constaté que l'isolation avec de la laine de verre d'un mur extérieur en briques de ciment influence l'effet d'inertie thermique en fonction de la position de la couche d'isolation. Cependant, cette approche peut faire face à un écart entre la simulation et les performances réelles.

Une approche expérimentale peut surmonter ce problème et fournir une quantification précise de l'inertie thermique du bâtiment. Brambilla et Jusselme [106] ont expérimenté des constructions à petite et grande inertie thermique dans le climat continental suisse. La température intérieure dans le bâtiment de grande inertie thermique était plus stable avec une réduction de température jusqu'à 3 °C par rapport au bâtiment à faible inertie thermique. Cependant, la méthodologie expérimentale reste fastidieuse et nécessite beaucoup de temps, d'argent et d'expertise pour analyser tous les différents scénarios affectant l'impact de l'inertie thermique. Il est également difficile de distinguer avec une précision acceptable l'effet d'inertie thermique des impacts d'autres paramètres d'influence. Par conséquent, une approche combinée des deux techniques pourrait être un bon compromis pour analyser l'effet d'inertie thermique.

L'approche combinée d'expérimentation et de simulation a été utilisée pour quantifier l'inertie thermique dans plusieurs publications. Au nombre de celles-ci figure la récente étude de Toure et al. [11] qui caractérise l'inertie thermique des BTC. L'étude a été réalisée dans un bâtiment pilote de 1 m x 1 m x 1 m tout en BTC. Le pilote expérimental reste toutefois non habitable du fait de sa petitesse et son comportement thermique peut diverger de celui d'un habitat à cause de l'absence d'éléments comme les fenêtres et les toitures classiques. La

présente étude vise à utiliser l'approche de validation empirique pour étudier l'influence de l'isolation thermique et de l'épaisseur de paroi sur l'inertie thermique d'un pilote habitable.

#### 1.4.4 Protections solaires des habitats

Les protections solaires assurent la protection des espaces intérieurs contre les effets néfastes au rayonnement solaire. En effet, au-delà de la température supérieure limite de confort, le rayonnement solaire contribue à accroître la température intérieure et de ce fait l'inconfort. Une règle empirique est donc d'empêcher la pénétration de tout rayonnement solaire dès que la température la plus basse de la plage de confort est atteinte [46]. L'utilisation de pare-soleils est alors utile pour protéger l'intérieur des bâtiments du rayonnement solaire. On distingue des techniques comme les débords, brise-soleils, bardages, auvents, stores, treillis naturels pour protéger les façades (Figure 1.6) sans oublier les rideaux, films de vitrage et combles.

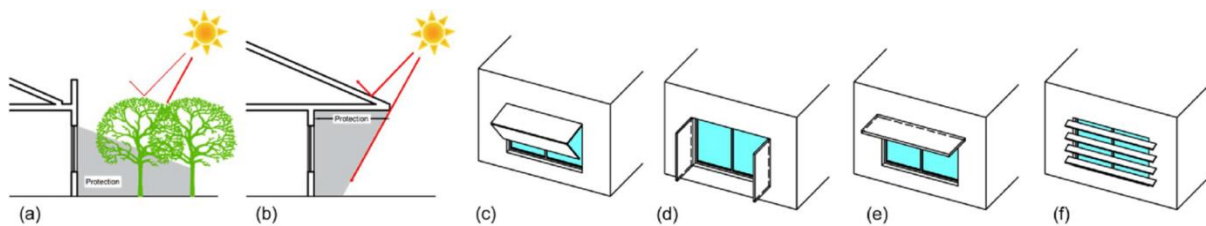


Figure 1.6: Stratégie de protection solaire : (a) protection par arbres ; (b) débord de toiture ; (c) façade mobile ; (d) masque proche latéral droit et gauche ; (e) proche horizontal (casquette) ; et (f) persienne [108]

Les masques solaires permettent ainsi de réduire les températures à l'intérieur des bâtiments principalement par la réduction des apports thermiques liés au rayonnement solaire au travers des ouvertures. Les masques solaires peuvent aussi protéger les parois opaques du rayonnement solaire, et par suite réduire les apports calorifiques vers l'intérieur du bâtiment.

L'impact des flux solaires sur les bâtiments est fonction de facteurs comme l'inertie thermique, l'orientation du bâtiment, le ratio fenêtre-mur, l'isolation thermique et la protection solaire [109]. Imre Csáky et Ferenc Kalmár [110] ont étudié la surface de vitrage acceptable pour rester sous une température intérieure de 26 °C en variant l'inertie thermique et le taux de renouvellement de l'air. L'étude a été réalisée avec un bâtiment de 4,0 m × 4,0 m × 2,8 m sur la base de la méthodologie de la norme EN ISO 13790:2008. Les résultats montrent qu'il existe une relation linéaire entre la surface de vitrage et le taux de renouvellement d'air suivant l'inertie thermique du matériau. L'étude de Valladares-Rendón [111] a réalisé un état de l'art

sur des systèmes de protection solaire comme les masques solaires, le ratio des surfaces fenêtre-mur et l'orientation du bâtiment. Les résultats ont montré que l'application de systèmes de protection solaire appropriés augmente les économies d'énergie de 4,64 % à 76,57 %. Zhang et al. [112] ont analysé l'influence du ratio fenêtre-mur, du ratio plancher-surface extérieure et longueur-largeur sur les charges de refroidissement de bâtiments en zone climatique humide et chaude. Nematchoua et al. [113] ont étudié l'influence des matériaux à changement de phase, de l'isolation thermique et des masques solaires extérieurs sur le comportement thermique des bâtiments dans les six différentes zones climatiques de Madagascar. Les analyses ont été réalisées au moyen d'un bâtiment à usage de bureaux calibré sous Designbuilder. Les résultats montrent que dans les bâtiments à ventilation naturelle, les matériaux à changement de phase combinés à l'isolation thermique ont le meilleur impact sur le confort thermique. Par contre ces deux dernières solutions sont à combiner avec les masques solaires extérieurs pour atteindre des économies allant jusqu'à 19 % dans les bâtiments climatisés. Abdelsalam Aldawoud [114] a comparé les masques solaires fixes avec les vitrages électrochimiques en climat chaud et sec. L'étude a été réalisée avec un bâtiment à usage de bureaux avec une enveloppe constituée de 50 % de vitrage sous le logiciel Designbuilder. Les résultats montrent que les vitrages électrochimiques peuvent atteindre 53-59 % de réduction de flux solaires contre 34-47 % pour les masques solaires horizontaux et latéraux. Toutefois, le ratio fenêtre-mur considéré dans une telle étude dépasse largement le seuil de 15 % recommandé pour le climat chaud et sec [1]. Les travaux de Lau et al. [115] ont comparé les vitrages performants à faible émissivité aux masques solaires fixes dans le climat humide et chaud de Malaisie. L'étude a été réalisée avec un bâtiment à usage de bureaux avec une enveloppe 100 % recouverte de vitrage sous le logiciel IES (VE). Les résultats montrent que les masques solaires offrent de meilleures performances thermiques comparativement aux vitrages performants. Piccolo [60] a montré que les vitrages électrochimiques intelligents peuvent réduire jusqu'à 50 % les flux solaires dans les bâtiments. Les recherches précédemment citées ont en général porté sur les économies d'énergie dans des bâtiments climatisés au détriment de ceux en évolution libre. Cette étude contribue à approfondir les connaissances sur les protections solaires en évaluant les performances thermiques des masques solaires fixes et de différentes technologies de vitrage dans un bâtiment en évolution libre dans un climat chaud et sec. Les technologies de vitrage analysées sont les vitrages simples, les vitrages sélectifs recouverts de métal et le vitrage électrochimique.

## **1.5 Stratégies bioclimatiques en climat tropical chaud et sec : cas du Burkina Faso**

### **1.5.1 Climat, énergie et matériaux de logement au Burkina Faso**

Le Burkina Faso est un pays en développement avec des ressources naturelles limitées. Il est confronté à plusieurs défis socio-économiques au nombre desquels figure l'accès à un logement décent pour tous. À ce jour, aucune norme sur la performance énergétique des bâtiments n'est disponible dans le pays. Par conséquent, le choix des matériaux de construction reste basé sur des considérations économiques et culturelles. Cet état de choses aggrave les problèmes d'inconfort thermique dans les bâtiments. En effet, les occupants du bâtiment subissent des températures intérieures élevées, ce qui conduit à l'utilisation de la climatisation pour assurer leur confort thermique, notamment pour les bâtiments publics. Cette situation augmente les coûts d'exploitation des bâtiments et la consommation d'énergie dans un pays où l'accès à l'électricité est faible. En effet, 16 millions de personnes n'ont pas encore accès à l'électricité au Burkina Faso [10]. Le taux d'électrification est de 65% en zone urbaine et moins de 5% en zone rurale [116]. De plus, une part de 60 à 65 % de la consommation électrique des bâtiments publics est due à la climatisation [79] et ce pourcentage augmenterait avec une population qui pourrait doubler entre 2010 et 2030 pour atteindre 29,15 millions d'habitants [79].

Un rapport de 2015 de l'institut national de statistique sur le secteur de la construction résidentielle [82] a quantifié les matériaux utilisés dans le secteur de la construction. Selon ce rapport le béton représente 49 % des revêtements de sols ménagers et est ainsi le mode le plus utilisé dans cette catégorie. La deuxième place des matériaux pour dalles est occupée par l'argile avec une proportion de 42,5 % des constructions. Les toits sont le plus souvent réalisés en tôle avec une proportion de 92,1 % en zone urbaine et 53,3 % en zone rurale. Les autres types de matériaux de toiture sont la paille, la terre, les tuiles et le béton. Les habitations en adobe sont le mode d'habitat le plus courant au plan national. Cependant, un mur sur deux est construit en parpaing dans les zones urbaines. Les autres variantes d'adobe, briques cuites et adobes améliorés sont peu prisées. La raison pour laquelle les blocs d'adobe sont largement préférés dans les zones rurales est d'abord culturelle, mais aussi pour leur faible prix et leur disponibilité dans tout le pays à l'exception de la zone nord-est qui est désertique. La faible durabilité de l'adobe et de ses variantes justifie le peu d'intérêt pour ces matériaux en zone

urbaine. À ce jour, la stabilisation des matériaux en terre pour obtenir des BTC fournit une résistance mécanique adéquate aux matériaux en terre. Bien que les BTC soient faiblement utilisés sur le marché national du bâtiment, ils suscitent l'intérêt à la fois des chercheurs, des décideurs et des populations. En effet, ils représentent une énorme opportunité de bénéficier du confort thermique au travers d'éco bâtiments à faible coût. Ils favorisent aussi la création d'emplois et une croissance économique inclusive.

### **1.5.2 Caractéristiques géographiques et climatiques de la zone d'étude**

Ouagadougou, la ville de cette étude est la capitale du Burkina Faso, pays enclavé de l'Afrique de l'Ouest d'une superficie de 274 000 km<sup>2</sup>. La ville d'une superficie de 2 805 km<sup>2</sup> est au centre du pays, dans la province du Kadiogo.

Ouagadougou a un climat semi-aride chaud. Les températures quotidiennes moyennes en ce lieu se situent entre 24 °C et 42 °C. La saison des pluies du pays couvre la période de mai/juin à septembre. Pendant cette période, les précipitations se situent entre 600 et 900 mm. Le climat est en ce moment chaud et humide avec des températures maximales comprises entre 40 et 45 °C. La saison sèche dure environ huit mois. Il est caractérisé par un vent chaud et sec appelé Harmattan. Durant cette période, la ville connaît les températures les plus élevées avec des températures quotidiennes supérieures à 40 °C. Le vent est frais de novembre à février et produit des températures quotidiennes autour de 25 °C. Le rayonnement solaire moyen du pays d'environ 5,8 kWh · m<sup>-2</sup> · jour<sup>-1</sup> est une valeur élevée par rapport à celui d'autres pays du monde [117]. La période de janvier à mars correspond à la période d'humidité relative la plus basse, avec des valeurs moyennes respectives de 22 %, 20 % et 20 %. L'humidité relative la plus élevée, 79 %, se produit au mois d'août. La vitesse moyenne mensuelle du vent est comprise entre 2 et 3 m · s<sup>-1</sup> et la direction du vent varie au cours de l'année.

### **1.5.3 Etudes bioclimatiques au Burkina Faso**

Peu de recherches à ce jour se sont focalisées sur la réalisation de l'architecture bioclimatique au Burkina Faso. Les travaux de Jannot et Djiako [1] et ceux de Yézouma et al. [2] figurent parmi les premières publications réalisées au Burkina Faso sur l'applicabilité du concept de bioclimatisme. Dans la seconde étude, les auteurs ont présenté une analyse critique du bioclimatisme dans trois villes du Burkina Faso, correspondant chacune à une zone

climatique différente. Ces villes sont Dori (zone semi-désertique), Ouagadougou et Bobo-Dioulasso (zone tropicale humide).

L'analyse des conditions climatiques a été faite sur un diagramme bioclimatique de Givoni (Figure 1.7). Les résultats montrent que l'inertie thermique associée à la ventilation nocturne et la protection solaire permettent des conditions thermiques acceptables dans les bâtiments. Toutefois, les besoins liés à ces trois stratégies passives varient suivant les mois. Un compromis est aussi nécessaire durant les périodes humides de sorte à accroître les débits d'air au travers des ouvertures tout en minimisant les apports solaires internes. Le refroidissement par évaporation est une technique peu employée dans le pays dont les bénéfices pourraient supprimer la climatisation si les recommandations précédentes sont appliquées.

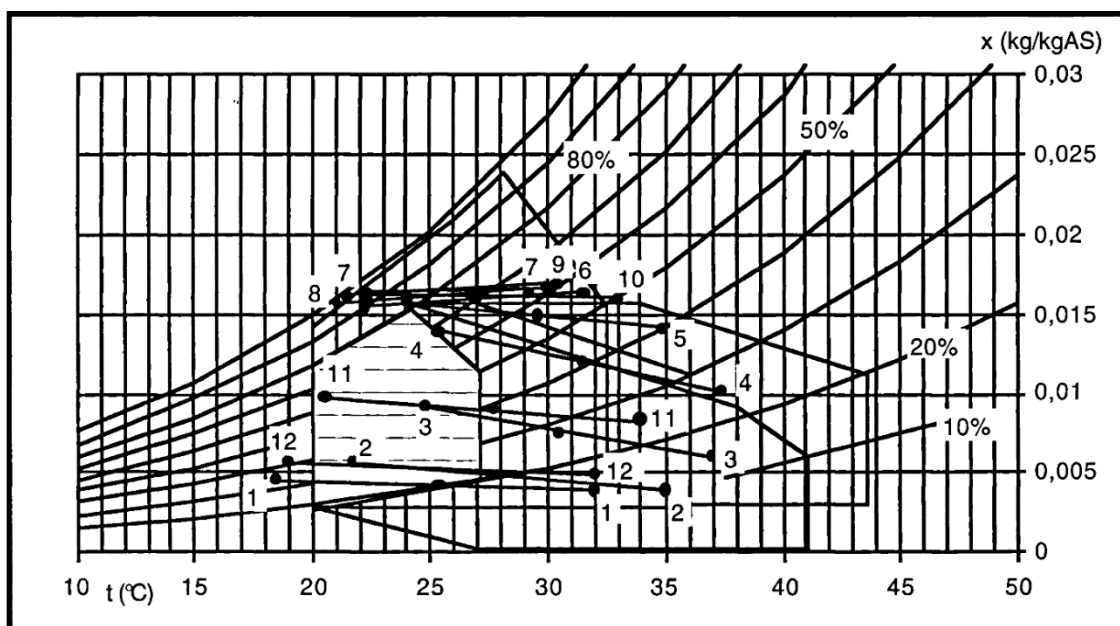


Figure 1.7: Diagramme bioclimatique de Givoni pour la ville de Ouagadougou [2]

## Conclusion

En résumé, ce chapitre a permis de mettre en exergue les origines de l'architecture bioclimatique, les différentes stratégies bioclimatiques notamment passives, et l'intérêt de l'architecture bioclimatique dans le monde avec un focus sur l'Afrique. Bien que l'architecture bioclimatique ait été découverte dans les années 1950, elle suscite toujours l'intérêt des scientifiques et même des décideurs pour la mise en œuvre de stratégies économiques assurant un équilibre sain entre l'homme, son environnement et son climat. Les différentes autres formes d'architecture récentes, même si souvent plus complexes, intègrent le plus souvent les principes clés de l'architecture bioclimatique. Aussi, l'Afrique subsaharienne devra développer ses

capacités de recherche à l'instar des pays du Maghreb pour impulser le développement de stratégies bioclimatiques à l'échelle africaine.



## **Chapitre 2 : Modèle et expérimentation**

## Introduction

Ce chapitre traite en premier de l'expérimentation du bâtiment pilote. Cette partie incorpore une description du bâtiment pilote, les conditions d'expérimentation et une présentation des moyens d'instrumentation. En second lieu, la modélisation des mécanismes de transfert de chaleur, les critères de validation du modèle de même que les facteurs d'inertie thermique et de confort thermique sont présentés.

## 2.1 Expérimentation

### 2.1.1 Présentation de la plateforme

L'expérimentation a été réalisée sur la plateforme des bâtiments bioclimatiques de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement (2iE). Les coordonnées géographiques du lieu sont : latitude  $12^{\circ} 27' 49''$  nord ; longitude  $1^{\circ} 33' 13''$  ouest et altitude 299 m. Cette plateforme est située à Kamboinsin, à 17 km environ au nord de Ouagadougou. L'objectif visé à travers cette plateforme est de contribuer au développement de bâtiments à faible coût, assurant le confort thermique et répondant aux exigences de l'architecture bioclimatique. La valorisation des matériaux locaux est aussi prise en compte en vue de la production de matériaux écologiques et durables avec de hautes performances mécaniques et thermiques. La construction sur un même site de ces bâtiments permet de comparer de façon expérimentale diverses variantes de maisons exposées aux mêmes conditions météorologiques.

La plateforme expérimentale compte à ce jour trois bâtiments (Figure 2.1).

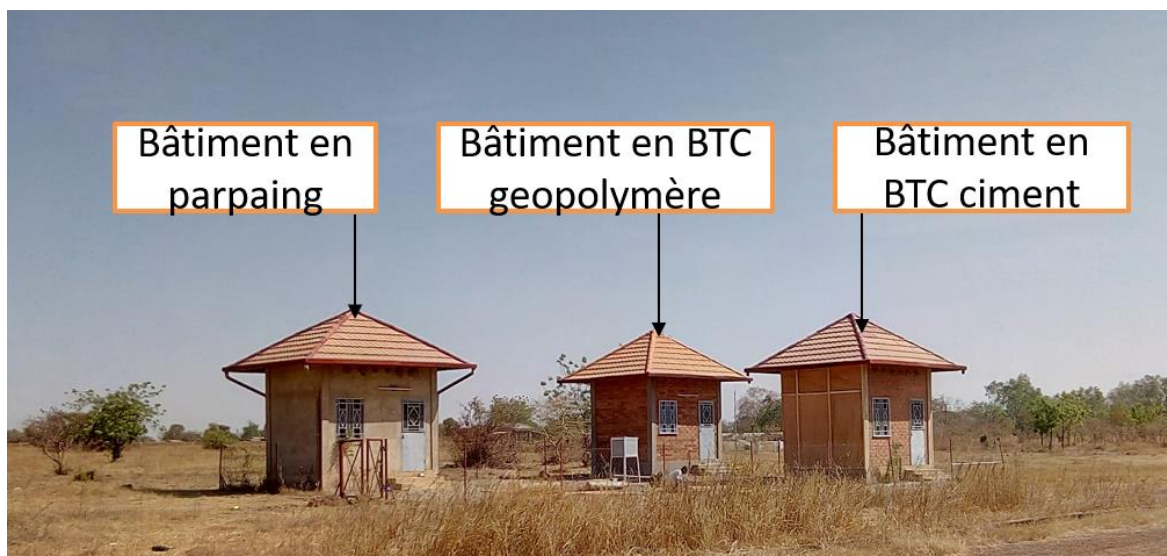


Figure 2.1 : Bâtiments pilotes de la plateforme expérimentale bioclimatique du 2iE

Les bâtiments sont réalisés sur un terrain plat où ils sont à l'abri de toute forme d'ombrage par des arbres ou de création de microclimats liés à la présence de cours d'eau par exemple. Le bâtiment en BTC stabilisées au ciment est celui qui fait l'objet de la présente étude. Dans la suite du document, il est aussi désigné par le terme de « bâtiment pilote ». Les BTC sont des matériaux obtenus par le compactage dans une presse d'une terre latéritique adéquate pour donner un bloc régulier aux arêtes vives. L'ajout d'un stabilisant (ciment, chaux ou bitume) rend les BTC résistants à l'abrasion et moins sensibles aux effets érosifs de l'eau. Le compactage leur permet d'acquérir la résistance mécanique nécessaire à leur utilisation.

### 2.1.2 Présentation du bâtiment pilote

La Figure 2.2 montre une vue de face et de profil du bâtiment pilote.



Figure 2.2 : Bâtiment pilote a) façade Sud b) façade Ouest

Le bâtiment pilote a pour dimensions externes (L x l x H) : 4,06 m x 3,06 m x 4,33 m. La Figure 2.3 présente la vue de dessus et une coupe des bâtiments. Les matériaux utilisés pour les différentes composantes de l'enveloppe des bâtiments à l'exception des BTC sont les plus utilisés dans les constructions locales. Le comble est naturellement ventilé par six claustras de 10 cm de diamètre sur chacune des façades sud et nord. Les façades Nord et Sud possèdent chacune une fenêtre de 1,00 m de large et 1,20 m de haut. L'unique porte de 0,85 m de large et 2,20 m de haut est sur la façade Sud. Elle est faite d'une partie métallique et d'un vitrage identique à celui des fenêtres dans sa partie supérieure. Le plancher est un remblai de latérite de 40 cm recouvert d'une chape de 10 cm de ciment. La toiture est en tôle de 1,5 mm et le plafond en bois contreplaqué de 5 mm.

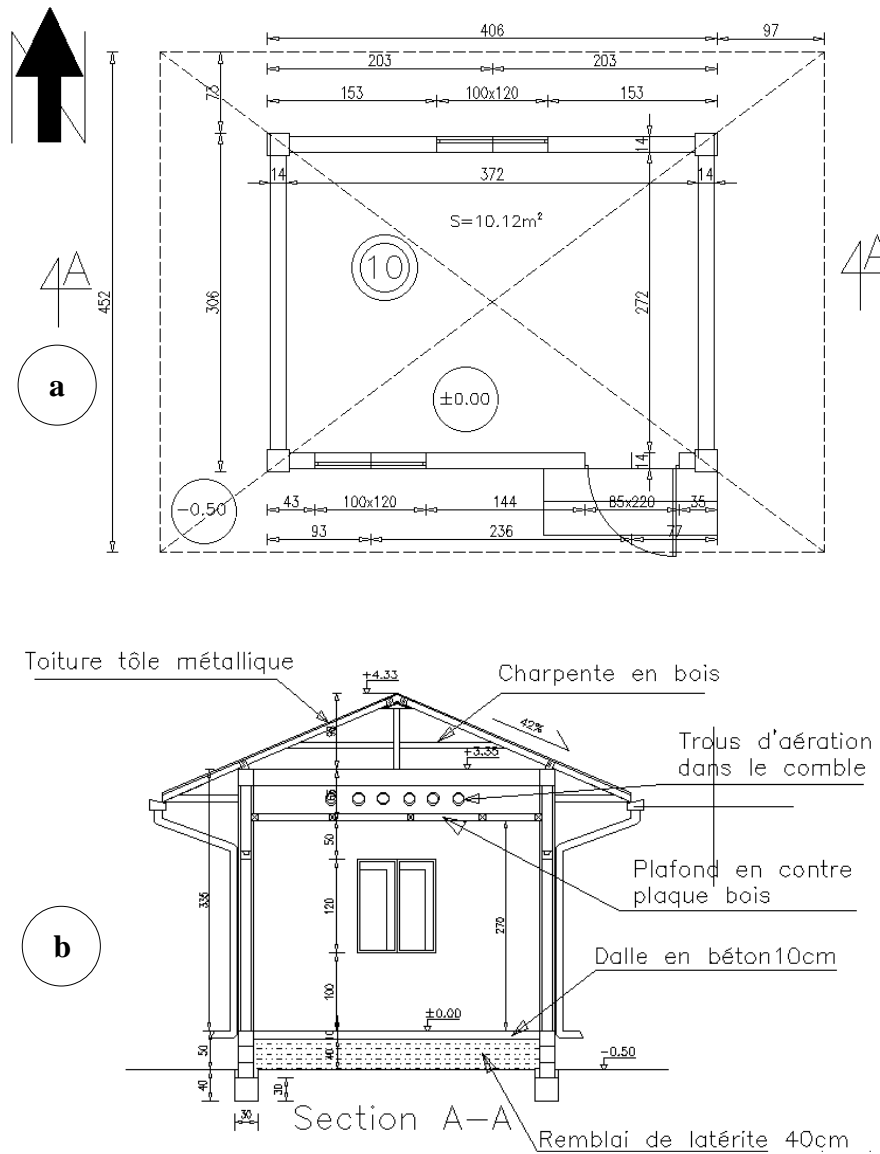


Figure 2.3 : Plans des bâtiments pilotes a) vue de dessus b) coupe verticale

Les superficies des différentes composantes de l'enveloppe sont fournies dans le Tableau 2.1. Les murs constituent les matériaux les plus exposés aux conditions extérieures en raison de leur superficie. Aussi, le vitrage représente la surface la plus petite de l'enveloppe. Toutefois, le vitrage de même que sa position sur l'enveloppe revêtent une importance particulière dans cette étude du fait que le vitrage laisse directement pénétrer le rayonnement solaire dans le bâtiment.

Tableau 2.1 : superficie des éléments de l'enveloppe du bâtiment pilote

	Plancher	Toiture	Murs	Fenêtre	Plafond
Superficie nette (m <sup>2</sup> )	10,12	13,85	50,56	3,34	10,12

Le Tableau 2.2 montre le ratio fenêtre-mur suivant les quatre points cardinaux.

Tableau 2.2 : Ratio Fenêtre-mur du bâtiment pilote

	Nord	Est	Sud	Ouest	Total
Surface brute du mur [m <sup>2</sup> ]	15,40	11,55	15,40	11,55	53,90
Surface de vitrage [m <sup>2</sup> ]	1,20	0,00	2,14	0,00	3,33
Ratio fenêtre-mur [%]	7,79	0,00	13,86	0,00	6,19

Les valeurs du ratio sont inférieures à 15 %, valeur recommandée pour ce climat [2]. Le volume de la zone habitable du bâtiment pilote est de 38,40 m<sup>3</sup> et celui du comble de 11,72 m<sup>3</sup>, d'où le volume total de 50,12 m<sup>3</sup>. La zone du comble, environ un quart du volume total, assure une protection contre les effets néfastes du rayonnement solaire. On note que ces apports thermiques sont en général les plus importants du fait de la conductivité très élevée de la toiture et de la course du soleil. Les débords de toiture de 97 cm de part et d'autre des bâtiments contribuent aussi à la protection solaire des murs et fenêtres. Le plancher et les murs sont les éléments qui participent à l'inertie thermique.

À partir d'un raisonnement en régime stationnaire, l'énergie nécessaire pour faire monter la température de l'enveloppe du bâtiment pilote de 1 °C (produit de la masse volumique, de la chaleur massique et du volume de matériaux) est évaluée à 15 605 kJ (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Capacité thermique du bâtiment pilote en régime stationnaire

Volume	masse volumique	Chaleur massique	Capacité thermique
Mur	7,08	1963	13 700
Plancher	1,01	2240	1 904
Total			15 605

Cette énergie rapportée à l'aire des murs du bâtiment est égale à 85 Wh/m<sup>2</sup>. Ainsi, de sensibles variations en température des parois peuvent correspondre à des différences notables en termes d'énergie stockée dans les matériaux.

### 2.1.3 Instrumentation

L'instrumentation a été réalisée avec des enregistreurs de température miniaturisés programmables (thermopuces) et de température et humidité relative (thermohygropuces) du

fabricant WaraNet Solutions. Les thermopuces sont faites de thermomètre de modèle P650 avec une sonde de température PT100. Elles respectent la norme EN 12 860 et ont une incertitude de 0,36 °C. Les thermohygropuces sont constituées de thermomètre de modèle P655 avec une sonde PT100 pour la mesure de température et d'un hygromètre de modèle Rotronic HC2 pour la mesure de l'humidité relative. Les thermohygropuces ont une incertitude de 0,12 °C pour la température et 2 % pour l'humidité relative. Les différentes incertitudes mentionnées tiennent compte de la sonde, du système d'acquisition et du logiciel de mise en œuvre. Les données sont enregistrées dans les puces et extraites à l'aide du logiciel de mise en œuvre Warito II, fourni par le fabricant.

Les thermopuces enregistrent les températures de surface et les thermohygropuces les températures intérieures des différentes zones thermiques (Figure 2.4).

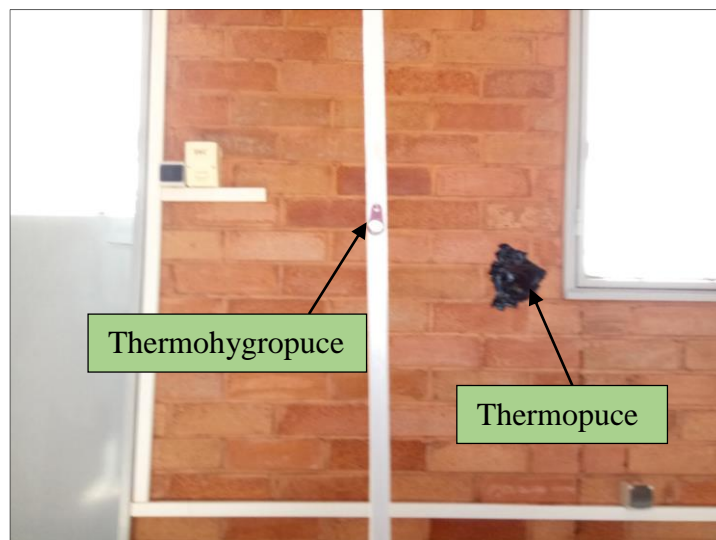


Figure 2.4: Enregistreurs de température et d'humidité

Les thermopuces des murs sont positionnées en hauteur à 1,1 m du sol. Ces puces sont isolées par des couches de laines de verre recouvertes d'un ruban adhésif pour éviter toute influence radiative avec l'environnement immédiat. Les thermohygropuces ont été placées au centre dans les zones du bâtiment et du comble respectivement à 1,1 m et 0,40 m de hauteur. Elles sont en contact avec le volume d'air supposé à une température constante. En effet, la convection et la ventilation qui sont faibles pour un bâtiment totalement fermé permettent de négliger les effets de stratification.

Les conditions météorologiques de la plateforme du bâtiment ont été obtenues à l'aide d'un système Vaisala HydroMet MAWS100. La station météo se trouve à environ 100 m de la plateforme. Les variables météorologiques suivantes sont mesurées : température extérieure, humidité relative extérieure, vitesse et direction des vents. Les irradiances solaires globale et

diffuse sur le plan horizontal ont été chacune mesurées par un pyranomètre monté sur un système de suivi solaire. La température de l'air extérieur et l'humidité relative sont mesurées par des capteurs protégés par le Vaisala Radiation Shield Series DTR500. La vitesse et la direction du vent sont enregistrées à l'aide de capteurs spécifiques. La Figure 2.5 montre différentes vues de la station météo. Une attention particulière a été portée sur les pyromètres, le capteur d'humidité et de température de même que la centrale d'acquisition de données.

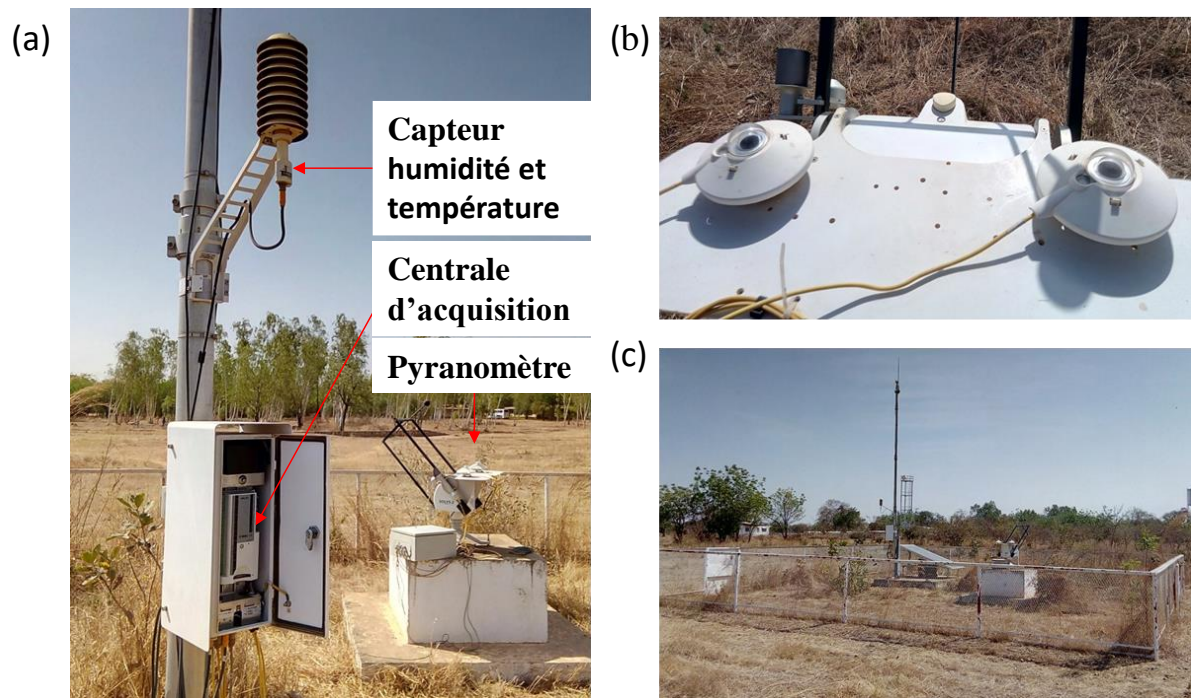


Figure 2.5 : Station météo a) vue des équipements principaux b) vue des pyranomètres c) vue d'ensemble

Le système d'acquisition des données utilisé est le Vaisala Data Logger QML201C. Les données collectées au niveau de la plateforme expérimentale et de la station météo sont ensuite organisées en base de données horaires. L'ensemble du dispositif de collecte et de traitement de données est schématisé sur la Figure 2.6.

### 2.1.4 Méthodologie expérimentale

Le bâtiment pilote fonctionne en évolution libre. Son comportement est alors fonction de la réponse thermique de l'enveloppe face aux sollicitations météorologiques. Le bâtiment est aussi inoccupé, maintenu clos et sans aucun apport calorifique interne durant toute l'expérimentation. Ces choix permettent d'éviter les sources de fluctuations incontrôlées liées à l'occupation qui pourraient jouer sur le climat intérieur. Toutefois, le bâtiment est équipé

d'un brasseur d'air et de trois lampes fluorescentes de 120 cm, dont l'une est à l'extérieur du bâtiment. L'intégration du comportement humain reste aussi possible grâce aux outils de simulation thermique qui permettent d'en tenir compte pour évaluer le confort thermique et la qualité de l'environnement intérieur du bâtiment.

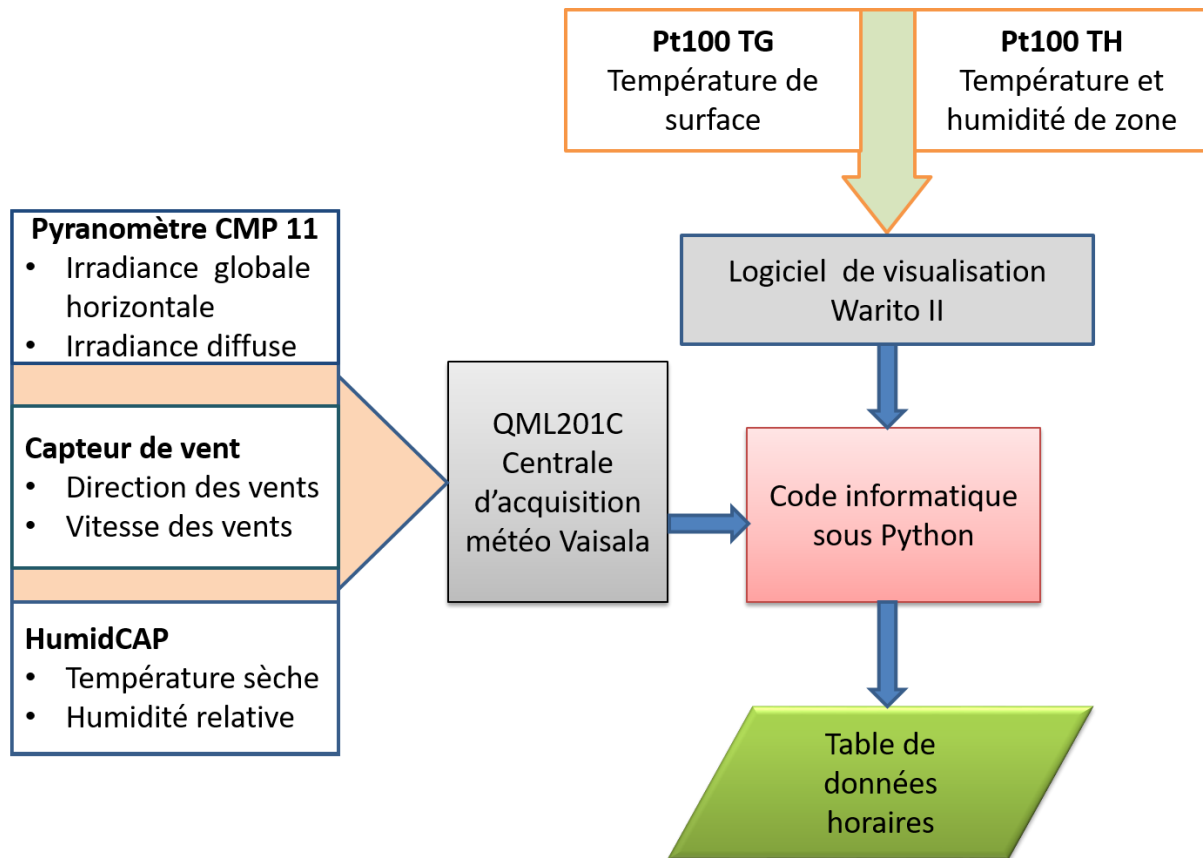


Figure 2.6: Dispositif de collecte et traitement des données

## 2.2 Modélisation des échanges de chaleur et de masse

La Figure 2.7 schématise les modes de transfert de chaleur qui ont lieu dans le bâtiment. On retient de l'illustration que le bâtiment échange de la chaleur par conduction, convection et rayonnement avec les environnements internes et externes.

Les principales sollicitations externes sont le rayonnement solaire (rayonnement à courtes longueurs d'onde), le rayonnement à longues longueurs d'onde, la température ambiante, l'humidité extérieure, le vent et les échanges par convection.



Les sollicitations intérieures regroupent l'ensemble des sources de génération de chaleur comme celles d'éventuels occupants. Cette section s'intéresse à décrire les différentes méthodes de calcul des transferts de chaleur du bâtiment pilote.

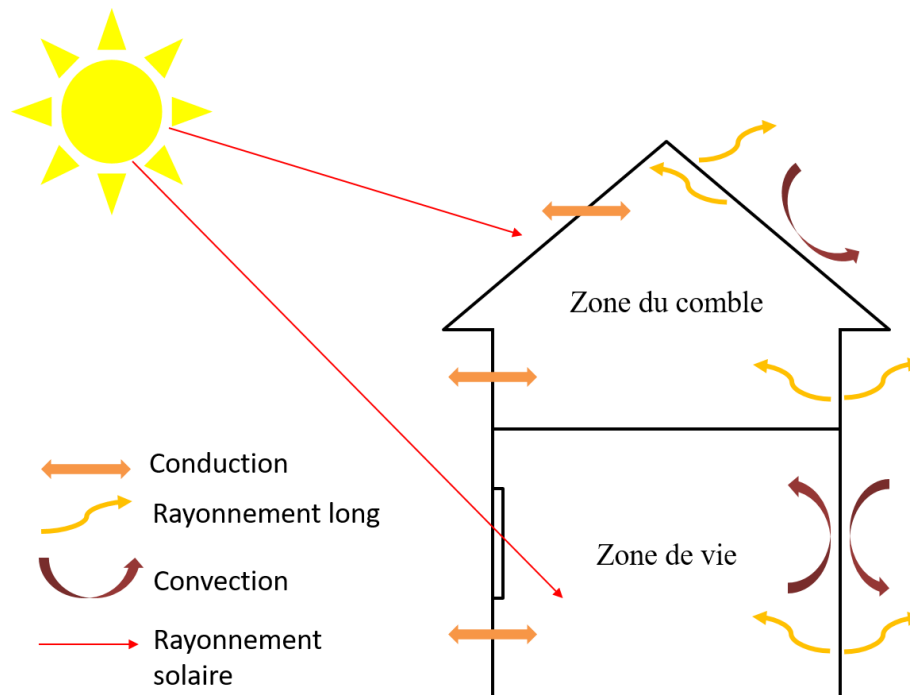


Figure 2.7 : Zones thermiques du bâtiment pilote

### 2.2.1 Conduction

La conduction en régime transitoire est considérée à une seule dimension dans le cadre de ces travaux. Les matériaux sont considérés comme homogènes avec des propriétés thermiques constantes. Suivant la loi de Fourier, la conduction est évaluée comme mentionnée dans l'équation Eq. 2.1.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Avec :

- T : température
- x : dimension spatiale de conduction
- t : temps
- $\alpha$  : la diffusivité thermique.

Cette équation est résolue ici suivant la méthode de fonction de transfert pour obtenir un modèle de conduction CTF issu de l'anglais « Conduction Transfer Function ». Cette méthode

évalue les conditions aux frontières avec les variables de température et flux. Ce modèle est recommandé par Yang et al. [118] pour le climat chaud et sec. Suivant le modèle CTF, le flux de chaleur sur l'une des surfaces de paroi est calculé comme une somme pondérée de températures actuelles ; et de températures et flux antérieurs observés sur l'autre surface de paroi (Eq. 2.2) [118]. L'utilisation de cet algorithme nécessite la détermination préalable des coefficients de pondération utilisés dans l'équation. Ces coefficients dépendent des propriétés thermophysiques des matériaux et sont des constantes. Le nombre de coefficients dépend aussi de la nature du matériau. Giaconia et Orioli [120] ont réalisé une étude approfondie sur les fondements théoriques de la méthode CTF, le calcul du nombre de coefficients nécessaires et la fiabilité des résultats. Dans la résolution utilisant la méthode des fonctions de transfert de conduction,  $nz$  et  $nq$  sont respectivement les nombres des coefficients CTF de température et de flux.

$$q''_{k,in}(t) = -Z_{ex}T_{in,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{in,t-j\delta} + Y_{ex}T_{ex,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{ex,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{k,in,t-j\delta} \quad (\text{Eq. 2.2.1}) [119]$$

$$q''_{k,ex}(t) = -Y_{ex}T_{in,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{in,t-j\delta} + X_{ex}T_{ex,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{ex,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{k,ex,t-j\delta} \quad (\text{Eq. 2.2.2}) [119]$$

Avec :

- $q''_{k,in}$  : densité de flux de conduction sur la surface interne
- $q''_{k,ex}$  : densité de flux de conduction sur la surface externe
- $X_j$  : coefficient de température CTF extérieur
- $Y_j$  : coefficient de température CTF croisé pour les milieux intérieur et extérieur
- $Z_j$  : coefficient de température CTF intérieur
- $\Phi_j$  : coefficient de flux CTF
- $T_{in}$  : température intérieure de la surface de paroi
- $T_{ex}$  : température extérieure de la surface de paroi
- $nz$  : nombre de coefficients de température
- $nq$  : nombre de coefficients de flux
- l'indice suivant la virgule indique la période de temps pour la quantité en termes de pas de temps  $\delta$ .

## 2.2.2 Convection

La densité de flux de convection est évaluée comme le montre l'équation Eq. 2.3.

$$q''_{conv} = h_{conv} (T_{surf} - T_{air}) \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Avec :

- $q''_{conv}$  : densité de flux de convection
- $h_{conv}$  : coefficient de convection
- $T_{surf}$  : température de surface
- $T_{air}$  : température de l'air

Plusieurs recherches ont proposé des méthodes de calcul du coefficient de convection [121]. Toutefois, les disparités sont notables d'une méthode à une autre comme l'ont démontré les investigations de Mirsadeghi et al. [122] sur les méthodes d'estimation des coefficients de convection. Suivant ces travaux de revue bibliographique, le modèle proposé par ASHRAE pour la convection extérieure est le plus complet en termes de nombre de paramètres considérés. C'est ce modèle qui est retenu ici pour évaluer les échanges de chaleur par convection externe et interne [119], [123]. Il évalue le coefficient global de convection sur la face extérieure (Eq. 2.4) comme une somme de composantes forcée (Eq. 2.5) et naturelle (Eq. 2.6). Le coefficient de convection intérieure ici est équivalent à celui d'un cas de convection naturelle.

$$h_{conv} = h_{for} + h_{nat} \quad (\text{Eq. 2.4}) [119]$$

Avec :

$h_{conv}$  : coefficient global de convection

$h_{for}$  : coefficient de convection forcée

$h_{nat}$  : coefficient de convection naturelle

### Convection forcée

Le coefficient de convection forcée est évalué comme suit :

$$h_{for} = 2,537 W R_u \left( \frac{P V}{A} \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. 2.5}) [119]$$

Avec :

- W : multiplicateur de direction du vent,
- V : vitesse du vent
- A : surface
- P : périmètre de la surface
- $R_u$  : coefficient de rugosité de surface

#### Convection naturelle

Le coefficient de convection naturelle est fonction de la différence de température entre la surface et l'air ( $\Delta T = T_{\text{surf}} - T_{\text{air}}$ ) et de l'angle d'inclinaison de la surface par rapport au sol  $\varphi$  (pour un mur vertical  $\varphi = 90^\circ$ ). Les expressions suivantes permettent le calcul du flux convectif naturel suivant différents scénarios :

- Pour une surface verticale

$$h_{\text{nat}} = 1,31 |\Delta T|^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 2.6.1})$$

- Pour une surface orientée vers le haut avec  $\Delta T < 0$  ou orientée vers le bas avec  $\Delta T > 0$

$$h_{\text{nat}} = \frac{9\,482 |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{7\,283 - |\cos \varphi|} \quad (\text{Eq. 2.6.2})$$

- Pour une surface orientée vers le haut avec  $\Delta T > 0$  ou orientée vers le bas avec  $\Delta T < 0$

$$h_{\text{nat}} = \frac{1,810 |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{1,382 + |\cos \varphi|} \quad (\text{Eq. 2.6.3})$$

### 2.2.3 Échange par rayonnement à grandes longueurs d'onde

Le rayonnement à grande longueur d'onde correspond ici à tout rayonnement émis d'un corps de température autour de 300 K. Le bâtiment échange du rayonnement à grande longueur d'onde avec le ciel, le sol, l'air extérieur et tout autre élément de l'environnement extérieur. L'échange de chaleur dépend de la puissance émissive de chaque surface qui est fonction de la température de la surface, l'émissivité, la constante de Boltzmann et la surface.

#### Modèle sur la face extérieure

Le calcul de l'échange de chaleur par ondes longues repose ici sur les hypothèses suivantes [123] :

- Chaque surface émet ou réfléchit de manière diffuse et est grise et opaque
- Chaque surface est à une température uniforme
- Le flux d'énergie quittant une surface est uniformément réparti sur la surface,
- Les températures du sol et du ciel sont identiques

L'expression (Eq. 2.7) montre l'évaluation de l'échange de chaleur entre le bâtiment et les milieux extérieurs.

$$q_{long,ex}'' = \varepsilon \sigma F_{sol} (T_{sol}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{ciel} (T_{ciel}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{air} (T_{air}^4 - T_{surf}^4) \quad \text{Eq. 2.7}$$

Avec :

- $q_{long,ex}''$  : densité de flux d'échange de rayonnement long avec le milieu extérieur
- $F_{ciel}$  : facteur de forme de la surface du mur par rapport au ciel
- $F_{air}$  : facteur de forme de la surface du mur par rapport à l'air extérieur
- $F_{sol}$  : facteur de forme de la surface du mur par rapport au sol
- $\varepsilon$  : émissivité de surface
- $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann

Les différents facteurs de forme sont évalués suivant les hypothèses de Walton [123] comme l'indique l'équation Eq. 2.8.

$$\begin{cases} F_{sol} = 0,5 (1 - \cos\varphi) \\ F_{ciel} = 0,5 \beta (1 + \cos\varphi) \\ F_{sol} = 0,5 (1 - \beta) (1 + \cos\varphi) \end{cases} \quad \text{(Eq. 2.8) [119]}$$

Avec :

$\beta = \sqrt{0,5 (1 + \cos\varphi)}$  où  $\varphi$  est l'angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale

#### Modèle sur la face interne

Les surfaces de paroi sont supposées grises avec une inter réflexion de rayonnement à ondes longues. Le calcul du rayonnement long à l'intérieur du bâtiment est réalisé avec le concept « ScriptF » développé par Hottel [119]. Il s'agit d'un modèle basé sur un échange gris de rayonnement de longues longueurs d'onde entre les surfaces de zone tel que présenté à l'équation 2.9. Cette procédure repose sur une matrice de coefficients d'échange entre des paires de surfaces qui incluent tous les chemins d'échange entre les surfaces. Une description complète du concept « ScriptF » a été élaborée dans les travaux de Hottel et Sarofim [121].

$$q_{long,in}'' = A_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Avec  $F_{i,j}$  est le facteur scriptF entre les surfaces i et j.

## 2.2.4 Échange par rayonnement à courtes longueurs d'onde

✚ Equation sur la face externe

Le rayonnement à courtes longueurs d'onde représente ici un rayonnement émis par un corps noir de température voisine de 6000 K soit le soleil pour notre étude. L'influence des rayonnements solaires est fonction des propriétés optiques des matériaux opaques, de la course du soleil, de la location du site, angle et inclinaison de la surface et des conditions météorologiques. Les hypothèses ici concernent une répartition uniforme du rayonnement solaire sur toutes les surfaces et l'utilisation du modèle de Perez et al. [124] pour calculer le rayonnement solaire. En effet, l'étude de Perez et al. [125] a montré que ce modèle donne des résultats précis pour un large éventail de locations géographiques. Le rayonnement solaire est évalué suivant ces trois principales composantes : direct, diffus et réfléchis du sol ou albédo (Eq. 2.10).

$$q_{court,ex}'' = \alpha (I_{direct} \cos \theta \frac{A_{direct}}{A} + I_{diffus} F_{ciel} + I_{albedo} F_{sol}) \quad (\text{Eq. 2.10}) [119]$$

Avec :

- $q_{court,ex}''$  : flux de rayonnement à ondes courtes
- $\alpha$  : absorption solaire de la surface
- $\theta$  : angle d'incidence des rayonnements solaires par rapport à l'horizontale
- $A$  : Surface de la paroi
- $A_{direct}$  : Surface en plein soleil
- $I_{direct}$  : Intensité du rayonnement direct
- $I_{diffus}$  : Intensité du rayonnement diffus en provenance du ciel
- $I_{albedo}$  : albédo
- $F_{ciel}$  : facteur de forme entre la surface et le ciel
- $F_{sol}$  : facteur de forme entre la surface et le sol

Les facteurs de forme sont calculés dans les équations (Eq. 2.11) [119] où  $\phi$  est l'angle d'azimut solaire.

$$F_{ciel} = \frac{1 + \cos \phi}{2} \quad (\text{Eq. 2.11.1})$$

$$F_{sol} = \frac{1 - \cos \phi}{2} \quad (\text{Eq. 2.11.2})$$

Equation sur la face interne

Le rayonnement solaire transmis à l'intérieur du bâtiment est distribué sur l'ensemble des surfaces intérieures des murs et du plancher. L'équation (Eq. 2.12) donne la méthode d'évaluation du rayonnement solaire absorbé sur une surface interne du bâtiment.

$$q''_{court,in} = \alpha q''_{diffus} + \gamma q''_{direct} \quad (\text{Eq. 2.12) [119]}$$

Avec :

- $q''_{court,in}$  : densité de flux de rayonnement à courtes longueurs d'onde avec l'intérieur
- $q''_{diffus}$  : irradiance diffuse dans la zone
- $q''_{direct}$  : irradiance solaire normale du faisceau extérieur
- $\alpha$  : coefficient absorption de la surface
- $\gamma$  : facteur d'éclairement solaire du faisceau intérieur pour la surface

### 2.2.5 Débit d'infiltration

L'infiltration d'air dans le bâtiment concerne l'ensemble des débits d'air qui entrent dans le bâtiment de façon accidentelle au travers des composants de l'enveloppe comme les joints au niveau des fenêtres, de la porte et de la structure. La méthode la plus efficace pour déterminer le débit d'infiltration consiste à réaliser un test d'infiltrométrie. En effet, les spécificités propres à chaque bâtiment combinées aux caractéristiques complexes des forces motrices que sont la vitesse de vent et le tirage thermique rendent ce test utile pour une estimation précise. Toutefois, pour des raisons pratiques, le manuel de « ASHRAE Handbook: Fundamentals » a développé un modèle de prédiction du débit d'infiltration. Cette dernière méthode est celle retenue dans ces travaux par défaut d'un matériel adéquat pour réaliser un test d'infiltrométrie. Le débit d'infiltration d'air a été évalué dans Eq. 2.13 à l'aide du modèle de la zone de fuite effective [126] comme suit :

$$\dot{Q}_{inf} = \frac{A_{inf}}{1000} \sqrt{C_{tirage} \Delta T + C_{vent} (V_{vent})^2} \quad (\text{Eq. 2.13) [119]}$$

Où :

- $\dot{Q}_{inf}$  : débit d'infiltration

- $A_{inf}$  est la surface efficace de fuite d'air en  $cm^2$
- $C_{tirage}$  est le coefficient d'infiltration dû au tirage thermique
- $\Delta T$  est la différence de température absolue entre l'air intérieur et l'air extérieur,
- $C_{vent}$  est le coefficient d'infiltration dû à l'effet du vent
- $V_{vent}$  est la vitesse du vent

Les travaux de Amougou [127] ont permis de déterminer les différents coefficients pour l'application du modèle d'infiltration. Les surfaces efficaces de fuite ont été estimées à  $59,58 \text{ cm}^2$  et  $55,21 \text{ cm}^2$  respectivement pour la zone habitable et la zone du comble. Le coefficient d'infiltration dû au tirage thermique est aussi évalué à  $0,000145$  et celui dû à l'effet des vents à  $0,000246$ . Ces dernières valeurs sont valables pour les deux zones thermiques considérées.

## 2.2.6 Débit de ventilation naturelle

Le bâtiment pilote connaît une ventilation naturelle au niveau des claustrats des façades principales pour le refroidissement de la toiture du comble. Le modèle utilisé pour évaluer le débit de ventilation est celui fourni dans le manuel «ASHRAE Fundamentals Handbook 2009» [128]. L'équation 2.14 montre que le débit de ventilation est calculé en fonction de ses composantes liées au tirage thermique et à l'effet du vent.

$$\dot{Q}_{ventilation} = \sqrt{\dot{Q}_{tirage}^2 + \dot{Q}_{vent}^2} \quad (\text{Eq. 2.14}) [119]$$

- $\dot{Q}_{ventilation}$  : débit de ventilation
- $\dot{Q}_{tirage}$  : débit d'air dû au tirage thermique
- $\dot{Q}_{vent}$  : débit d'air dû à l'effet du vent

Le débit volumique d'air dû à l'effet du vent ( $\dot{Q}_{vent}$ ) est évalué suivant l'équation Eq. 2.15.

$$\dot{Q}_{vent} = E A_{vent} V_{vent} \quad (\text{Eq. 2.15}) [119]$$

Avec :

- $\dot{Q}_{vent}$  : Débit d'air généré par l'effet du vent [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
- $V_{vent}$  : vitesse du vent [m/s]
- $A_{vent}$  : Aire du trou d'aération [ $m^2$ ]
- $E$  : Effectivité de l'ouverture, paramètre calculé suivant Eq. 2.16 [119]



$$E = 0,55 - \frac{|\psi - \omega|}{180} * 0,25 \quad (\text{Eq. 2.16})$$

Avec :

- $\psi$  : angle effectif
- $\omega$  : angle de direction des vents

Le débit volumique d'air dû au tirage thermique est évalué suivant l'équation Eq 2.17.

$$\dot{Q}_{\text{tirage}} = C_{\text{decharge}} A_{\text{vent}} \sqrt{(2 g \Delta H (|T_{\text{in}} - T_{\text{ex}}|/T_{\text{in}}))} \quad (\text{Eq. 2.17}) [119]$$

Avec :

- $\dot{Q}_{\text{tirage}}$  : Débit d'air généré par tirage thermique [m3/s]
- $\Delta H$  : Hauteur du bâtiment
- $T_{\text{in}}$  : température de bulbe sec de l'air de la zone
- $T_{\text{ex}}$  : température de bulbe sec de l'air extérieur.
- $C_{\text{decharge}}$  : coefficient de décharge de l'ouverture

Le coefficient de décharge de l'ouverture ( $C_{\text{decharge}}$ ) est calculé selon l'équation Eq 2.18.

$$C_{\text{decharge}} = 0,40 + 0,0045 |T_{\text{in}} - T_{\text{ex}}| \quad (\text{Eq. 2.18})$$

## 2.2.7 Bilan de chaleur pour les parois opaques

Les murs et autres parois opaques échangent de la chaleur par convection et par rayonnement avec leur environnement. La Figure 2.8 montre les différents transferts de chaleur qui se déroulent au niveau de toute paroi opaque. Les différents flux de chaleur au niveau des deux faces sont transmis au matériau par conduction au matériau. La face extérieure du mur échange de la chaleur par rayonnement avec le soleil et les corps environnants. Elle échange aussi par convection avec l'air atmosphérique. L'équation qui régit tous ces échanges est donnée par l'expression Eq. 2.19.

$$q''_{\text{court,ex}} + q''_{\text{long,ex}} + q''_{\text{conv,ex}} - q''_{\text{cond,ex}} = 0 \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Avec :

- $q_{long,ex}''$  : rayonnement à longues longueurs d'onde échangé avec l'extérieur
- $q_{cond,ex}''$  : conduction sur la face externe
- $q_{court,ex}''$  : rayonnement solaire absorbée sur la surface externe
- $q_{conv,ex}''$  : convection entre les surfaces externes et l'air extérieur

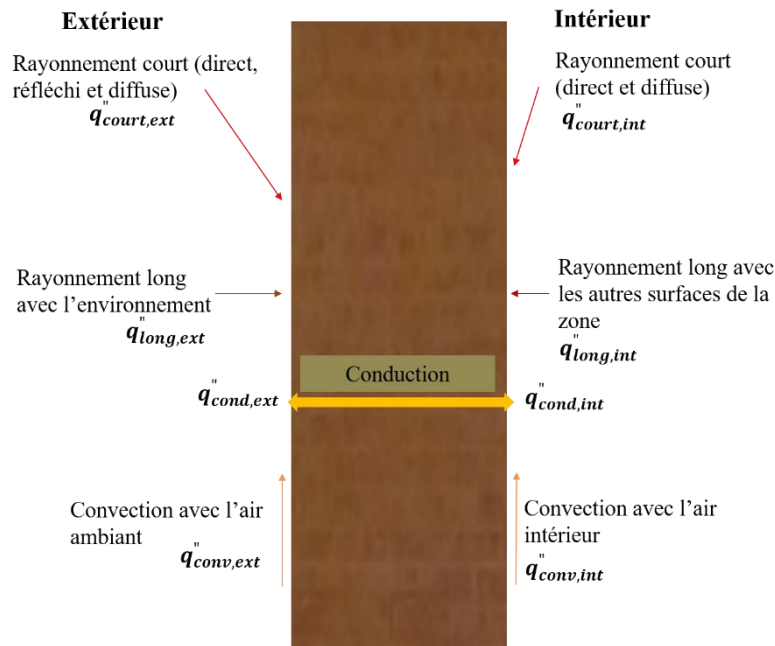


Figure 2.8: Flux de chaleur intervenant au niveau d'une paroi opaque

La face interne du mur échange de la chaleur par rayonnement avec les murs environnants. Elle échange aussi par convection avec l'air interne au local. L'équation (Eq. 2.20) qui régit tous ces échanges est donnée par :

$$q_{long,in}'' + q_{cond,in}'' + q_{court,in}'' + q_{conv,in}'' = 0 \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Avec :

- $q_{long,in}''$  : rayonnement à longues longueurs d'onde échangé entre surfaces internes
- $q_{cond,in}''$  : conduction sur la face interne
- $q_{court,in}''$  : rayonnement solaire absorbée sur la surface interne
- $q_{conv,in}''$  : convection de l'air avec les surfaces internes

## 2.2.8 Bilan de chaleur de la zone

Le bilan thermique du volume d'air intérieur du bâtiment dépend du renouvellement d'air par infiltration, la convection avec les parois internes de l'enveloppe et les gains internes de chaleur. L'équation de bilan thermique (Eq. 2.22) s'écrit alors comme suit :

$$m_{air}C_{p,air} \frac{dT_{in}}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{in}A_{in}(T_{surf,in} - T_{in}) + m_{inf}C_{p,air}(T_{ex} - T_{in}) + \sum Q_{in} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

- $C_{p,air}$  : Capacité thermique massique de l'air
- $T_{surf,in}$  : Température de surface intérieure
- $T_{in}$  : Température intérieure de zone
- $h_{in}$  : coefficient de convection de la surface intérieure
- $A_{in}$  : Aire de la surface intérieure
- $T_{ex}$  : Température de l'air extérieur
- $m_{air}$  : masse d'air de la zone
- $m_{inf}$  : masse d'air d'infiltration
- $Q_{in}$  : gains de chaleurs internes

## 2.2.9 Interdépendance des équations de transferts thermiques

La Figure 2.9 présente les interdépendances entre les différents modèles thermiques mis en œuvre dans le bilan de transfert de chaleur du bâtiment pilote. Alors que les gains thermiques par ventilation (au niveau du comble) et infiltration dépendent uniquement des conditions de la zone, les gains par convection interne nécessitent la résolution des bilans thermiques sur les faces internes et externes des parois opaques. Les flux solaires directs dans le bâtiment participent à ces calculs en influençant directement les températures internes des surfaces de paroi. Ici, on note que les températures aux frontières des composants interviennent dans plusieurs équations de transfert de chaleur. Par exemple, la température de la paroi extérieure intervient à la fois dans les équations de calcul de rayonnement, convection et conduction sur la paroi externe. De même, la température de la paroi intérieure intervient dans le calcul de la

convection, conduction et rayonnement de la paroi interne. De plus, les équations de convection et rayonnement ne sont pas linéaires par rapport à la température. Toutes ces considérations complexifient la résolution des équations mathématiques pour la simulation des conditions intérieures. Des méthodes de linéarisation ou de simplification sont alors appliquées pour déterminer les coefficients de transfert de chaleur. Par la suite, des méthodes itératives de résolution numérique sont employées pour prédire les conditions internes des zones. Il s'ensuit que les différentes températures impliquées dans divers modes d'échange s'influencent les unes les autres pour arriver à la fin à un équilibre global de toutes ces températures. La complexité des modèles mathématiques à résoudre instantanément combinée à la grande interdépendance des modèles justifie l'utilisation d'environnements de simulation thermique dynamique des performances énergétiques des bâtiments.

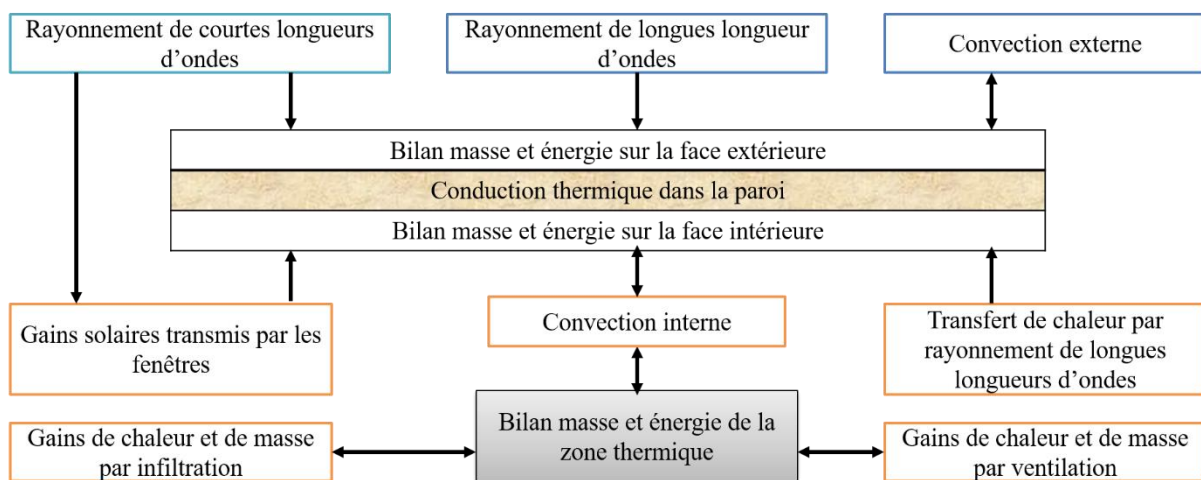


Figure 2.9: Diagramme des flux d'énergie du bilan thermique du bâtiment

## 2.3 Considérations complémentaires du modèle

### 2.3.1 Environnement d'implémentation du modèle mathématique du bâtiment

Le modèle physique du bâtiment a été implémenté dans le moteur de simulation dynamique EnergyPlus 9.0.1. EnergyPlus est issu des programmes de simulation BLAST et DOE-2. Il a une structure modulaire qui permet l'interopérabilité et le développement de compléments pour son extension. Le choix du moteur Energyplus repose ici sur les avantages suivants :

- qualités reconnues en termes de précision, fiabilité, flexibilité et interopérabilité

- outil en version libre le plus utilisée dans des études similaires ;
- large communauté d'utilisateurs, de développeurs et scientifiques pour l'édition de mises à jour et échange d'expertises.
- Facilité d'ajouts de sous-routines complémentaires

Cependant, EnergyPlus nécessite des connaissances spécialisées en physique du bâtiment et simulation dynamique y compris la programmation orientée objet pour une prise en main rapide. La qualité des résultats dépend de la disponibilité qualitative et quantitative de données, et de la compréhension des algorithmes de résolution des équations du modèle mathématique.

La Figure 2.10 montre la méthodologie d'utilisation d'EnergyPlus dans le cadre de cette étude.

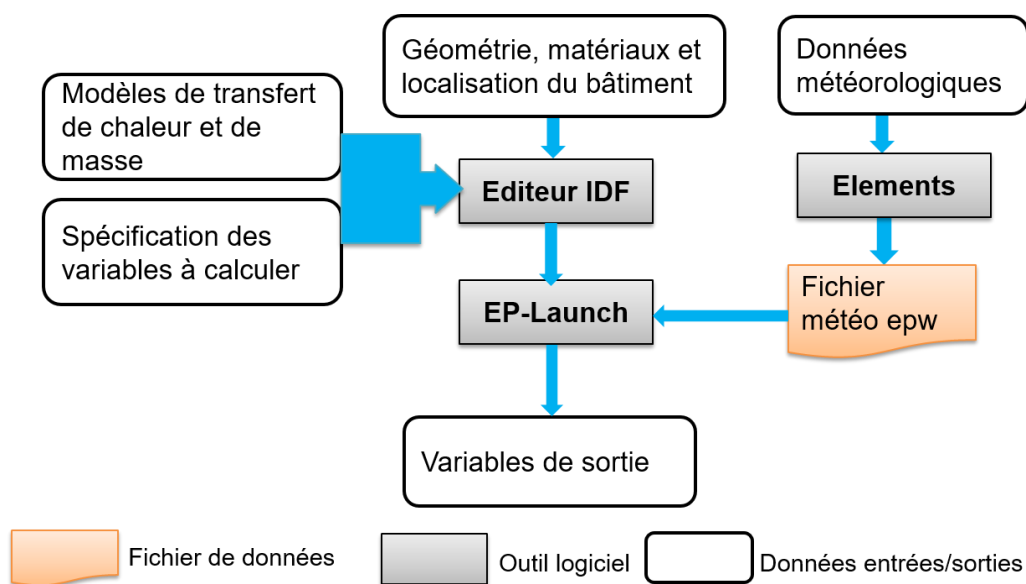


Figure 2.10: Méthodologie de simulation thermique dynamique avec Energyplus

Les données collectées concernent les matériaux, la localisation, les données météorologiques et l'architecture du bâtiment. Ces données sont par la suite introduites dans l'éditeur de fichier texte IDF pour créer un fichier exploitable par EnergyPlus. Les différentes méthodes de résolution numérique des équations mathématiques sont incluses dans la référence d'ingénierie de EnergyPlus [119].

La Figure 2.11 montre le modèle énergétique du bâtiment suivant ses différentes faces suite à la simulation thermique énergétique avec EnergyPlus.

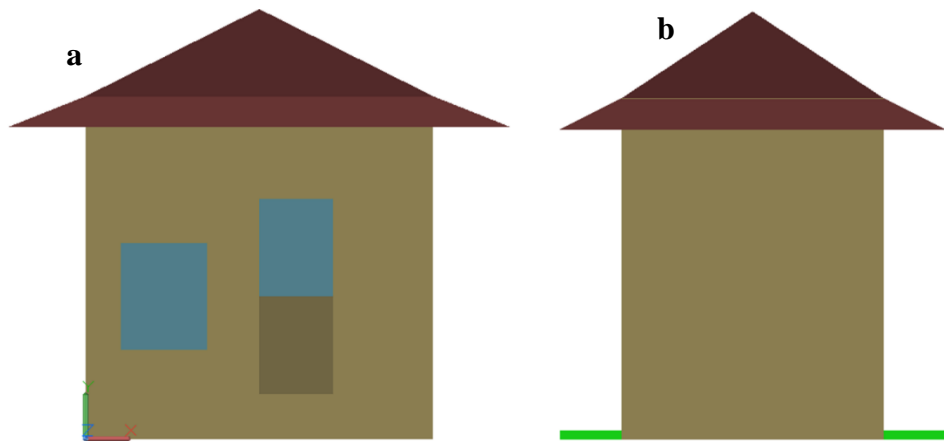


Figure 2.11:Modèle du bâtiment pilote sous EnergyPlus a) vue de face b) vue de profil

### 2.3.2 Prise en compte des masques solaires dans le modèle

L'analyse de l'impact des masques solaires utilise Climate Consultant pour concevoir les différents types de masques et EnergyPlus pour déterminer leurs performances thermiques. La complémentarité entre outils bioclimatiques simplifié et détaillé est mise en œuvre ici afin d'analyser l'influence des masques solaires. Les diagrammes solaires sont utiles pour choisir des dimensions acceptables des masques solaires. L'analyse est réalisée ici sur la base du diagramme solaire élaboré par Mazria [129]. Ce graphique est utilisé ici au travers de l'outil bioclimatique simplifié Climate Consultant qui l'intègre dans les graphiques disponibles. Le fichier climatique utilisé est celui de la ville de Ouagadougou disponible sous Meteororm qui incorpore 8760 heures de données.

Les exemples suivants montrent comment les données climatiques sont utilisées pour concevoir les masques solaires pour les fenêtres. La Figure 2.12 montre la course du soleil pour la ville de Ouagadougou. L'azimut est en abscisse et la hauteur en ordonnée. Les points en rouge, jaune et bleu correspondent respectivement à des températures extérieures supérieures à 27 °C, entre 20-27 °C et inférieures à 20 °C.

Les couleurs rouge, jaune et bleu sont ainsi utilisées par Climate consultant pour désigner les périodes chaudes (>27 °C), confortables (20-27 °C) et froides (<20 °C). Il est recommandé d'avoir des masques solaires couvrant tous les points en rouge et jaune pour réduire les gains thermiques dans le bâtiment. Le diagramme peut être tracé pour deux différentes périodes de l'année. La première va du 21 décembre au 21 juin (hiver et printemps) et la seconde du 21 juin au 21 décembre (été et automne).

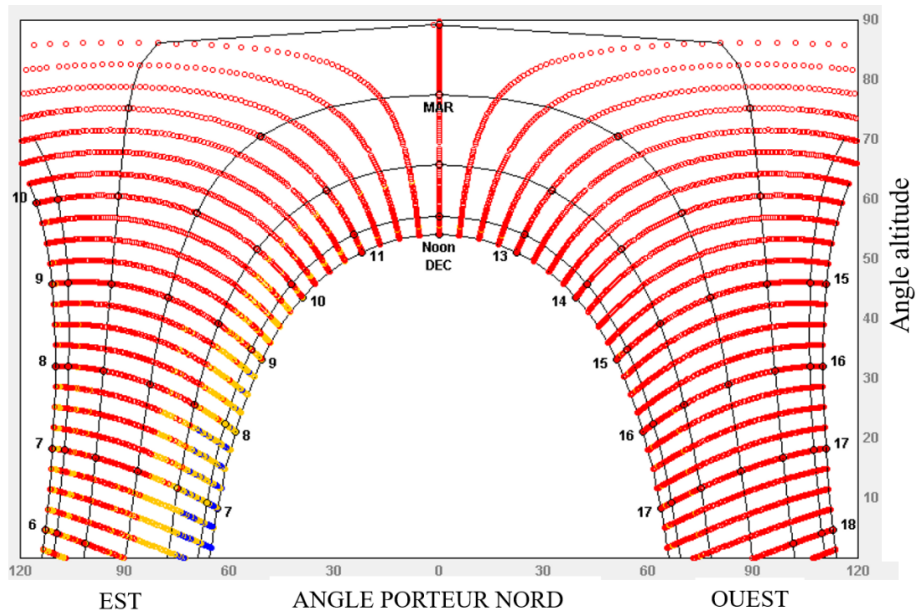


Figure 2.12 : Diagramme de la course solaire de Ouagadougou pour l'année climatique type

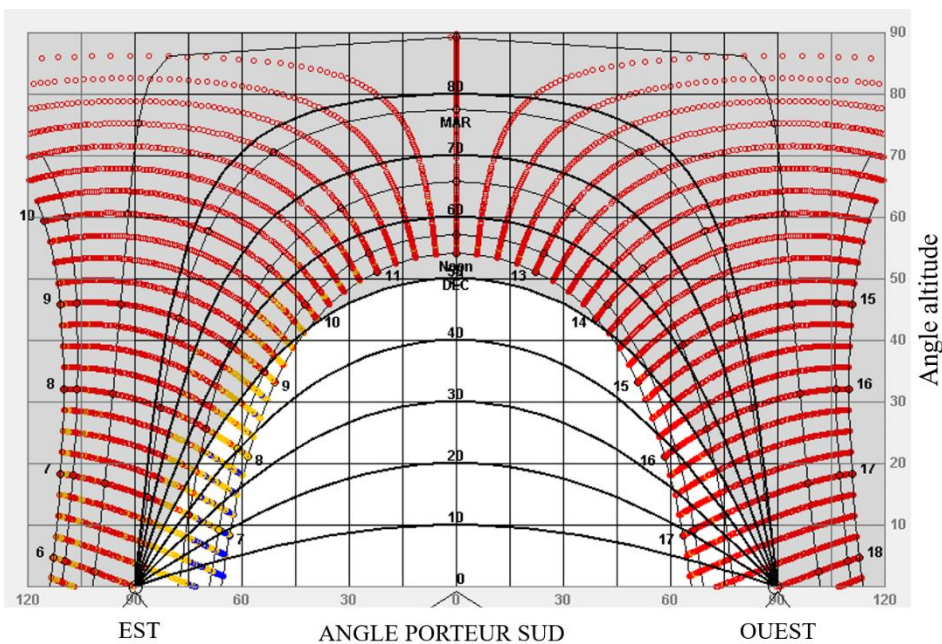


Figure 2.13: Diagramme d'ombrage du soleil montrant l'ombrage pour un masque solaire horizontal d'angle  $50^{\circ}$  en plein Sud

En utilisant différentes options disponibles dans Climate Consultant, la position de la fenêtre et les angles d'inclinaison des masques solaires par rapport à la fenêtre sont montrés sur la Figure 2.12. Par exemple, les lignes courbes supplémentaires de la Figure 2.13 comparativement à la Figure 2.12 permettent de lire l'angle d'inclinaison des masques solaires horizontaux/casquettes à partir du centre du rebord de la fenêtre. De même, les lignes verticales

supplémentaires servent à lire l'angle d'inclinaison des masques solaires latéraux avec le centre du rebord de la fenêtre.

### 2.3.3 Propriétés thermophysiques et optiques des matériaux

Les différentes propriétés thermophysiques et optiques du bâtiment pilote sont fournies dans le Tableau 2.4. Les propriétés optiques des matériaux tels que l'émissivité et l'absorption sont issues des travaux de Ojo et Lawal [130]. Les propriétés thermophysiques que sont la conductivité, la densité et la chaleur spécifique des BTC ont été mesurées dans le laboratoire génie civil du 2iE [131]. Les propriétés thermophysiques des autres matériaux à l'exception des BTC sont issues des travaux de Kabore et al. [132].

Tableau 2.4 : Propriétés thermophysiques et optiques des matériaux utilisés [130]–[132]

	$\lambda$	$\rho$	$C_p$	$\varepsilon$	$\alpha$
BTC	1,02	986	1 935	0,88	0,90
Enduit-ciment	1,4	2 240	840	0,90	0,65
Bois	0,15	1 200	500	0,90	0,70
Tôle	50	7 800	480	0,58	0,40
Paille	0,06	100	1 700	0,70	0,75
Chaux	1,2	1 600	1 000	0,35	0,45
Laine de verre	0,04	200	1,21	0,40	0,40

Le Tableau 2.5 présente les caractéristiques thermiques et optiques des vitrages proposés au niveau des fenêtres.

Tableau 2.5 : Propriétés des différentes technologies de vitrage

Élément	$e$	$\lambda$	$g$	$\tau_l$	$\varepsilon$	FSSR	BSSR	FSVR	BSVR
	[mm]	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Simple	3	0,9	0,099	0,155	0	0,219	0,219	0,073	0,073
REF A	6	0,9	0,066	0,08	0	0,341	0,493	0,41	0,37
REF B	6	0,9	0,15	0,2	0	0,22	0,38	0,23	0,33
REF C	6	0,9	0,11	0,13	0	0,25	0,49	0,28	0,42



REF D	6	0,9	0,429	0,334	0	0,308	0,379	0,453	0,505
ECREF	3	0,9	0,837	0,898	0	0,075	0,075	0,081	0,081

Avec :

- $e$  : épaisseur
- $\lambda$  : conductivité thermique
- $\rho$  : masse volumique
- $C_p$  : capacité thermique massique
- $g$  : facteur solaire
- $\tau_l$  : coefficient de transmission lumineuse
- $\varepsilon$  : émissivité dans l'infrarouge
- FSSR : facteur de réflexion solaire extérieur
- BSSR : facteur de réflexion solaire intérieur
- FSVR : facteur de réflexion lumineuse extérieur
- BSVR : facteur de réflexion lumineuse intérieur

Le vitrage « simple » est celui actuellement en place dans le bâtiment pilote. Tous les modèles de vitrage ont la même conductivité, donc les flux thermiques liés à la conduction ne varieront pas d'un vitrage à un autre. Les vitrages sont choisis de sorte à minimiser la transmittance solaire et maximiser la réflexion solaire. Les modèles adéquats suivant ces critères disponibles dans la base de données de EnergyPlus sont : REF A, REF B, REF C, REF D et ECREF. Les technologies de vitrage REF choisies sont celles recouvertes de métal sur une surface en vue d'accroître la réflexion du rayonnement solaire. Les métaux utilisés sont l'acier inoxydable dans REF A, le titane dans REF B, l'étain dans REF C et l'oxyde d'étain dans REF D. Le vitrage ECREF est un vitrage électrochimique qui noircit pour accroître la réflexion des rayons solaires. Les vitrages choisis sont aussi reconnus pour leur faible transmittance du flux solaire.

### 2.3.4 Paramètres d'évaluation du modèle

Deux principaux indicateurs statistiques ont été considérés pour la validation empirique du modèle. Ce sont le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) et le résidu absolu moyen ( $\epsilon$ ). Les résidus sont évalués par la différence entre températures simulées et températures mesurées. La valeur de  $R^2$  (Eq. 2.23.1) montre la qualité de corrélation ou proximité entre les données simulées et

mesurées. La valeur de  $\epsilon$  représente la moyenne des valeurs absolues entre températures mesurées et simulées (Eq. 2.23.2). Ce paramètre évite ainsi les éventuelles compensations entre valeurs négatives et positives de résidus.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_{sim,i} - T_{mes,i})^2}{\sum_{i=1}^n (T_{mes,i} - \overline{T_{mes,i}})^2} \quad (\text{Eq. 2.23.1})$$

$$\epsilon (\text{°C}) = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{sim,i} - T_{mes,i}|}{n} \quad (\text{Eq. 2.23.2})$$

**Avec :**

- $\epsilon$  : résidu absolu moyen
- $R^2$  : coefficient de corrélation
- $T_{sim}$  : Température horaire simulée
- $T_{mes}$  : Température horaire mesurée
- $n$  : durée de mesure
- $i$  pas de temps (ici  $i = 1h$ )

### 2.3.5 Déphasage et amortissement de l'onde thermique dans le bâtiment

L'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment caractérise la capacité de l'enveloppe à réguler le climat intérieur en amortissant et en déphasant les charges thermiques extérieures. Deux principaux indicateurs sont couramment utilisés pour évaluer l'influence de l'inertie thermique et de la conductivité. Ce sont le déphasage et le facteur d'amortissement (Figure 2.14).

Les deux indicateurs sont évalués entre les températures ambiantes extérieure et intérieure comme mentionnées dans Stéfan et al.[133]. Dans ce qui suit, les effets d'inertie thermique sont définis tel que présenté dans des études similaires comme la recherche de Pape Moussa Touré [134] sur l'écoconstruction en milieu tropical, la thèse de Salah Kachkouch [135] sur les toitures adaptées en climat chaud et les travaux de Layal Chahwane [136] sur la valorisation de l'inertie thermique avec une application sur la plateforme expérimentale INCAS de l'INES en France.

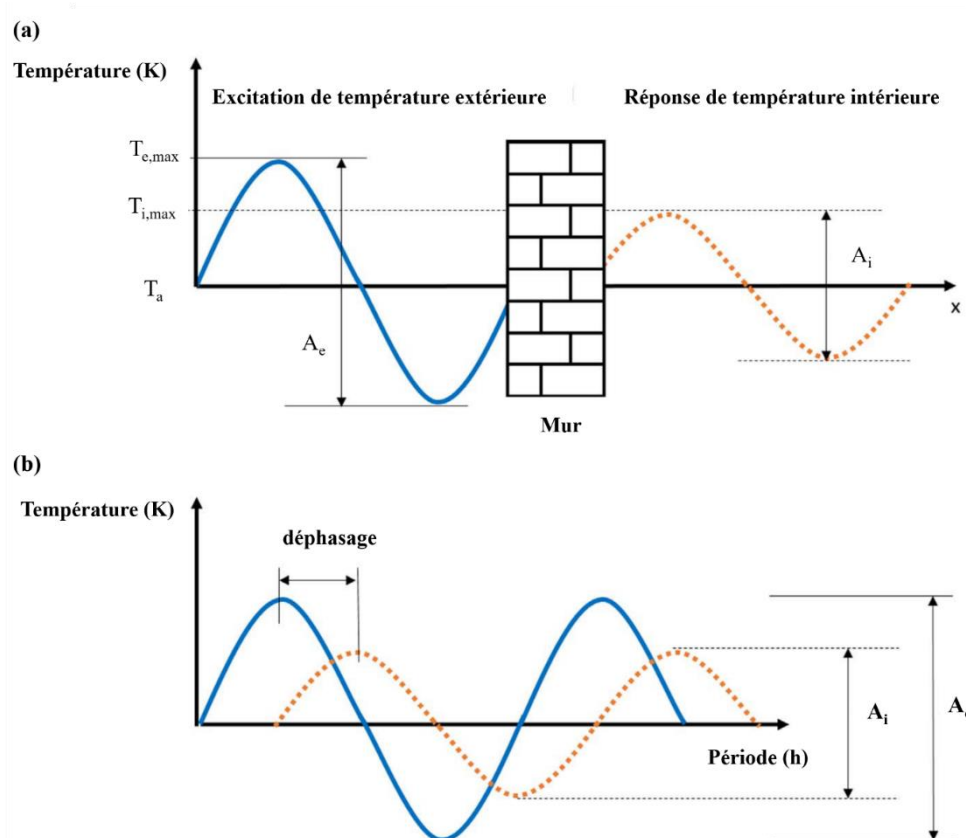


Figure 2.14: Réponse thermique de la propagation d'onde au travers d'un mur [97]

Le facteur d'amortissement ( $f$ ) est calculé comme le rapport des amplitudes de température entre leurs valeurs intérieures et leurs valeurs extérieures (Eq. 24.1). Plus le facteur d'amortissement est faible, plus les températures intérieures sont amorties comparativement aux températures extérieures. L'amortissement est le potentiel du bâtiment à réduire le transfert de flux thermiques dû à des sollicitations thermiques externes comme le rayonnement solaire et la température extérieure.

Le déphasage ( $\phi$ ) représente le temps nécessaire à la température extérieure pour atteindre l'intérieur du bâtiment (Eq. 24.2). Le déphasage montre la capacité du bâtiment à retarder l'impact des apports thermiques sur la température intérieure pour garder le bâtiment frais pendant les périodes de chaleur.

$$f = \frac{T_{in,max} - T_{in,min}}{T_{ex,max} - T_{ex,min}} \quad (24,1)$$

$$\phi = t_{T_{in,max}} - t_{T_{ex,max}} \quad (24,2)$$

Avec T : température, in : intérieur, ex : extérieur, max : maximum, min : minimum et t : temps

### 2.3.6 Confort thermique

Le modèle de confort thermique utilisé dans cette étude est le modèle adaptatif du standard ASHRAE. En effet, ce modèle est adéquat pour les bâtiments en évolution libre. Ce modèle de confort adaptatif est limité aux conditions suivantes :

- températures moyennes de l'air extérieur comprises entre 10 °C et 33,5 °C
- vitesse de l'air inférieure à 0,2 m·s<sup>-1</sup>
- taux métabolique entre 1,0 et 1,3 met
- aucun rayonnement solaire direct sur l'occupant.

La température opérative, celle perçue par les occupants, est fonction de la température de l'air ( $T_a$ ), de la température radiante moyenne ( $T_r$ ) et des coefficients de transfert de chaleur par rayonnement et par convection. Toutefois, la température opérative peut être approximée comme la moyenne arithmétique de la température radiante et de celle de l'air (Éq. 25). La température radiante moyenne (Éq. 26) est approximée comme une fonction de l'émissivité de chaque paroi ( $\epsilon$ ), de l'aire de chaque paroi ( $A$ ) et de la température ( $T$ ) de chaque paroi.

$$T_{op,in} = (T_r + T_a)/2 \quad (\text{Éq. 25})$$

$$T_r = \frac{\sum \epsilon_i A_i T_i}{\epsilon_i A_i} \quad (\text{Éq. 26})$$

La température de confort ( $T_{op, com}$ ) est une fonction linéaire de la température extérieure mensuelle moyenne ( $T_m$ ), comme indiqué dans l'Éq. 27 [22].

$$T_{op,com} = 0,31 T_m + 17,8 \quad (\text{Éq. 27})$$

La Figure 2.15 présente les plages de températures opératives acceptables dans les habitats en évolution libre [137]. Le modèle adaptatif de ASHRAE définit deux plages d'acceptabilité des conditions de confort correspondant à 80 % et 90 % de satisfaction des occupants. Le seuil de 80 % est celui recommandé pour des conditions normales et celui de 90 % pour des ambiances très exigeantes en termes de confort thermique. Les conditions

acceptables à 80 % et 90 % correspondent respectivement à des régions définies à 3,5 °C et 2,5 °C de part et d'autre de la température de confort.

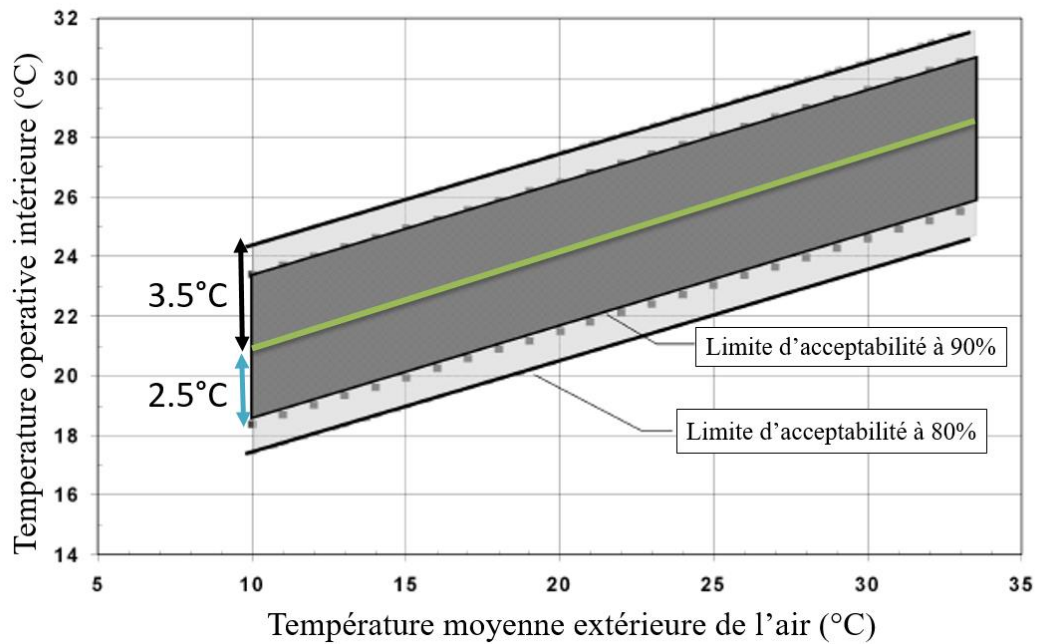


Figure 2.15: Plage de températures opératives acceptables dans les bâtiments en évolution libre [137] Adapté

Les occupants sont placés au centre de la zone habitable du bâtiment pilote et soumis au programme d'occupation mentionné dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Calendrier prévisionnel d'occupation

	Occupants	Activité	Taux métabolique/personne (W· m <sup>-2</sup> ) [39]
6 h – 8 h	2	Assis, calme	60
8 h – 12 h	1	Taches ménagères	70
12 h – 14 h	2	Sieste	40
14 h – 18 h	1	Debout, relaxe	70
18 h – 22 h	2	Assis, calme	60
22 h – 6 h	2	sommeil	40

Les occupants du bâtiment sont considérés comme des adultes, 1,73 m de hauteur et 70 kg de poids, avec une surface de peau correspondant à celle de Dubois pour une personne adulte, soit 1,8 m<sup>2</sup>[128].

## **Conclusion**

Ce chapitre s'est d'abord articulé à présenter le protocole expérimental suivi dans cette étude afin d'assurer la fiabilité des données expérimentales. Cette partie a présenté les différents équipements utilisés pour instrumenter le bâtiment pilote. Ensuite, les différents modes de transfert de chaleur ont été décrits sous forme mathématique pour élaborer un modèle numérique capable d'assurer la précision des résultats de simulations. Enfin, des critères d'évaluation de la performance thermique des bâtiments ont été présentés. Ces indicateurs caractérisent particulièrement l'inertie thermique et le confort thermique. Comme perspectives de ce chapitre, le transfert de masse peut être incorporé dans le modèle pour la modélisation en milieu humide. Aussi, les différents algorithmes énoncés peuvent être combinés dans un outil comme Matlab pour des calculs détaillés en 3D permettant la quantification des erreurs liées aux schémas de calcul. Dans le prochain chapitre, les résultats issus des différentes approches méthodologiques décrites dans ce chapitre sont présentés.

## **Chapitre 3 : Résultats et Analyses**

## Introduction

Ce chapitre expose d'abord les résultats de l'expérimentation faite sur le bâtiment pilote. Deux périodes de campagne expérimentale sont analysées au regard des températures de paroi et de zone du bâtiment. Les résultats de simulation et validation du bâtiment pilote sont ensuite examinés. En troisième lieu, les résultats de l'impact de l'isolation et de l'épaisseur de mur sur l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment pilote sont analysés. Enfin, l'influence des stratégies de protection solaire sur le confort thermique est traitée.

### 3.1 Résultats expérimentaux

L'expérimentation a débuté en novembre 2016. La visualisation des données concerne les périodes du 1<sup>er</sup> au 3 novembre comme période froide et du 17 au 19 février comme période chaude.

#### 3.1.1 Performance thermique du bâtiment pilote en période chaude

Les températures intérieure et extérieure mesurées du 17 au 19 février sont représentées sur la Figure 3.1.

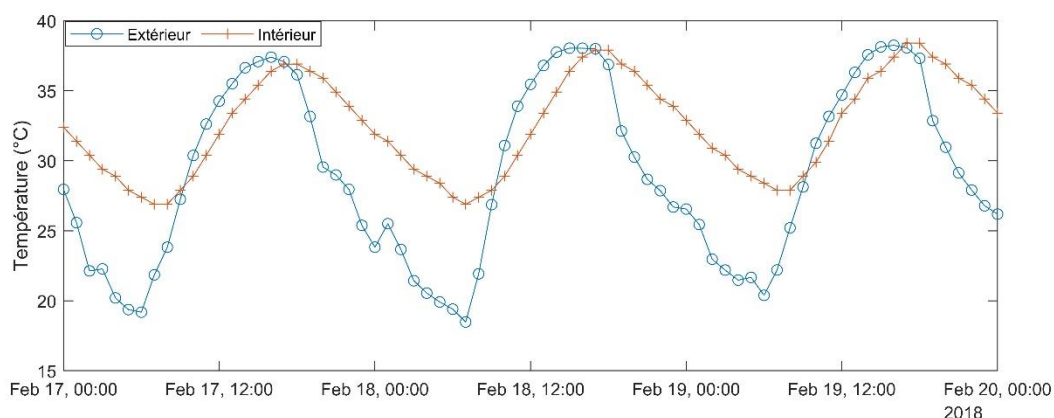


Figure 3.1 : Températures expérimentales interne et externe du bâtiment pilote en février

La température intérieure varie entre 26,9 °C et 38,4 °C avec une moyenne de 32,5 °C. La température extérieure est dans la plage 18,5-38,2 °C avec une moyenne de 29,0 °C. La température intérieure minimale survient à 7 h et la température maximale entre 17-18 h. La température extérieure est minimale entre 6-7 h et maximale entre 15-16 h. La température intérieure atteint son maximum 2 h après l'occurrence de la température maximale extérieure. Les amplitudes de températures intérieure et extérieure sont respectivement de 10,51 °C et



18,30 °C. Il s'ensuit que le facteur d'amortissement de l'enveloppe est de 57 %.

La Figure 3.2 montre les humidités relatives extérieure et intérieure enregistrées durant la période de février. L'humidité extérieure varie entre 6 % et 40 % avec une moyenne de 19 %. L'humidité intérieure varie entre 9 % et 24 % avec une moyenne de 14 %. L'amplitude journalière moyenne de l'humidité extérieure est de 27 % et celle de l'humidité intérieure de 9 %.

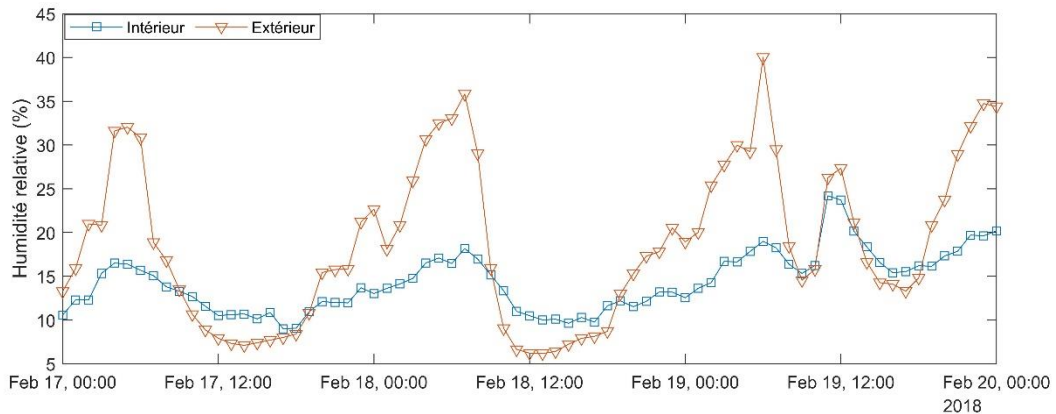


Figure 3.2 : Humidités relatives intérieure et extérieure du bâtiment pilote en février

La Figure 3.3 montre l'évolution des températures des parois internes des murs de la zone habitable du bâtiment.

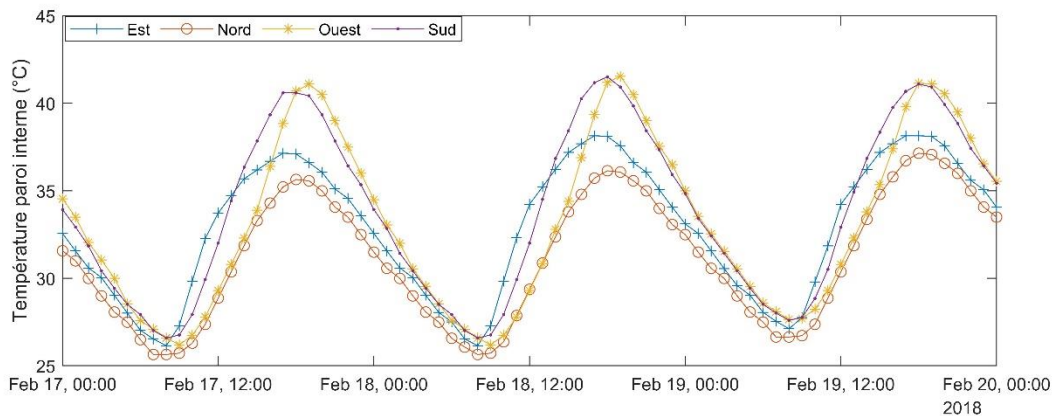


Figure 3.3: Températures des parois internes des murs du bâtiment pilote en février

On note une faible différence entre les valeurs minimales des températures contrairement aux valeurs maximales. La paroi Nord présente la plus faible température moyenne soit 31,1 °C. Les parois Est, Ouest et Sud sont en moyenne respectivement plus chaude de 1,7 °C, 2,0 °C et 2,7 °C.

Le Tableau 3.1 montre quelques indicateurs statistiques des températures des parois.

Tableau 3.1:Températures des parois internes du bâtiment pilote en février

Parois internes	Est	Ouest	Nord	Sud
min (°C)	26,1	26,2	25,6	26,6
moyenne (°C)	32,8	33,2	31,1	33,8
max (°C)	38,1	41,5	37,1	41,5

### 3.1.2 Performance thermique du bâtiment pilote en novembre.

Les températures intérieure et extérieure du 1<sup>er</sup> au 3 novembre sont représentées sur la Figure 3.4. La température intérieure varie entre 25,9 °C et 36,4 °C avec une moyenne de 31,3 °C. La température extérieure varie entre 18,1 °C et 38,2 °C avec une moyenne de 27,8 °C. La température intérieure minimale arrive à 7-8 h et la température maximale entre 17-18 h. La température extérieure est minimale entre 5-6 h et maximale à 15 h. La température intérieure atteint alors sa valeur maximale en moyenne 2,5 h après l'occurrence de la température maximale extérieure. Les amplitudes des températures intérieures et extérieures sont aussi respectivement de 9,5 °C et 19,0 °C. Ainsi, le facteur d'amortissement de l'enveloppe du bâtiment est de 50 %.

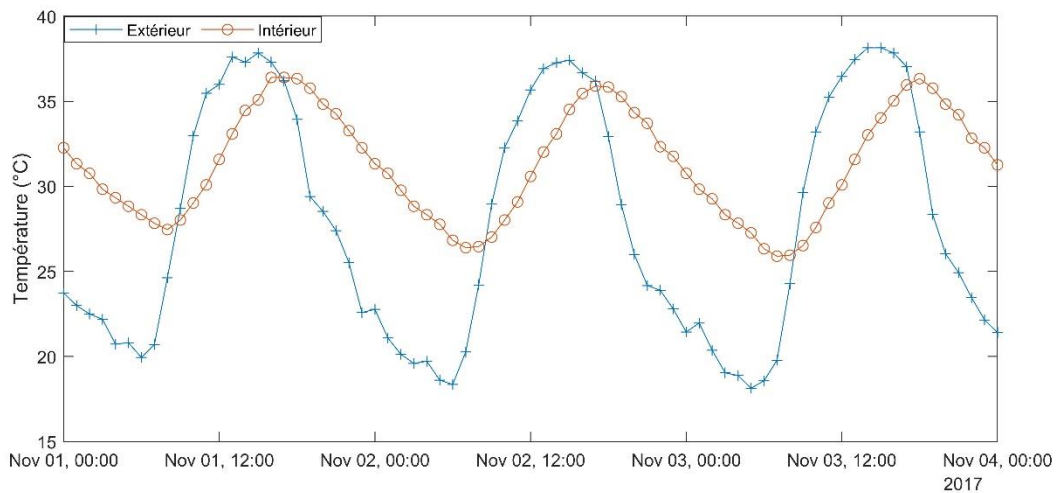


Figure 3.4 : Températures intérieure et extérieure du bâtiment pilote en novembre

La Figure 3.5 montre les humidités relatives extérieure et intérieure enregistrées durant la période de novembre. L'humidité extérieure varie entre 10 % et 67 % avec une moyenne de 33 %. L'humidité intérieure varie entre 17 % et 41 % avec une moyenne de 31 %. L'amplitude journalière moyenne de l'humidité extérieure est de 51 % et celle de l'humidité intérieure 19 %. Ainsi le facteur d'amortissement de l'humidité est de 63 %.

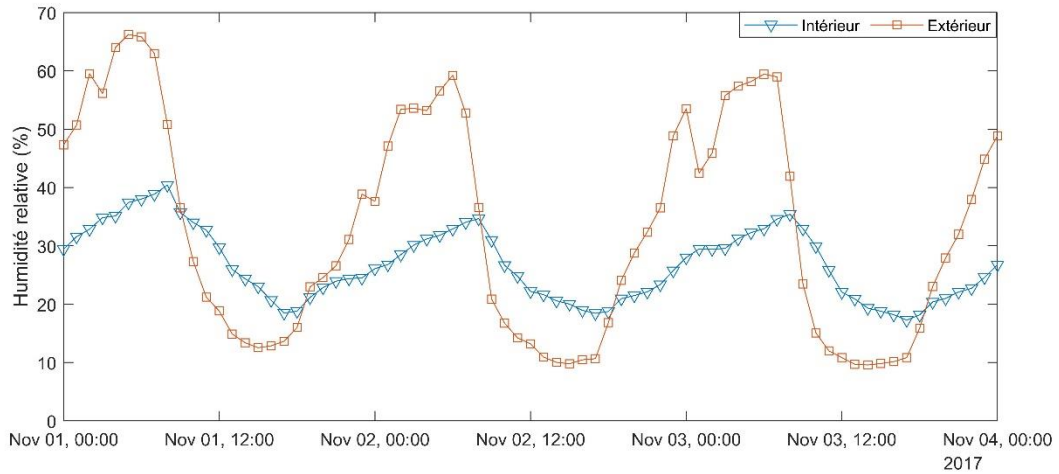


Figure 3.5: Humidités intérieure et extérieure du bâtiment pilote en BTC ciment en novembre

La Figure 3.6 montre l'évolution des températures des parois internes des murs du pilote durant la période de novembre. La paroi Nord présente la plus faible température moyenne, soit 29,9 °C. Les parois Est, Ouest et Sud sont en moyenne respectivement plus chaude de 1,5 °C, 1,7 °C et 3,0 °C. Aussi, les valeurs minimales de températures présentent de faibles différences contrairement aux valeurs maximales de températures.

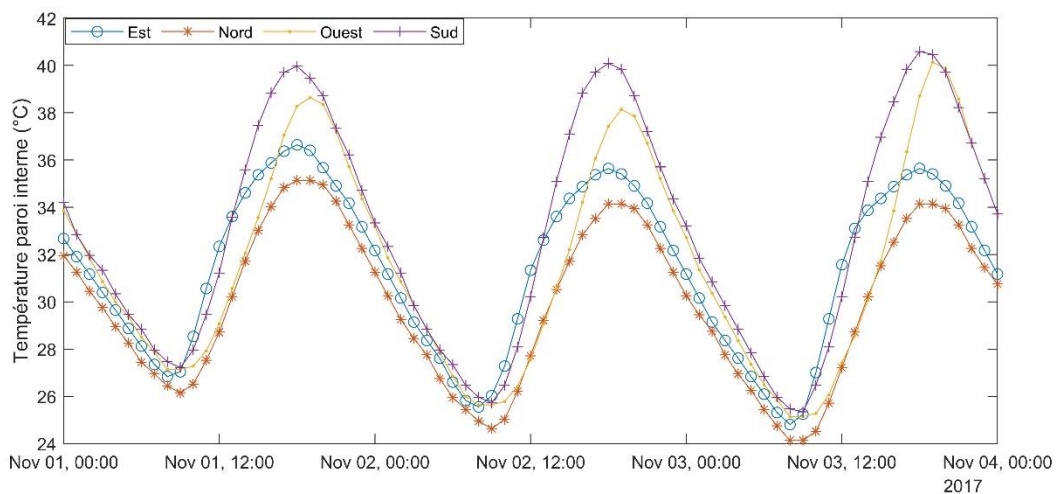


Figure 3.6: Températures internes des murs du bâtiment pilote en novembre

Le Tableau 3.2 montre quelques indicateurs statistiques des températures des parois.

Tableau 3.2: Températures de parois internes du bâtiment pilote

Parois internes	Est	Ouest	Nord	Sud
min (°C)	24,8	25,1	24,1	25,3
moyenne (°C)	31,4	31,6	29,9	32,9
max (°C)	36,6	40,1	35,1	40,6

Cette partie a permis d'examiner le comportement dynamique du bâtiment pilote avec des données expérimentales. Pour les deux périodes étudiées, le bâtiment a montré sa capacité à amortir la température extérieure à 57 % (février) et 50 % (novembre) ; ce qui traduit la capacité de stockage thermique de l'enveloppe. L'enveloppe a aussi réduit l'humidité extérieure à 67 % (février) et 63 % (novembre). Toutefois, la température intérieure de l'enceinte et des parois dépasse en général 30 °C. La prochaine étape s'attache à évaluer le potentiel bioclimatique de la zone d'étude pour déterminer les stratégies passives adéquates à y adopter.

### 3.2 Application du diagramme de Milne et Givoni

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont celles fournies par Meteonorm. Les données correspondent à la station 655 030 de l'Organisation Mondiale de la Météorologie. Le logiciel Climate consultant 6.0 est utilisé pour visualiser les variables climatiques et réaliser le diagramme bioclimatique de Givoni et Milne. Le modèle de confort thermique utilisé est le modèle adaptatif ASHRAE 55. L'acceptabilité thermique des occupants est prise égale à 80 %.

La Figure 3.7 montre les températures journalières moyennes de la ville de Ouagadougou. On observe que 93 % des valeurs sont comprises entre 21-38 °C avec le mode (61 %) dans la plage 27-38 ° C. Ces observations révèlent le caractère chaud du climat. Il importe alors de déterminer des stratégies de refroidissement appropriées afin de réduire l'inconfort lié à la température.

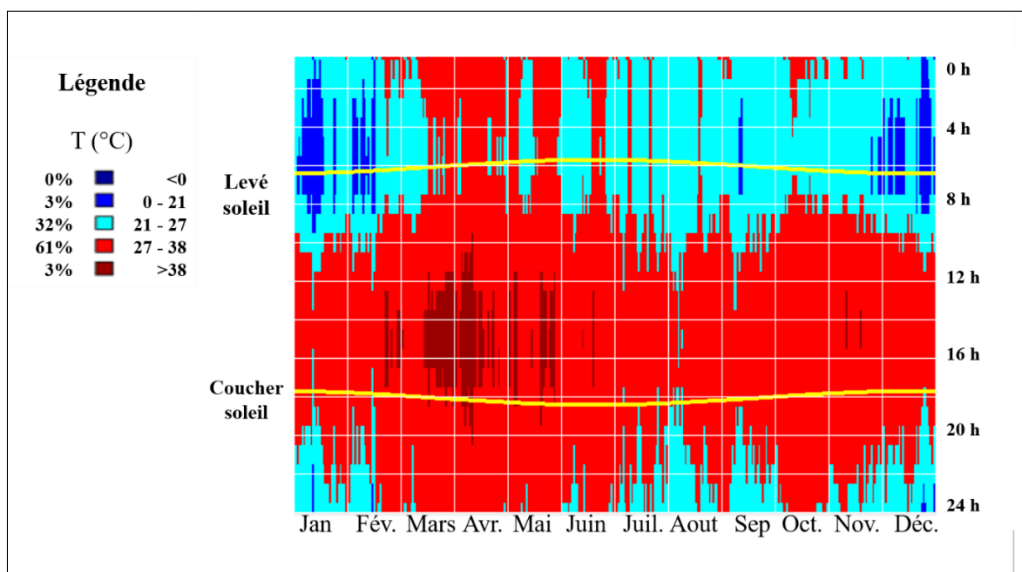


Figure 3.7 : Températures moyennes journalières de Ouagadougou

Les valeurs moyennes journalières d'humidité relative sont représentées sur la Figure 3.8.

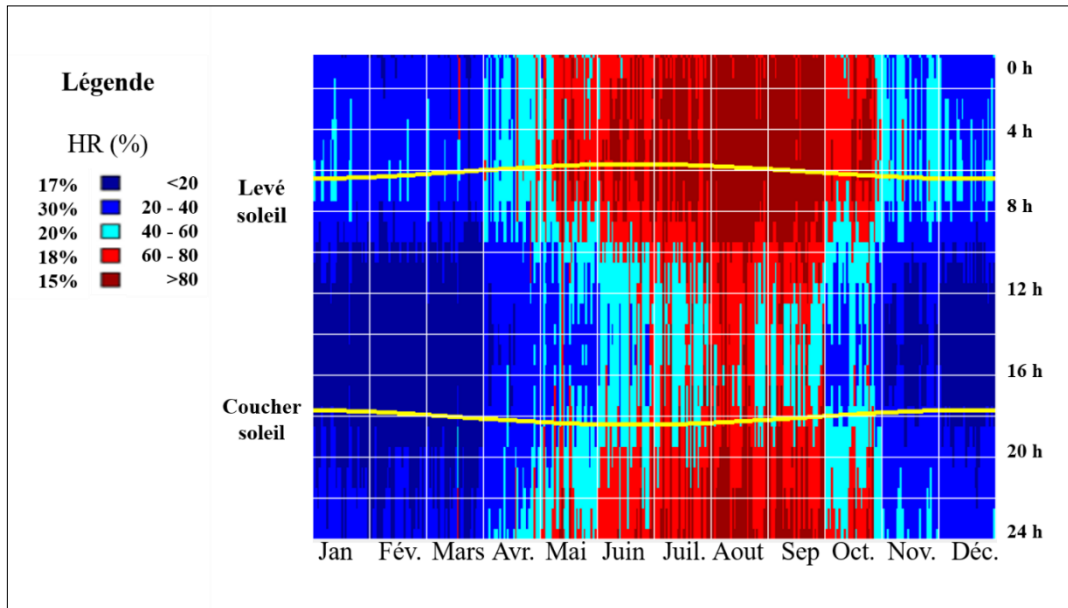


Figure 3.8 : Humidités relatives moyennes journalières de Ouagadougou

On observe que le mode d'humidités relatives (30 %) concerne la plage 20-40 %. Les périodes sèches, ici humidités inférieures à 20 %, représentent 17 % des valeurs. Les périodes humides, ici humidités >80 %, concernent 15 % des données. Au regard de ces observations, l'humidification et la déshumidification s'avèrent utiles à certains moments de la journée pour maintenir des taux d'humidité acceptables dans les bâtiments.

Les Figures 29,30 ont permis d'établir le besoin d'utiliser des stratégies de refroidissement, humidification et déshumidification pour améliorer les conditions hygrothermiques des bâtiments à Ouagadougou. Le diagramme de Givoni et Milne, réalisé sur un diagramme psychométrique, permet d'évaluer le potentiel des stratégies applicables. La Figure 3.9 présente les différentes techniques bioclimatiques applicables à Ouagadougou avec leur potentiel. Il importe de noter que les zones d'influence de plusieurs stratégies peuvent se recouper. Ainsi, la sommation du potentiel des différentes techniques est supérieure à 100 %.

La Figure 3.9 montre que le confort adaptatif est obtenu dans 16,9 % des cas. Autrement, durant 83,1 % du temps d'occupation, des techniques doivent être adoptées pour atteindre et garantir le confort. Les stratégies bioclimatiques à faible potentiel, ici inférieur à 5 %, sont les six techniques suivantes :

- Protection des vents (0 %)
- Humidification seule (0 %)
- Chauffage et humidification si utile (0 %)
- Flux solaires directs avec faible inertie (1,9 %)

- Gains de chaleur interne (3,8 %)
- Ventilation forcée (4,2 %)

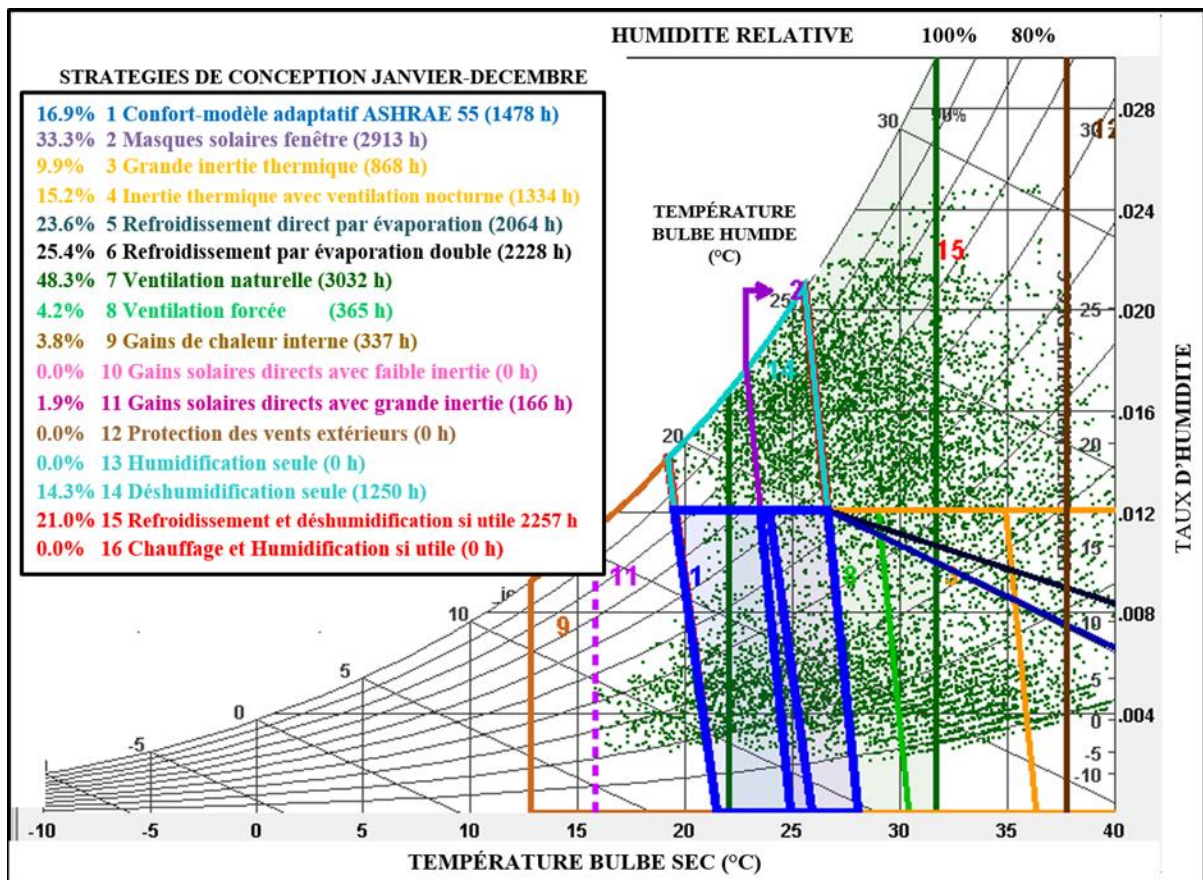


Figure 3.9: Diagramme de Givoni et Milne de la ville de Ouagadougou

Le faible besoin de protection contre les vents se justifie par des vitesses de vent non excessives. D'où le faible potentiel de la ventilation forcée. L'humidification n'est pas nécessaire ici, car les périodes correspondant à des humidités faibles ont des températures au-dessus de la plage de confort. Ainsi, le refroidissement par évaporation est la stratégie convenable pour ces moments. Les flux solaires peuvent être utiles pour les périodes de température inférieure à 20 °C afin de ramener la température dans la plage de confort. Toutefois, ces périodes ne représentent que 3 % des températures, d'où la faiblesse de cette technique.

Les techniques à potentiel moyen, entre 5 et 20 % d'impact, sont une grande inertie thermique (9,9 %), la déshumidification seule (14,3 %) et une grande inertie thermique avec ventilation nocturne (15,2 %). Le recours à l'inertie thermique se justifie par les valeurs élevées des amplitudes de températures quotidiennes. L'utilisation de la ventilation nocturne combinée à l'inertie thermique accroît de 53 % le potentiel d'inertie thermique. Les amplitudes de

température sont alors si importantes que le refroidissement nocturne est indispensable pour libérer les bâtiments de l'énergie stockée dans la journée. Le besoin de déshumidification seule montre que les périodes humides correspondent souvent à des plages de confort pour les températures. Il s'agit notamment des périodes pluvieuses de l'année.

Les stratégies bioclimatiques à potentiel élevé, supérieur à 20 %, sont les suivantes :

- Refroidissement et déshumidification si utile (21 %)
- Refroidissement par évaporation directe (23,6 %)
- Refroidissement par évaporation à deux étages (25,4 %)
- Masques solaires au niveau des fenêtres (33,3 %)
- Ventilation naturelle (48,3 %)

Le refroidissement combiné à la déshumidification nécessite l'utilisation de systèmes actifs tels que les climatiseurs. Son potentiel de 21 % montre que la climatisation n'est nécessaire que 21 % du temps sur toute l'année. Il est à noter que les stratégies passives sont privilégiées sur les stratégies actives dans la conception bioclimatique. Le refroidissement par évaporation directe (23,6 %) montre que les périodes de températures élevées correspondent à des humidités faibles. L'évaporation à double étage intègre aussi les périodes humides de l'année et affiche alors un potentiel légèrement supérieur à l'évaporation directe. La protection solaire est requise durant la période ensoleillée de l'année. Elle vise à empêcher la surchauffe supplémentaire des locaux liée à la pénétration de rayonnement direct dans les bâtiments. Ce qui est justifié puisque les températures de Ouagadougou sont suffisamment élevées. La ventilation naturelle est par excellence la stratégie de plus fort impact. Son potentiel permet de réduire de moitié l'inconfort durant la moitié des heures de l'année. Toutefois, comme l'air est souvent chargé de poussière, l'impact réel de la ventilation est négativement affecté. Aussi, si les fenêtres restent ouvertes sans aucune protection, les occupants se confrontent à des cas d'insécurité. De même, les habitudes des occupants sont déterminantes pour ouvrir et refermer les portes et fenêtres au moment opportun.

### **3.3 Simulation et validation du modèle**

#### **3.3.1 Simulation**

La période de simulation couvre le mois d'avril, le plus chaud, donc le plus inconfortable. La visualisation se limite à la semaine chaude type sur la base des données climatiques. Cette

semaine est la période du 19 au 25 avril 2018 (soit 7 jours). Les bandes d'incertitude de mesure de la température de l'air et de la surface, respectivement 0,12 °C et 0,36 °C, sont trop faibles pour être observables sur les graphiques.

Les pics d'irradiance quotidiens varient de 923 à 1077 W/m<sup>2</sup> ; ils surviennent entre 12 h et 13 h. La température extérieure oscille entre 27,7 °C et 41,3 °C avec une valeur moyenne de 34,6 °C. Les températures minimale et maximale de l'air extérieur sont respectivement observées entre 6-7 h et 15-16 h.

La Figure 3.10 montre les températures simulées sur la paroi Nord du bâtiment pilote. La température sur la surface intérieure varie entre 32,6 °C et 42,3 °C avec une moyenne de 37,5 °C. De même, la température sur la surface extérieure varie entre 30,7 °C et 45,4 °C avec une moyenne de 37,7 °C. La température est maximale sur la surface extérieure entre 15-16 h et sur la surface intérieure entre 18-19 h. Le facteur d'amortissement est de 64 %. Le déphasage horaire est évalué à 3,1 h.

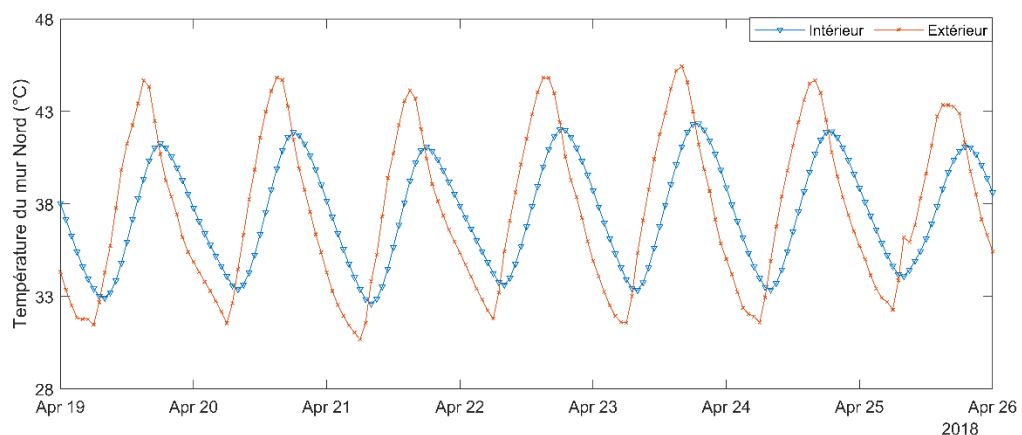


Figure 3.10 : Températures simulées sur les surfaces interne et externe du mur Nord

La Figure 3.11 présente les températures simulées sur la paroi Sud du bâtiment pilote. On note une variation entre 32,5 °C et 42,0 °C avec une moyenne de 37,3 °C de la température de la paroi intérieure. La température est maximale sur la paroi interne entre 18-19h. Sur la paroi externe, la température varie entre 30,6 °C et 44,9 °C avec une moyenne de 37,2 °C. La température est maximale sur la surface extérieure entre 15-16 h. On évalue par suite le facteur d'amortissement à 64 %. De plus, le déphasage horaire est évalué à 3,1 h.



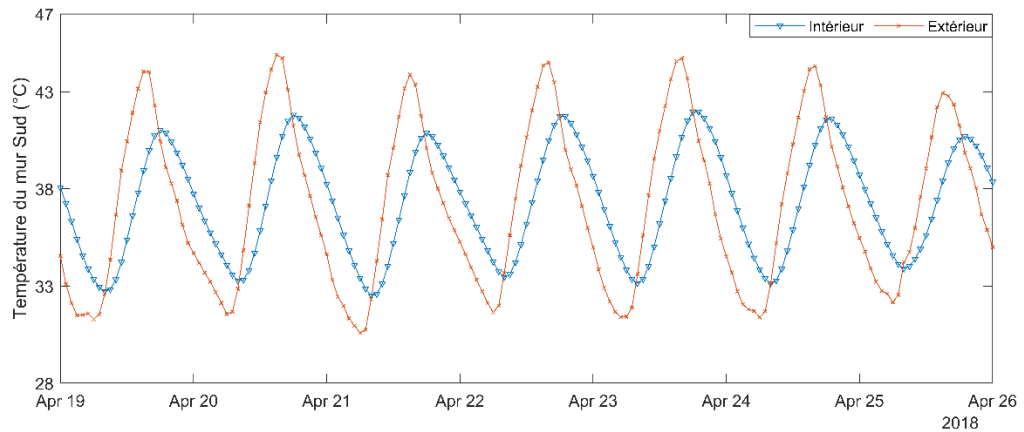


Figure 3.11 : Températures simulées sur les surfaces interne et externe du mur Sud

Les courbes de la Figure 3.12 montrent les températures simulées sur la paroi Est. La température sur la surface intérieure est dans la plage 33,0-43,6 °C avec une moyenne de 38,9 °C. De même, la température sur la surface extérieure fluctue entre 30,9 °C et 51,9 °C avec une moyenne de 40,6 °C. La plage horaire d'occurrence de la température maximale est de 8-10 h et 17-18h, respectivement pour les surfaces interne et externe. Le facteur d'amortissement est de 49 %. On note aussi un déphasage horaire de 7,7 h. Les faibles remontées de température sur la paroi extérieure peuvent s'expliquer par un transfert de la chaleur stockée dans les matériaux BTC des autres parois vers la paroi Est.

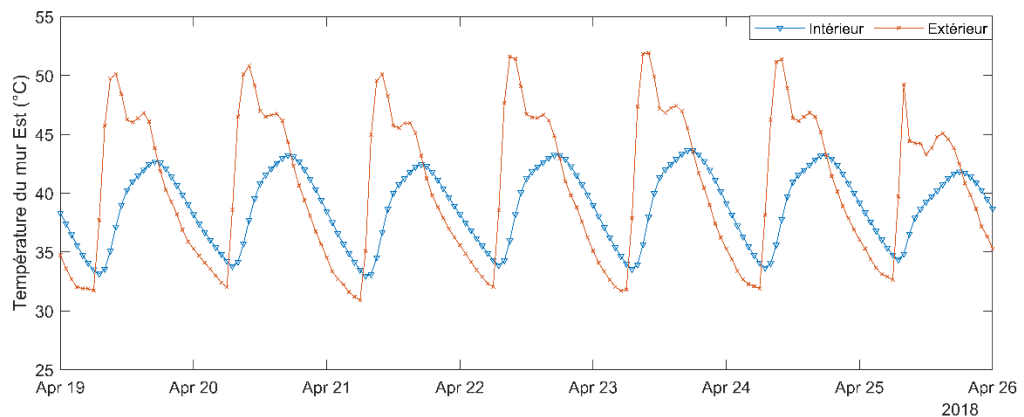


Figure 3.12 : Températures simulées sur les surfaces interne et externe du mur Est

Les températures simulées sur la paroi Ouest sont représentées sur la Figure 3.13. La température de la paroi intérieure est dans la plage 32,7-43,8 °C avec une moyenne de 37,9 °C. De même, la température sur la surface extérieure varie entre 30,8 °C et 50,4 °C avec une moyenne de 38,4 °C. La température maximale survient entre 16-18 h sur la surface extérieure et entre 18-20 h sur la surface intérieure. Le facteur d'amortissement est de 55 %. Le déphasage horaire est de 2,6 h.

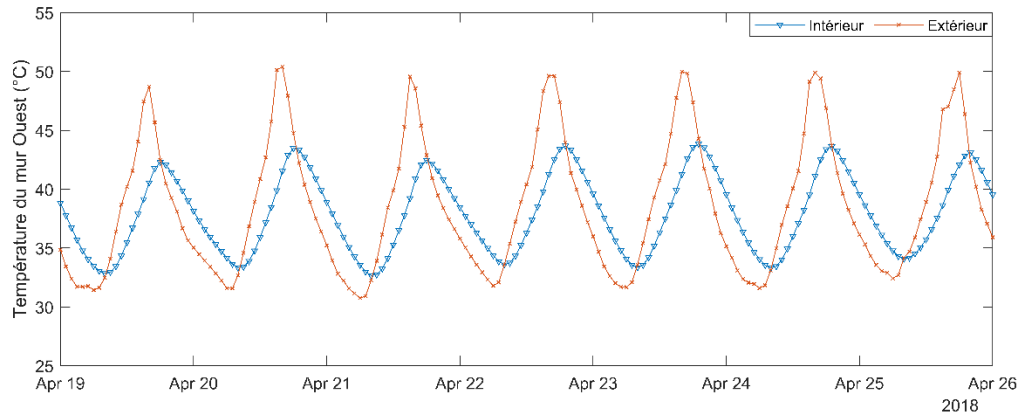


Figure 3.13 : Températures simulées sur les surfaces internes et externes du mur Ouest

Cette partie a permis d'utiliser la simulation thermique pour montrer le comportement thermique des parois du bâtiment. On retient que les déphasages horaires et amortissements thermiques varient suivant la position du mur. Les valeurs d'amortissement thermiques sont respectivement de 64 %, 64 %, 49 % et 65 % pour les murs Nord, Sud, Est et Ouest. Les valeurs de déphasage horaire sont respectivement de 3,1 h, 3,1 h, 7,7 h et 2,6 h pour les positions Nord, Sud, Est et Ouest. Les températures sur les surfaces intérieures des murs dépassent en général 30 °C. La partie suivante va traiter de la validation du modèle thermique.

### 3.3.2 Validation

La validation consiste ici à comparer les valeurs mesurées de températures intérieures avec les valeurs simulées pour vérifier la capacité du modèle à reproduire le comportement thermique observé. Elle est réalisée sur la période du 19 au 25 avril 2018. Dans les figures de cette section, la température « expérimentation extérieure » représente la température extérieure mesurée au niveau de la station météo

La Figure 3.14 montre le profil de températures pour la paroi interne Est de l'enveloppe. La température intérieure mesurée varie de 32,6 à 42,6 °C avec une valeur moyenne de 38,4 °C. La température intérieure simulée varie de 33,0 à 44,6 °C avec une valeur moyenne de 39,3 °C. La corrélation linéaire entre les températures mesurée et simulée pour la paroi Est est représentée sur la Figure 37. Le coefficient de corrélation est de 97 %. Les résidus sont compris entre -2,5 °C et 0,8 °C avec une moyenne de -0,9 °C.

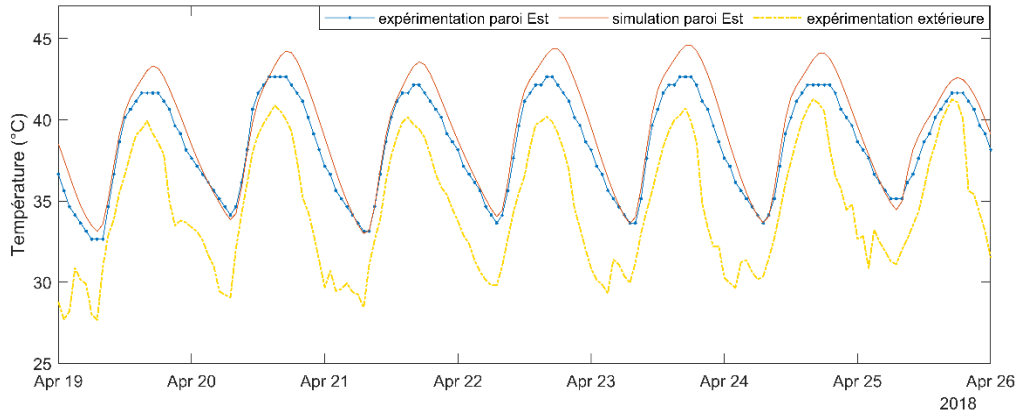


Figure 3.14 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Est

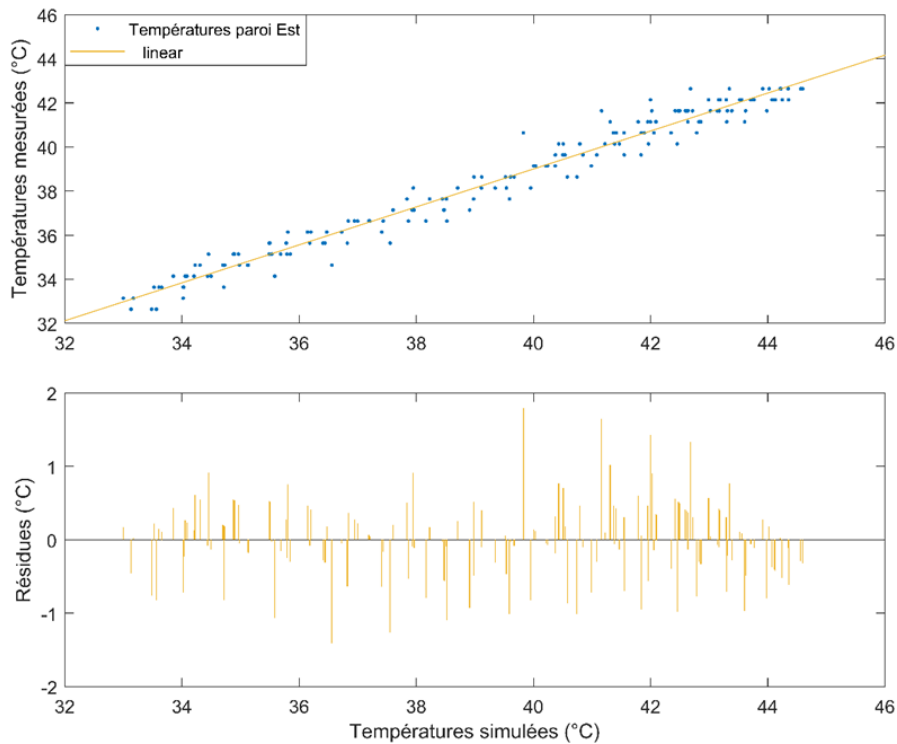


Figure 3.15 : Corrélation entre températures internes simulée et mesurée de la paroi Est

La Figure 3.16 présente le profil de températures pour la paroi interne Ouest. On note une variation de 32,6 à 46,1 °C avec une valeur moyenne de 38,2 °C de la température intérieure mesurée. Les valeurs simulées de température intérieure sont dans la plage 32,7-44,9 °C avec une valeur moyenne de 38,4 °C. La corrélation linéaire entre les températures mesurée et simulée pour la paroi interne Ouest est représentée sur la Figure 39. Le coefficient de corrélation linéaire est de 97 %. Les résidus varient de -1,8 °C à 1,5 °C avec une moyenne de -0,3 °C.

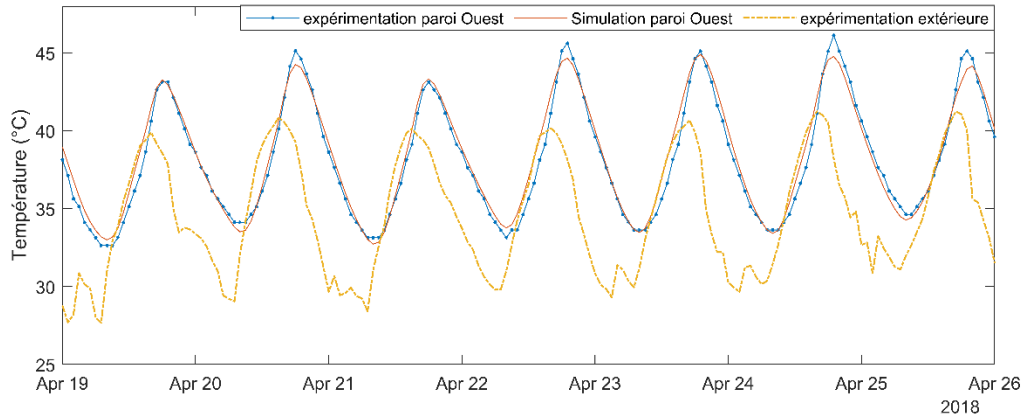


Figure 3.16 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Ouest

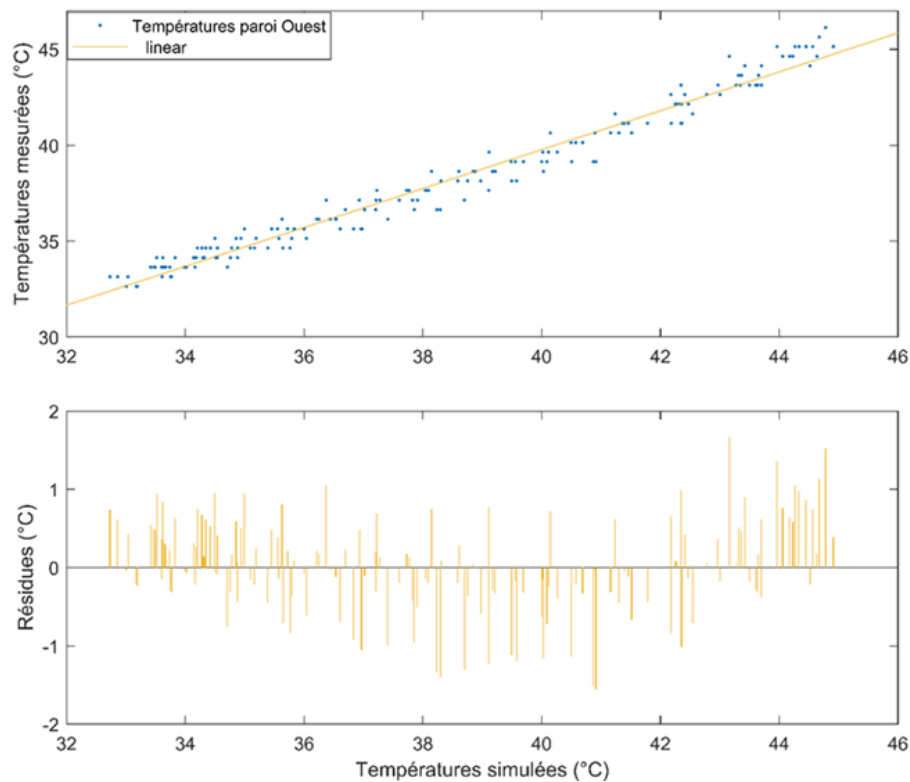


Figure 3.17: Corrélation entre températures internes simulée et mesurée de la paroi Ouest

Le profil de températures pour la paroi interne Nord de l'enveloppe est représenté sur la Figure 3.18. La température intérieure mesurée fluctue entre 31,6 et 41,6 °C avec une moyenne de 37,1 °C. De même, la température intérieure simulée varie dans la plage 32,7-43,2 °C avec une moyenne de 37,9 °C. La Figure A en Annexe montre la corrélation linéaire entre les températures mesurée et simulée pour la paroi interne Nord. On évalue à 96% le coefficient de corrélation entre valeurs mesurées et simulées. Les résidus sont compris entre -2,2 °C et 0,7 °C avec une moyenne -0,8 °C.

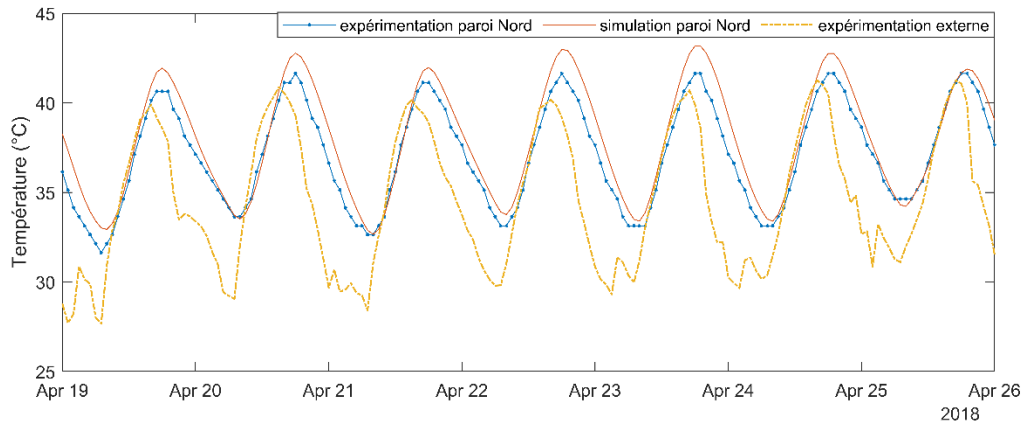


Figure 3.18 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Nord

Les courbes de températures pour la paroi interne Sud de l'enveloppe sont représentées sur la Figure 3.19. On observe une fluctuation de la température intérieure mesurée entre 32,1 et 42,1 °C avec une valeur moyenne de 37,2 °C. La température intérieure simulée reste dans la plage 32,6-43,0 °C avec une valeur moyenne de 37,8 °C. La Figure B en Annexe montre le degré de corrélation linéaire entre les températures mesurée et simulée de la paroi Sud. Une valeur de 97% est obtenue pour le coefficient de corrélation linéaire. Les résidus restent dans la plage de -2,5 °C à 0,8 °C avec une moyenne -0,9 °C.

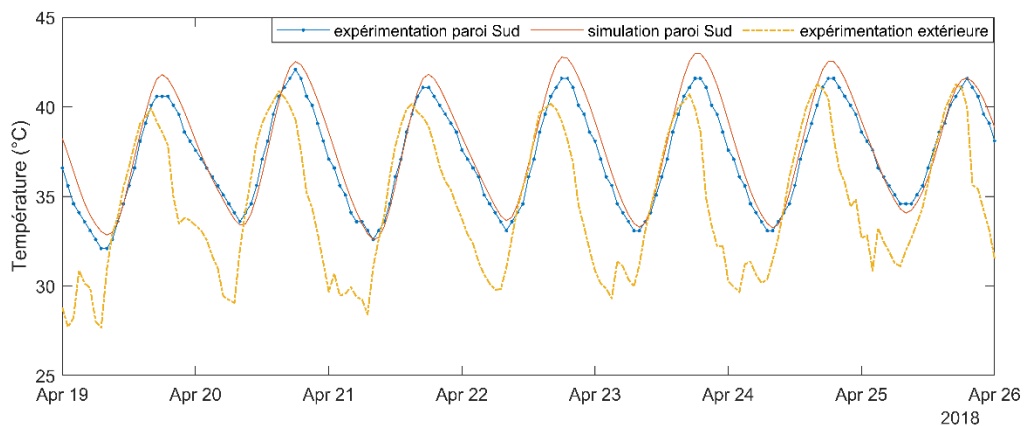


Figure 3.19 : Profil de températures simulée et mesurée au niveau de la paroi interne Sud

La Figure 3.20 montre le profil de températures pour la zone intérieure du bâtiment. Les températures intérieures mesurée et simulée sont respectivement dans les plages 32,9-41,9 °C et 32,5-42,4 °C. Les moyennes de température intérieure sont de 37,4 °C et 37,5 °C respectivement pour les valeurs mesurée et simulée. La Figure C en annexe montre la corrélation linéaire entre les températures mesurée et simulée correspondant à la zone

habitable. Le coefficient de corrélation linéaire est de 95 %. Les résidus fluctuent entre  $-1,7\text{ °C}$  et  $1,6\text{ °C}$  avec une moyenne de  $-0,1\text{ °C}$ .

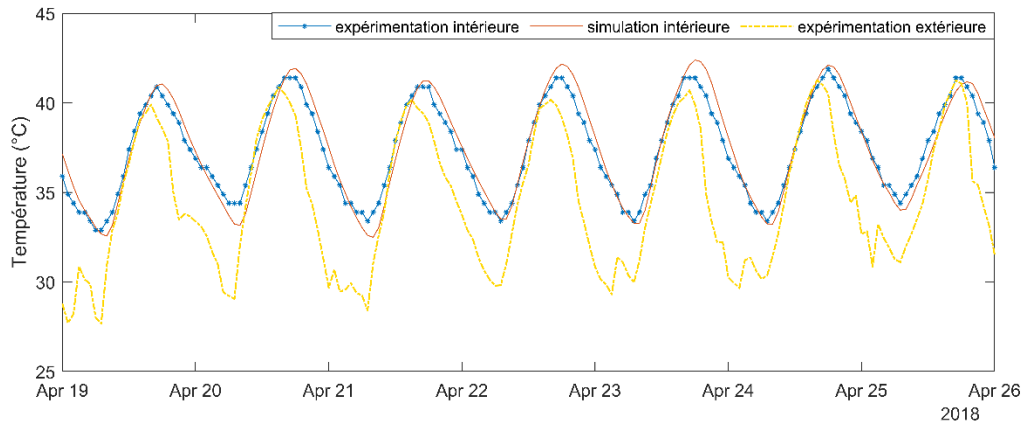


Figure 3.20 : Corrélation de températures simulée et mesurée au niveau de la zone habitable

Les indicateurs statistiques de la validation de la zone habitable et des parois internes du bâtiment sont résumés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Indicateurs statistiques de validation du modèle

	Zone habitable	Sud	Nord	Est	Ouest
$\varepsilon$ (°C)	0,6	0,7	0,9	1,0	0,5
$R^2$ (%)	95	97	96	97	97

Les valeurs les plus élevées de l'erreur absolue  $\varepsilon$  sont relatives aux parois internes Est et Nord. Les valeurs trouvées sont toutes inférieures à  $1\text{ °C}$ . Les valeurs du coefficient de corrélation  $R$  sont supérieures à 95%.

Les valeurs du résidu moyen absolu sont comprises entre  $0,5\text{ °C}$  et  $1\text{ °C}$ , plage acceptable pour les bâtiments selon Strachan et al. [56]. La plage est acceptable en raison des incertitudes de mesure et de calcul impliquées dans le processus de validation. Les valeurs de résidu obtenues sont inférieures à celles utilisées par Mateus et al. [138] pour valider leur modèle thermique avec EnergyPlus, respectivement  $1,4\text{ °C}$  pour la température radiante et  $2,5\text{ °C}$  pour l'erreur quotidienne maximale. Ainsi, les indicateurs statistiques montrent que le modèle reproduit avec une précision acceptable le comportement thermique du bâtiment pilote. Dans la section suivante, le modèle est utilisé pour analyser l'impact de l'isolation thermique et l'épaisseur des BTC sur l'inertie thermique.

### 3.4 Impact de l'isolation thermique et épaisseur de matériaux sur l'inertie thermique

#### 3.4.1 Influence de l'isolation interne et externe

L'analyse d'isolation vise à comparer l'isolation interne et externe des murs avec des isolants conventionnels et écologiques. Le matériau conventionnel d'isolation est la laine de verre. L'épaisseur de laine de verre considérée pour les simulations est de 0,10 m. L'isolation écologique est constituée de 0,15 m de paille recouverte de 0,02 cm de chaux.

Les différentes simulations de cas d'isolation sont illustrées à la Figure 3.21.

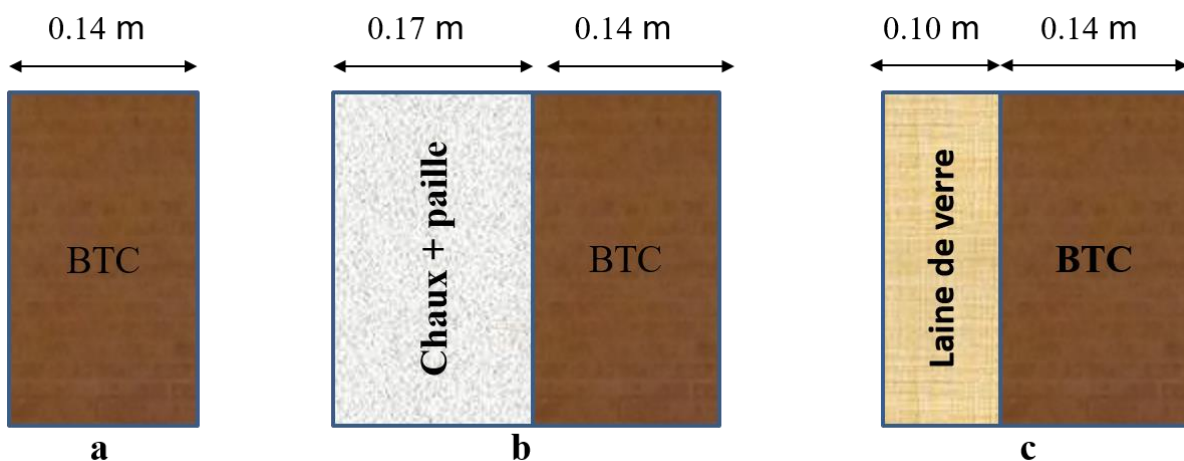


Figure 3.21 : Variantes d'isolation du bâtiment pilote a) cas de référence b) isolation avec chaux + paille c) isolation avec la laine de verre

La Figure 3.22 montre les températures simulées suite à l'utilisation de l'isolation externe sur les murs du bâtiment pilote.

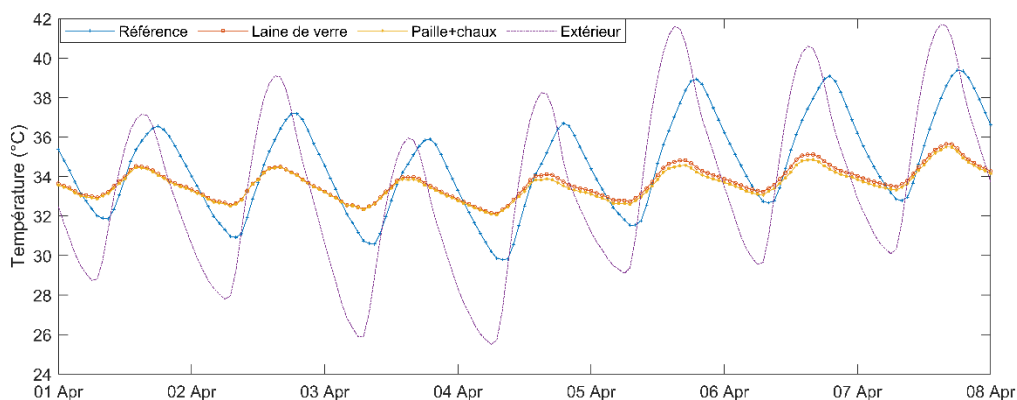


Figure 3.22 : Température intérieure en fonction du type d'isolant externe

Le Tableau 3.4 montre les indicateurs statistiques associés à la température intérieure. Les valeurs de déphasage et facteurs d'amortissement montrent que la paille et la laine de verre ont les mêmes performances thermiques dans les conditions d'utilisation spécifiées. Le facteur d'amortissement est réduit environ au tiers pour une isolation thermique extérieure comparativement au cas de référence. Ce résultat met en évidence le fort potentiel d'amortissement des températures extérieures lié à l'isolation extérieure. Ainsi, l'isolation externe améliore la stabilité thermique. En particulier, la température maximale est aussi réduite par rapport au cas de référence. Toutefois, durant les périodes nocturnes, les températures internes restent élevées comparativement aux températures extérieures.

Tableau 3.4 : Déphasages et facteurs d'amortissement de température par les parois du pilote

Isolation extérieure	Extérieur	Référence	Laine	Paille
T maximum (°C)	42,5	41,1	35,6	35,7
T minimum (°C)	23,3	27,4	29,8	30,0
T moyenne (°C)	32,9	34,3	33,6	33,5
Amortissement		0,61	0,22	0,22
Déphasage (h)		4,5	2,0	2,0

La Figure 3.23 montre les températures simulées suite à l'utilisation de l'isolation interne sur les murs du bâtiment pilote.

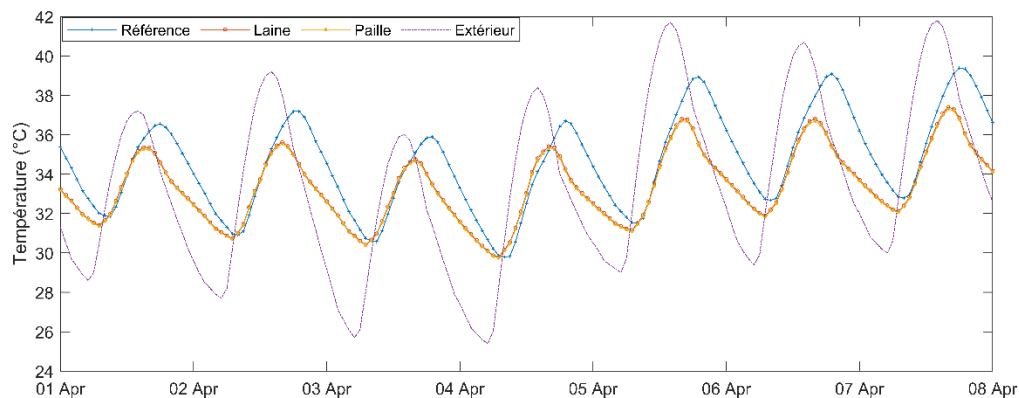


Figure 3.23: Température intérieure en fonction du type d'isolant interne

Le Tableau 3.5 montre les indicateurs statistiques associés à la température intérieure pour cette configuration. Les valeurs de déphasage et facteurs d'amortissement montrent aussi dans ce cas que la paille et la laine de verre ont les mêmes performances thermiques. L'isolation interne permet d'avoir des températures plus basses après l'occurrence de la température maximale journalière et de vite profiter des températures basses nocturnes. L'isolation protège



en effet l'enceinte du bâtiment du déstockage de chaleur emmagasinée durant les périodes ensoleillées. En effet, la chaleur est cédée la nuit au milieu extérieur par convection et rayonnement du fait des températures extérieures plus faibles que celles des matériaux et de l'air du bâtiment. Par contre l'isolation intérieure limite le transfert de chaleur par conduction et convection vers l'intérieur du bâtiment.

Tableau 3.5 : Déphasages et facteurs d'amortissement de température par les parois

Isolation intérieure	Extérieur	Référence	Laine	Paille
Maximum (°C)	42,5	41,1	38,1	38,0
Minimum (°C)	23,3	27,4	28,8	28,8
Moyenne (°C)	32,9	34,3	33,2	33,1
Facteur d'amortissement		0,61	0,44	0,44
Déphasage		4,5	2,0	2,0

De façon globale, les isolations externe et interne ont toutes permis de réduire la température maximale aux heures chaudes et améliorer la stabilité thermique. L'étude a aussi montré que l'utilisation de 0,15 m de paille avec 0,02 m de chaux donne des performances thermiques identiques à 0,10 m de laine de verre pour une isolation interne ou externe. La paille recouverte de chaux peut alors remplacer la laine de verre et représenter une réelle plus-value sur les plans économique et écologique.

### 3.4.2 Influence de l'épaisseur des murs

L'étude de l'influence de l'épaisseur des murs consiste à utiliser des BTC de différentes épaisseurs pour accroître leur capacité à stocker la chaleur et ainsi mieux réguler les conditions thermiques intérieures. Les épaisseurs de 0,14 m et 0,22 m sont les épaisseurs couramment utilisées pour les BTC au Burkina Faso. Les épaisseurs de 0,35 m et 0,50 m sont respectivement aussi utilisées comme limites pratiques et maximales. Les différentes configurations de parois considérées dans les simulations de cas d'épaisseur sont données par la Figure 3.24.

La Figure 3.25 montre les températures simulées suite à l'utilisation de différentes épaisseurs de murs.

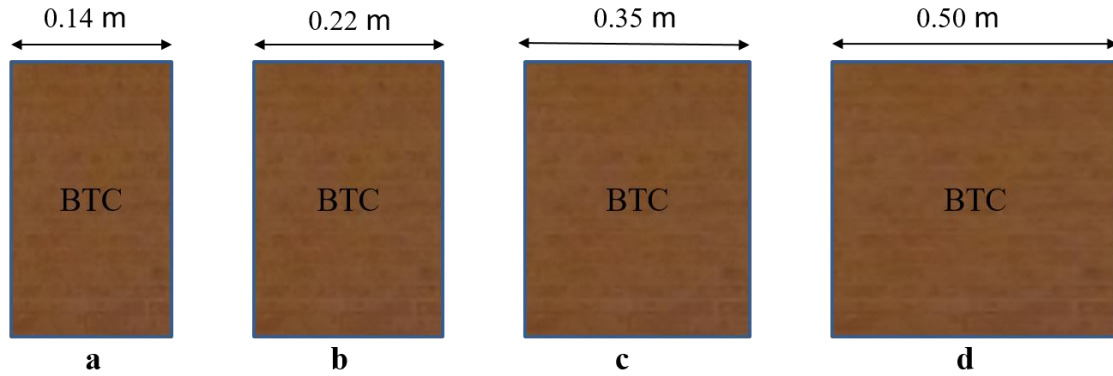


Figure 3.24: Variantes d'épaisseur de paroi du bâtiment pilote

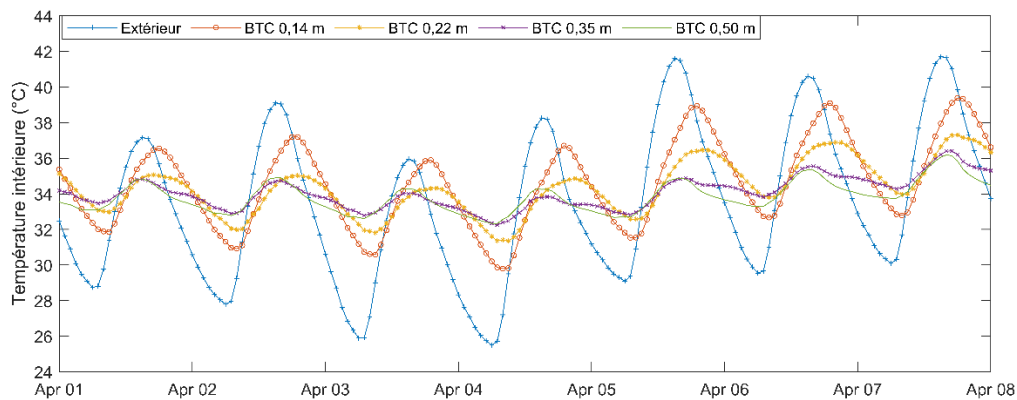


Figure 3.25 : Température intérieure en fonction de l'épaisseur des murs

Le Tableau 3.6 récapitule les indicateurs statistiques associés à cette simulation. La température intérieure moyenne pour le cas de référence (BTC 0,14 m) est de 34,0 °C. Cette température décroît de 0,1 °C ; 0,3 °C et 0,5 °C respectivement pour les épaisseurs de 0,22 m, 0,35 m et 0,50 m.

Tableau 3.6 : Températures intérieures pour différentes épaisseurs de murs

	BTC 0,14 m	BTC 0,22 m	BTC 0,35 m	BTC 0,50 m
<b>Températures</b>				
Intervalle (°C)	27–41	29–39	30–37	30–37
Moyenne (°C)	34,0	33,9	33,7	33,5
Amortissement	0,61	0,30	0,17	0,21
Déphasage (h)	4,5	4,6	2	1,5

Par rapport au cas de référence, la réduction de température journalière atteint respectivement 3 °C, 5 °C et 5 °C pour une épaisseur de 0,22 m, 0,35 m et 0,50 m. Les valeurs moyennes de ces réductions sont de 1,0 °C, 1,6 °C et 1,7 °C. Pendant la nuit, la température dans le cas de référence est la plus basse. Les écarts de température sont en moyenne de 0,9 °C, 1,2 °C et 1,3 °C respectivement pour les épaisseurs de 0,22 m, 0,35 m et 0,50 m. On remarque aussi que les impacts thermiques des épaisseurs 0,35 m et 0,50 m sont proches malgré un accroissement en épaisseur de 43 %.

En principe, le déphasage horaire augmente avec l'épaisseur des parois. On note aussi d'après les travaux de Toure et al. [139] que le déphasage est maximal pour les matériaux BTC pour une épaisseur de 0,32 m. Autrement dit, à partir d'une épaisseur de 0,32 m, les BTC ne transfèrent pratiquement plus de chaleur entre les milieux extérieur et intérieur. On comprend alors que le déphasage croît lorsqu'on passe de 0,14 m à 0,22 m. Par contre, pour les valeurs de 0,35 m et 0,50 m se stabilise autour de 2h. Dans ce second cas, le déphasage est lié aux autres composants qui continuent de transmettre de la chaleur dans le bâtiment comme la toiture et les vitrages.

Les facteurs d'amortissement et déphasage thermiques de BTC 0,14 m, respectivement de 0,61 et 4,50 h ne sont pas appropriés pour une inertie thermique adéquate par rapport aux valeurs de 0,4 et 6 heures recommandées par Moschella et al. [140]. On note aussi que Toure et al. [139] ont obtenu des valeurs de déphasage dans la plage de 6,02- 6,38 h et des facteurs d'amortissement dans la plage de 0,38-0,43 par analyse expérimentale pour un bâtiment pilote tout en BTC de 0,14 m d'épaisseur et de dimensions 1x1x1 m<sup>3</sup>. Les écarts avec les résultats actuels peuvent être principalement expliqués par la différence des propriétés thermophysiques des BTC et des facteurs comme l'humidité. L'étude d'Asan et Sancaktar [141] a montré que les effets d'inertie thermique dépendent des propriétés thermiques du matériau. Concernant l'humidité de l'air, l'étude de Toure et al. [139] a été réalisée dans le climat humide du Sénégal contrairement au climat sec dans notre cas. En effet, Shaik et Talanki Puttaranga Setty [6] ont prouvé que l'humidité relative ambiante, la température et le coefficient de convection extérieure influencent les facteurs d'amortissement et déphasages thermiques des matériaux en terre.

En raison de la meilleure stabilité thermique obtenue avec les BTC de 0,22 m, 0,35 m et 0,50 m, ceux-ci peuvent être utilisés pour améliorer le confort thermique intérieur. Lorsque l'épaisseur du bloc est augmentée de 57 % par rapport à 0,14 m BTC pour obtenir 0,22 m BTC, de 150 % pour obtenir 0,35 m BTC et de 257 % pour obtenir 0,50 m BTC, la réduction moyenne

de la température intérieure est respectivement de 1,0 °C, 1,6 °C et 1,7 °C. L'épaisseur de 0,50 m est moins intéressante en raison de la grande augmentation de l'épaisseur nécessaire pour un faible impact thermique obtenu.

### 3.4.3 Influence combinée de l'isolation et de l'épaisseur des blocs

Les sections précédentes ont étudié les effets distincts de l'isolation et de l'épaisseur des BTC sur la variation de la température intérieure du bâtiment. Les solutions proposées se sont révélées utiles pour amortir les forts flux thermiques dus à l'environnement extérieur. Cette section vise à évaluer l'effet combiné de ces deux options sur la température intérieure du bâtiment. Comme le montrent les résultats obtenus dans les sections précédentes, une isolation avec 0,10 m de laine de verre ou 0,15 m de paille mélangée à 0,02 m de chaux ont des performances thermiques similaires. Dans la suite, le profil de la température intérieure est analysé à travers différentes épaisseurs de paroi avec l'isolant à base de chaux et de paille.

La Figure 3.26 montre les températures simulées avec une épaisseur des murs de 0,14 m.

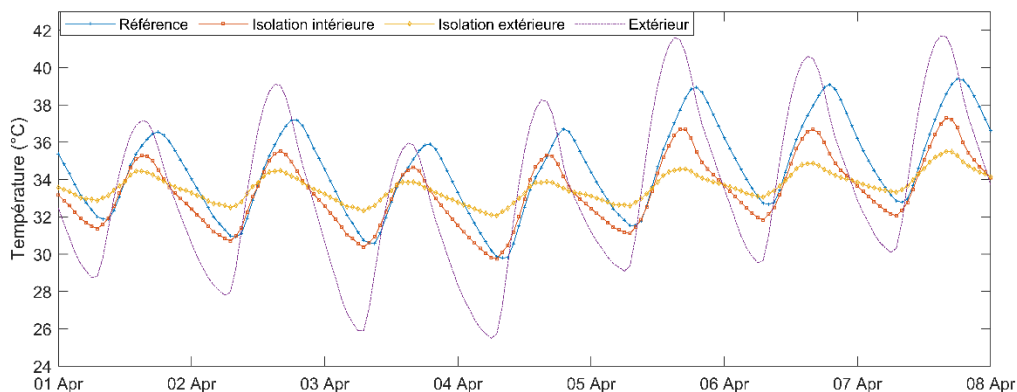


Figure 3.26: Température intérieure pour BTC 0,14 m en fonction du type d'isolation

La température intérieure pour le cas de référence (sans isolation) varie entre 27,4 °C et 41,1 °C avec une moyenne de 34,3 °C. La température intérieure pour une isolation intérieure varie entre 28,8 °C et 38,0 °C avec une moyenne de 33,1 °C. La température intérieure pour une isolation extérieure varie entre 30,0 °C et 35,7 °C avec une moyenne de 33,5 °C. Le facteur d'amortissement est de 44 % pour une isolation intérieure ; 22 % pour une isolation extérieure et 61 % pour le modèle de référence. Ces résultats montrent que la position de la couche d'isolation influence le facteur d'amortissement, même si la résistance thermique reste constante. Des travaux de la littérature ont aussi abouti à cette conclusion pour la disposition de la couche d'isolation dans la paroi en conservant constante la résistance thermique [142]–

[144]. En particulier, Ozel et al. [144] ont montré que l'isolation extérieure donne de meilleures valeurs de facteur d'amortissement comparativement à l'isolation intérieure. Le déphasage horaire pour les deux types d'isolation est de 2,0 h contre 4,5 h pour le cas de référence. Ce résultat est principalement dû à l'influence du flux solaire sur le comportement thermique du bâtiment.

L'isolation extérieure offre une meilleure stabilité thermique grâce au facteur d'amortissement, mais le bâtiment ne profite pas immédiatement de la fraîcheur nocturne. Par contre, l'isolation intérieure offre des températures plus basses après le pic de température journalier en limitant le déstockage de l'énergie emmagasinée dans l'enceinte du bâtiment. Ainsi, en dehors des périodes fortement ensoleillées, l'isolation intérieure offre de meilleures conditions thermiques comparativement à l'isolation externe. On note aussi que les températures dans le cas de référence restent supérieures à celles observées avec une isolation intérieure.

La Figure 3.27 montre les températures simulées avec une épaisseur des murs de 0,22 m. La température intérieure pour le cas de référence varie entre 29,2 °C et 38,5 °C avec une moyenne de 34,1 °C. La température intérieure pour une isolation intérieure varie entre 29,1 °C et 37,9 °C avec une moyenne de 33,2 °C. Aussi, la température intérieure pour une isolation extérieure varie entre 30,0 °C et 35,5 °C avec une moyenne de 33,3 °C. Le facteur d'amortissement est de 42 % pour une isolation intérieure ; 22 % pour une isolation extérieure et 30 % pour le modèle de référence. Le déphasage horaire est de 1,9 h pour isolation intérieure, 1,8 h pour isolation extérieure et 4,6 h pour le cas de référence. Les conclusions pour l'épaisseur BTC 0,14 m restent valables sauf que les températures observées pour le cas de référence sont souvent plus faibles que celles avec isolation intérieure.

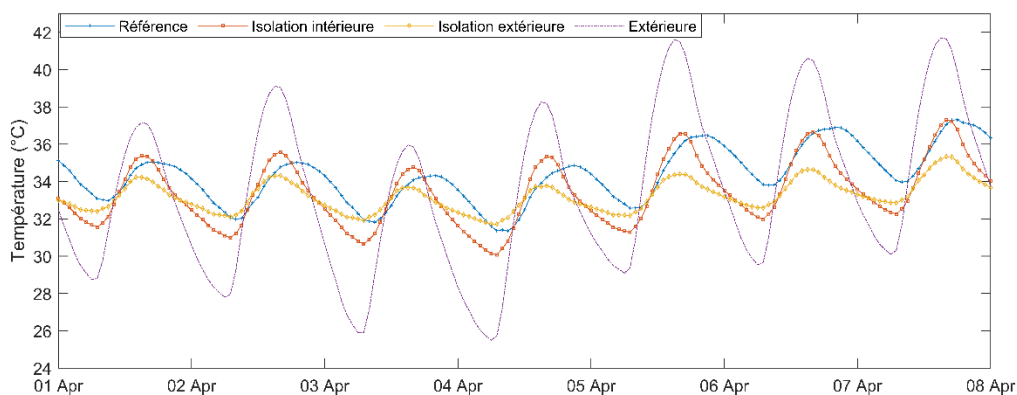


Figure 3.27: Température intérieure pour BTC 0,22 m en fonction du type d'isolation

La Figure 3.28 montre les températures simulées avec une épaisseur des murs de 0,35 m.

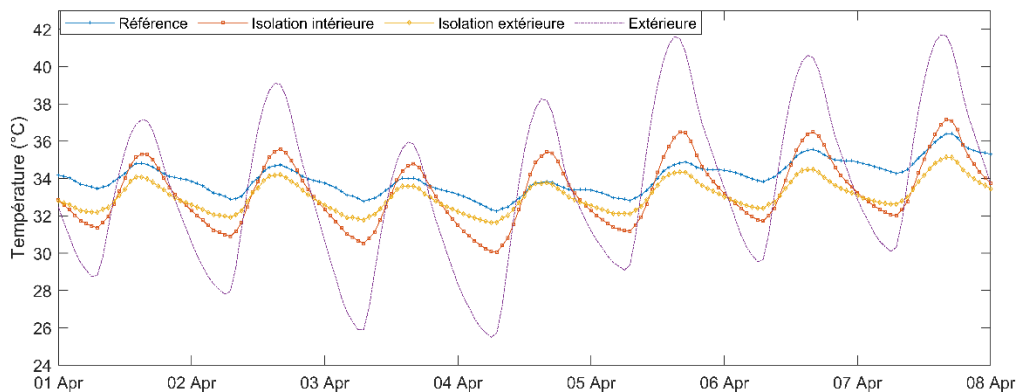


Figure 3.28:Température intérieure pour BTC 0,35 m en fonction du type d'isolation

La température intérieure pour le cas de référence fluctue entre 30,7 °C et 36,7 °C avec une moyenne de 33,9 °C. La température intérieure pour une isolation intérieure reste dans la plage 29,1-37,7 °C avec une moyenne de 33,1 °C. Aussi, la température intérieure pour une isolation extérieure varie entre 30,2 °C et 35,1 °C avec une moyenne de 33,1 °C. Les facteurs d'amortissement sont respectivement de 43 %, 24 % et 21 % pour une isolation intérieure, une isolation extérieure et le modèle de référence. Les valeurs de déphasage horaire sont respectivement de 1,9 h, 1,7 h et 1,5 h pour une isolation intérieure, une isolation extérieure et le modèle de référence. Les conclusions pour l'épaisseur de 0,35 m restent valables à l'exception que le déphasage horaire du cas de référence est le plus faible. Toutefois, l'écart maximal entre ces valeurs de déphasage est de 24 min.

La Figure 3.29 montre les températures simulées avec une épaisseur des murs de 0,50 m.

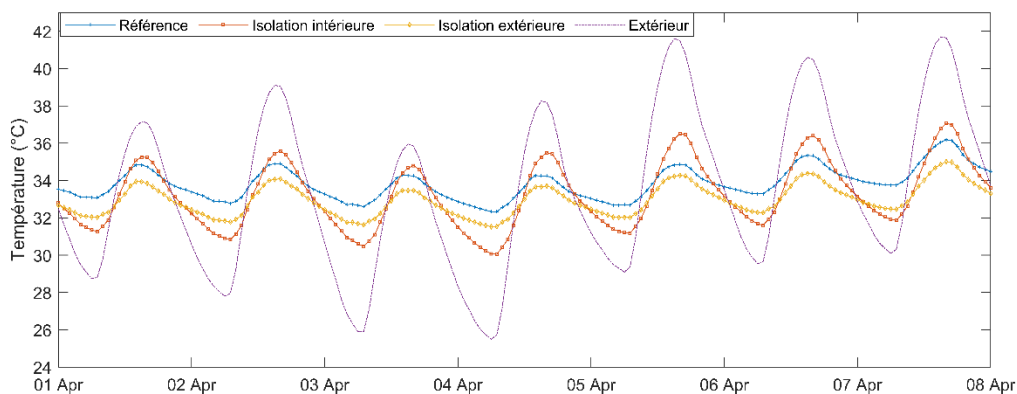


Figure 3.29:Température intérieure pour BTC 0,50 m en fonction du type d'isolation

La température intérieure pour le cas de référence reste dans la plage 30,6-37,0 °C avec une moyenne de 34,0 °C. La température intérieure pour une isolation intérieure fluctue entre 29,1 °C et 37,8 °C avec une moyenne de 33,1 °C. La température intérieure pour une isolation extérieure varie entre 30,1 °C et 35,3 °C avec une moyenne de 33,2 °C. Les valeurs de facteur d'amortissement sont respectivement de 43 %, 23 % et 17 % pour une isolation intérieure ; une isolation extérieure et le modèle de référence. Le déphasage horaire est de 1,9 h pour isolation intérieure, 1,8 h pour isolation extérieure et 2,0 h pour le modèle de référence. Les meilleurs effets d'inertie thermique sont obtenus pour le cas de référence. L'isolation extérieure permet cependant d'avoir des températures plus basses que le cas de référence. Cette situation s'explique par le fait que l'isolation extérieure réduit la quantité d'énergie solaire stockée dans les parois de l'enveloppe. L'isolation intérieure garantit aussi de meilleures températures durant les périodes de températures basses. Cependant, au cours des périodes fortement ensoleillées, l'isolation intérieure expose à des températures supérieures à celles observées dans les cas de référence et d'isolation extérieure.

Dans cette partie, l'influence globale de l'isolation et épaisseur des murs sur l'inertie thermique a été traitée. L'isolation extérieure offre la meilleure stabilité thermique et ne peut garantir le confort dans les conditions de températures extérieures élevées. L'isolation intérieure permet de profiter des températures basses nocturnes à l'exemple des cas de référence. Pour l'épaisseur de 0,14 m, l'isolation intérieure a assuré des températures plus faibles après l'occurrence du pic de température du cas de référence. Cependant pour les trois autres épaisseurs, l'isolation intérieure confronte à des températures plus élevées au cours des périodes les plus chaudes de la journée. Il convient de noter que l'amélioration des conditions climatiques intérieures grâce à l'amélioration thermique de l'enveloppe des logements est toujours possible en réduisant la transmission de chaleur à travers les ouvertures et le toit du bâtiment ; et en utilisant également la ventilation naturelle nocturne. Une autre alternative qui pourrait être abordée dans les travaux futurs concerne la possibilité de stocker la fraîcheur nocturne dans les cloisons internes des bâtiments pour améliorer le refroidissement de l'ensemble de la structure. Toutefois, la protection solaire du bâtiment est préalable à la bonne performance thermique des stratégies proposées.

## 3.5 Impact des flux solaires sur le confort thermique

### 3.5.1 Flux solaires du bâtiment pilote

À partir des données de rayonnements solaires, nous avons pu obtenir les ensoleillements sur chacune des parois des quatre façades. Ces rayonnements permettent le calcul des énergies totales sur chaque façade pendant une année. Ce sont ces résultats qui sont analysés dans ce qui suit.

Le bâtiment pilote connaît deux types de flux solaires qui influencent son comportement thermique. Le premier type est direct et concerne la pénétration du rayonnement solaire à l'intérieur du bâtiment au travers du vitrage des fenêtres et de la porte. Le second type est indirect et englobe les flux solaires sur les parois externes (murs, toiture) de l'enveloppe. Ces deux flux solaires par suite affectent le climat intérieur au travers du stockage thermique et conduction dans les matériaux. La quantification de ces différents flux de chaleur est nécessaire en vue d'adopter les stratégies solaires passives les plus appropriées à la création de conditions confortables.

La Figure 3.30 montre les flux solaires indirects sur les différentes parties de l'enveloppe exposées au rayonnement solaire. Ces flux solaires sont évalués au moyen de l'équation Eq.10.

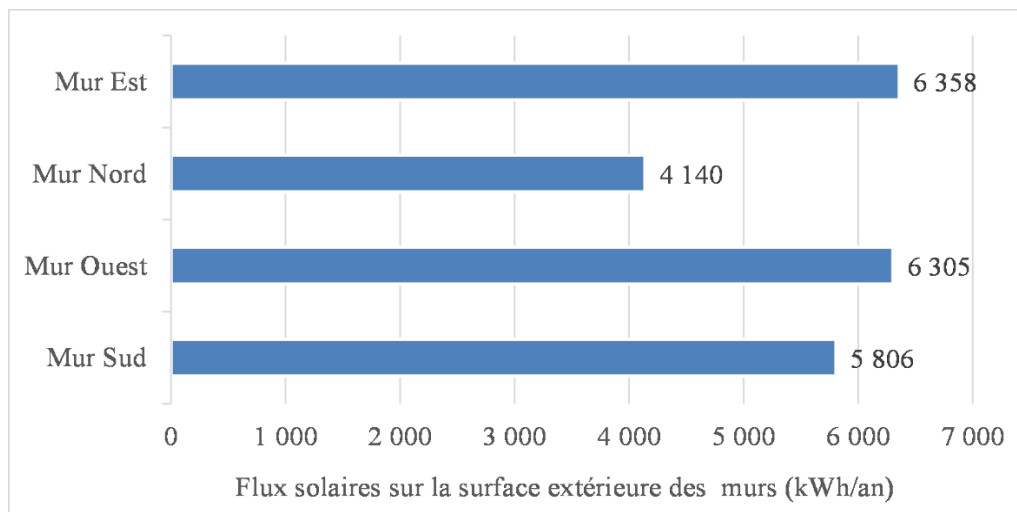


Figure 3.30: Flux solaires annuels sur les surfaces externes des murs du bâtiment pilote

Ce sont principalement les quatre murs du bâtiment pilote. On note que les façades Est et Ouest sont les plus exposées suivies des façades Sud et Nord dans cet ordre. On rappelle que les façades Est et Ouest ont une surface nette de 11,55 m<sup>2</sup> contre 14,20 m<sup>2</sup> et 13,20 m<sup>2</sup>



respectivement pour les façades Nord et Sud. Les parois Est et Ouest reçoivent 56 % du flux solaire annuel. La façade Sud, certes plus large de 15 % que les parois Est et Ouest reçoit une quantité de 26 % du flux solaire total, une quantité assez proche de celle reçue individuellement sur les parois Est et Ouest. La paroi Nord, plus grande de 7 % par rapport à la paroi Sud, est la moins exposée, car elle ne reçoit que 18 % des flux solaires.

La Figure 3.31 montre le profil des moyennes annuelles horaires des flux solaires rapportés à l'unité de surface de 1 m<sup>2</sup>.

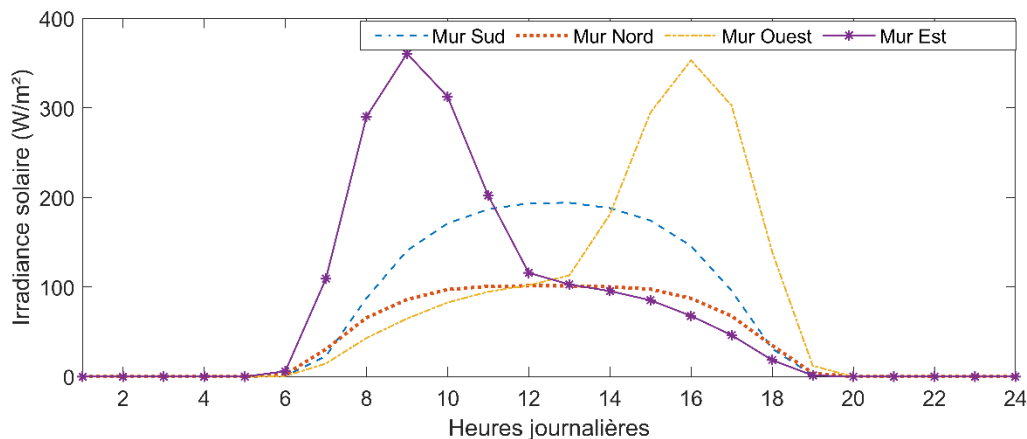


Figure 3.31: Profil horaire des flux solaires annuels sur les surfaces externes

Les valeurs non nulles d'irradiance sont obtenues entre 6 h et 19 h avec au moins une valeur sur une paroi supérieure à 100 W/m<sup>2</sup> entre 7 h et 18 h. Les parois Est, Ouest, Sud et Nord reçoivent respectivement une irradiance moyenne de 76 W/m<sup>2</sup>, 75 W/m<sup>2</sup>, 68 W/m<sup>2</sup> et 41 W/m<sup>2</sup>. Les valeurs maximales sur les parois Est, Ouest, Sud et Nord sont respectivement de 361 W/m<sup>2</sup>, 353 W/m<sup>2</sup>, 194 W/m<sup>2</sup> et 101 W/m<sup>2</sup>. L'irradiation solaire sur les parois externes de l'enveloppe est maximale à l'Est à 9 h, au Nord à 12 h, au Sud à 13 h et à l'Ouest à 16 h.

La Figure 3.32 montre les magnitudes des flux solaires sur les principaux composants internes du bâtiment. Ces flux solaires pénètrent à l'intérieur des locaux au travers du vitrage des fenêtres et de la porte. Les flux sont évalués au moyen de l'équation Eq.12. On note que la surface Ouest, le plancher et les surfaces Est, Nord et Sud sont dans cet ordre les plus exposées. Les proportions de flux solaires sont dans la plage 19-24 % à l'exception des apports thermiques sur la paroi Sud qui est de l'ordre de 12 %. En effet, le plancher cumule 23 % des flux et les surfaces Nord, Est et Ouest respectivement 19 %, 22 % et 24 %.

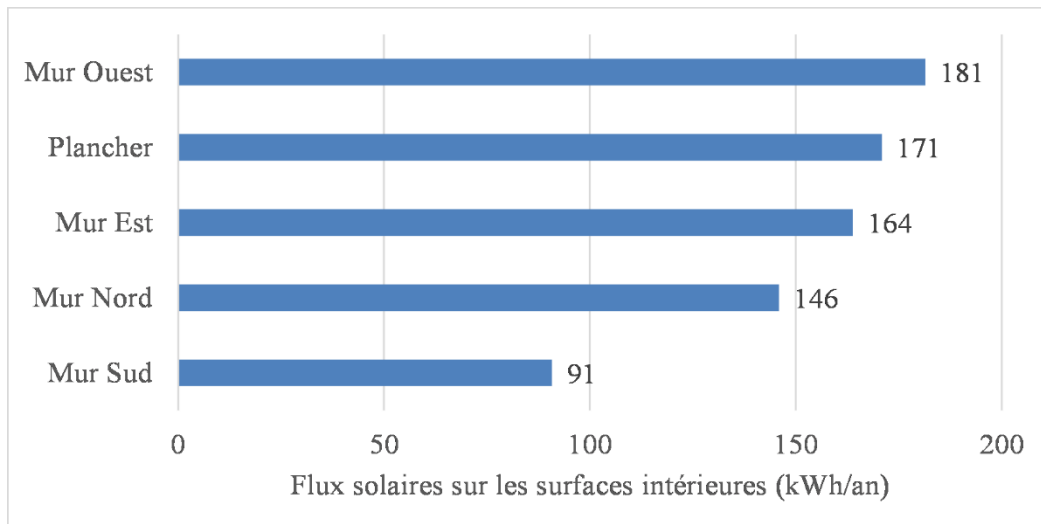


Figure 3.32: Flux solaires annuels sur les surfaces internes principales du bâtiment pilote

La Figure 3.33 montre le profil des moyennes horaires des flux solaires directs dans le bâtiment. Les valeurs non nulles d'irradiance sont obtenues entre 6 h et 19 h avec au moins une valeur sur une paroi supérieure à  $1 \text{ W/m}^2$  entre 7 h et 18 h

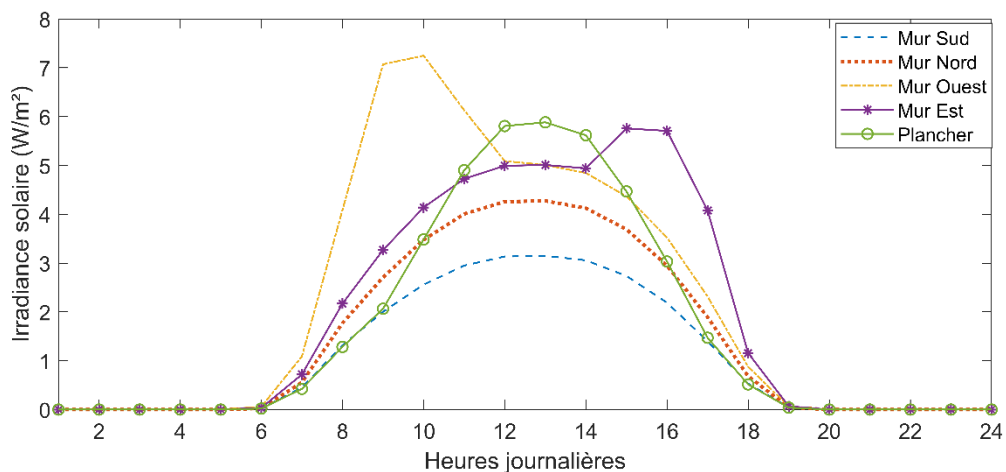


Figure 3.33: Profil horaire des flux solaires annuels sur les surfaces internes

Les surfaces Sud et Nord reçoivent une irradiance moyenne de  $1 \text{ W/m}^2$  tandis que le plancher et les parois Est et Ouest reçoivent  $2 \text{ W/m}^2$  en moyenne. Les valeurs maximales d'irradiance sur les parois Est, Ouest, Sud, Nord, et le plancher sont respectivement de  $6 \text{ W/m}^2$ ,  $7 \text{ W/m}^2$ ,  $3 \text{ W/m}^2$ ,  $4 \text{ W/m}^2$  et  $6 \text{ W/m}^2$ .

La Figure 3.34 présente les proportions de flux solaires pénétrant dans le bâtiment au travers du vitrage des fenêtres et de la porte.

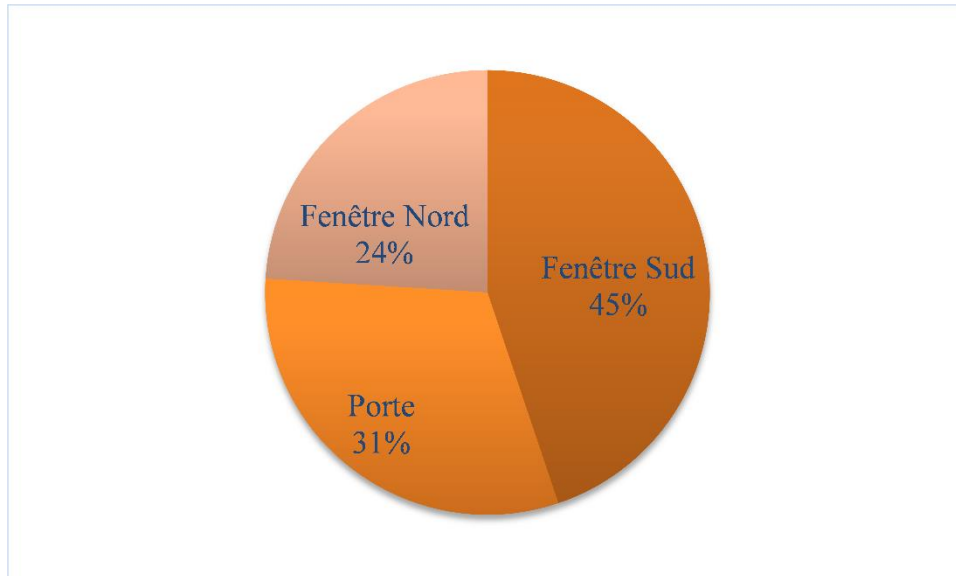


Figure 3.34 : Proportion annuelle de flux solaires directs au travers du vitrage

Il en ressort que les vitrages de la fenêtre Sud, de la porte et de la fenêtre Nord contribuent respectivement à hauteur de 45 %, 31 % et 24 % aux flux solaires directs. On note aussi que les flux solaires de la façade Sud sont de 76 % contre 24 % pour la façade Nord. On rappelle aussi que la façade Sud a une superficie totale de vitrage de 2,14 m<sup>2</sup> contre 1,20 m<sup>2</sup> pour la façade Nord. Il s'ensuit que la façade la plus exposée au rayonnement solaire est aussi celle qui a la plus grande surface de vitrage.

Au regard de la course du soleil, le bâtiment est orienté de sorte à éviter un maximum de rayonnement solaire. En effet, les plus grandes façades sont au Nord et au Sud, les directions les moins exposées au Soleil. Ainsi, l'absence de vitrage sur les faces Est et Ouest empêche l'entrée de rayons solaires directs dans la matinée et la soirée. Le cas contraire aurait favorisé l'éblouissement des occupants dans la matinée et des flux solaires qui réchaufferaient davantage le bâtiment dans la soirée. Ces deux cas précédents auraient accru le manque de confort visuel dans la matinée et thermique dans la soirée. De même, des débords de toiture et un comble contribuent à la protection des rayonnements solaires directs. On souligne aussi que le ratio fenêtre-mur est de 6,19 %, une valeur plus faible que celle de 15 % recommandée pour le contexte climatique de l'étude [1]. Ainsi, le bâtiment pilote est faiblement exposé au rayonnement solaire direct au travers des vitrages.

Les flux solaires sur les parois Est et Ouest sont supérieures à celles sur les parois Nord et Sud pour deux principales raisons (1) la course du soleil et (2) l'absence de vitrage au niveau des murs Est et Ouest. La paroi Sud qui ne peut au plus que bénéficier des flux solaires par la paroi Nord présente les plus faibles flux solaires pour deux raisons (1) course du soleil (2) plus

faible surface de vitrage de la face Nord, environ 56 % du vitrage de la façade Sud. Afin de garantir le confort visuel, il est possible de maximiser la surface de vitrage sur la façade Nord tout en minimisant le vitrage sur la façade Sud. La protection solaire pourrait être optimisée en privilégiant la paroi Sud de sorte à limiter les apports internes de rayonnement solaire.

Le faible ratio fenêtre-mur explique pratiquement le grand écart entre flux solaires indirects et flux solaires directs. En effet, les flux solaires directs sont de 22 MWh contre 988 MWh pour les flux solaires indirects. La faiblesse des flux solaires directs ne signifie toutefois pas qu'ils doivent être négligés. En effet, les flux solaires directs ont un impact immédiat sur les facteurs de confort thermique par exposition directe des occupants au rayonnement solaire thermique. On souligne que les solutions passives décrites dans la section 3 sur l'inertie thermique contribuent à la protection contre les flux solaires indirects. Les flux solaires directs seront particulièrement analysés dans la suite de cette dernière partie du document.

### 3.5.2 Impact des gains solaires sur le confort thermique

Cette section consiste à analyser le confort thermique dans le bâtiment pilote tel que conçu. Elle vise à quantifier le degré d'inconfort afin de servir de modèle de référence pour comparer les améliorations liées à la mise en œuvre de stratégies solaires passives. Pour ce faire, le modèle validé est utilisé pour simuler les températures déterminant le confort que sont la température opérative, la température radiante et la température de l'air intérieur. La Figure 3.35 montre que le profil journalier des moyennes de températures annuelles. Les courbes de températures moyennes intérieures, radiantes et opératives sont pratiquement confondues.

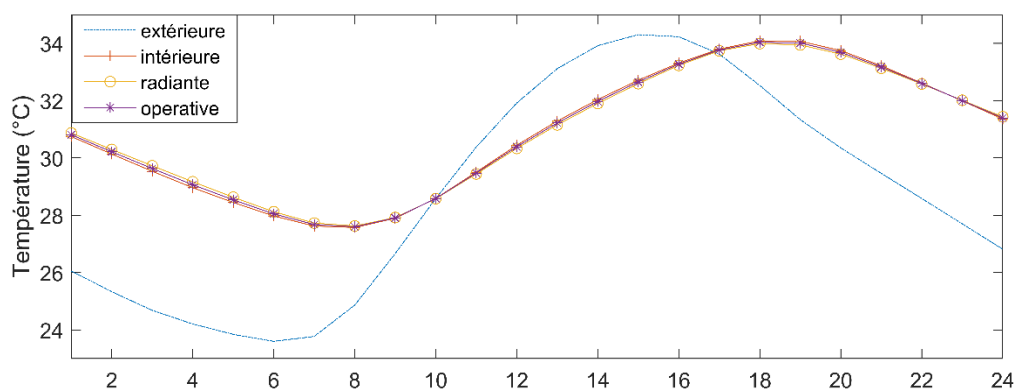


Figure 3.35 : Températures moyennes annuelles horaires

La température extérieure varie entre 23,6 °C et 34,3 °C avec une moyenne de 28,7 °C. Les températures intérieures examinées restent dans la plage 27,6-34,0 °C avec une moyenne de 30,9 °C.

L'analyse des variations journalières de température du premier jour du mois d'avril est proposée pour confirmer la précédente analyse. Le profil des températures journalières est fourni à la Figure 3.36.

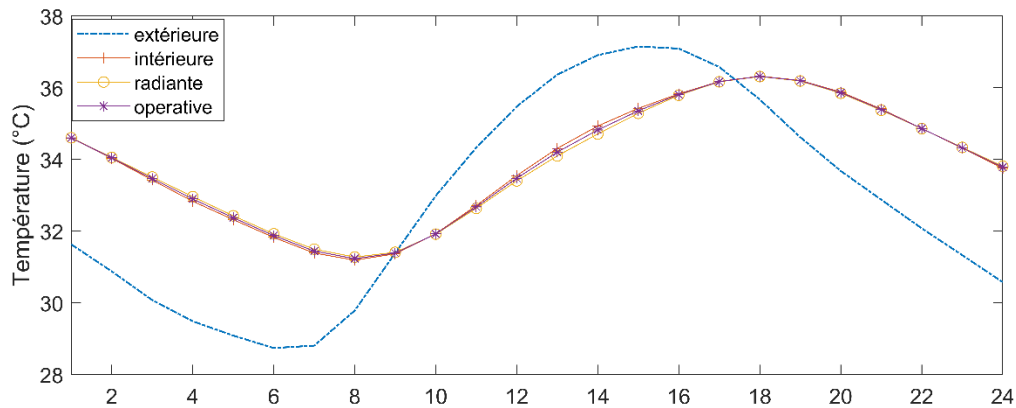


Figure 3.36:Températures horaires du 1er avril

On observe que les températures radiante, opérative et de l'air sont aussi pratiquement confondues. La température extérieure varie entre 28,7 °C et 37,2 °C avec une moyenne de 32,9 °C. La température intérieure (radiante, air ou opérative) varie entre 31,2 °C et 36,3 °C avec une moyenne de 33,9 °C. La température intérieure reste supérieure à 30 °C.

Les températures opératives préalablement obtenues sont par suite analysées suivant leur appartenance aux plages de températures opératives acceptables définies par ASHRAE. La détermination des plages de confort a été décrite à la section 3.6 du chapitre 2. La Figure 3.37 montre que les températures opératives simulées dans le bâtiment pilote sont pour la majorité hors des plages de températures opératives acceptables suivant le standard ASHRAE.

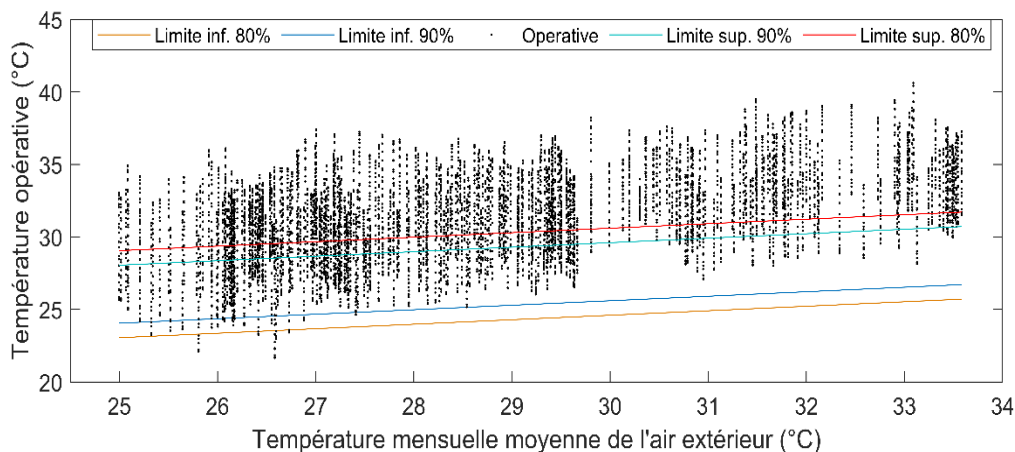


Figure 3.37 : Acceptabilité des températures opératives du bâtiment pilote

Les nombres d'heures de conditions thermiquement acceptables sont de 3143 h et 2093 h, respectivement pour les seuils de 80 % et 90 % de satisfaction des occupants. Ainsi, pour les seuils de 80% et 90%, les périodes d'inconfort correspondent à 64% et 76% du temps annuel d'occupation. On note alors que le bâtiment subit en majorité des températures inconfortables. Il est donc nécessaire de rechercher des stratégies en vue de réduire la température intérieure du bâtiment.

### 3.5.3 Impact des protections solaires existantes du bâtiment pilote

Cette partie consiste à évaluer l'impact de l'utilisation du comble et débord de toiture sur le confort thermique. Pour ce faire, un scénario de simulation du bâtiment pilote sans comble et débords sur la base du modèle thermique validé est élaboré. Le scénario sans comble et débords se limite au niveau du plafond du bâtiment existant. Toutefois, le bois contreplaqué du plafond est remplacé par une toiture métallique de 1,5 mm d'épaisseur. Dans ce qui suit, le bâtiment pilote est désigné « référence ». Le scénario sans comble est désigné comme scénario « sans comble ». La Figure 3.38 présente le plan de façade Nord et le modèle thermique du scénario sans comble.

La Figure 3.39 montre les températures opératives obtenues dans l'intérieur du bâtiment pilote sans comble et sans débords. Les températures opératives représentées sont les moyennes horaires des données simulées sur une base annuelle. On note que la température opérative du modèle de référence reste inférieure à celle du modèle sans comble. La température opérative dans le bâtiment sans comble varie entre 27,5 °C et 35,6 °C avec une moyenne de 31,6 °C. La température du bâtiment de référence varie entre 27,6 °C et 34,3 °C avec une moyenne de 31,1 °C.

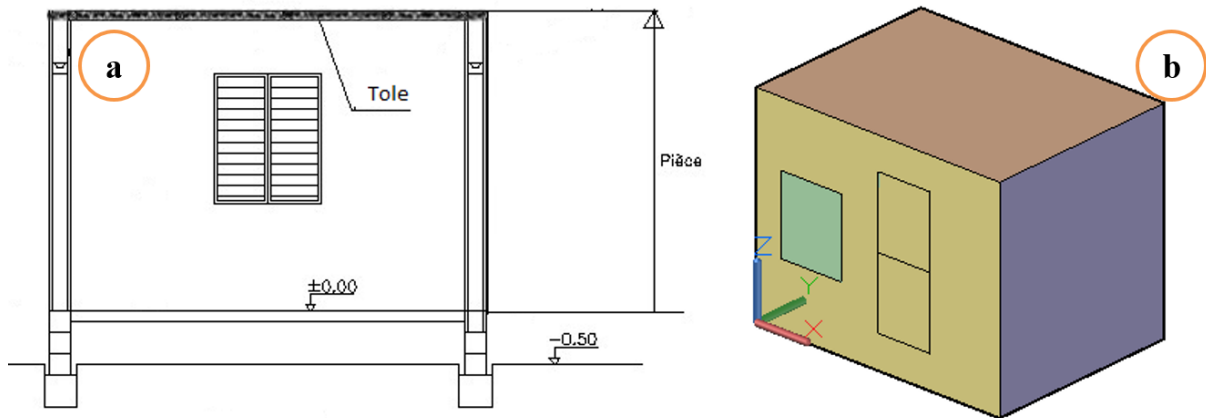


Figure 3.38 : modèles de bâtiment sans comble a. façade Nord b. modèle thermique

Les températures opératives maximales surviennent dans ces deux cas à 17 h. La température opérative minimale du bâtiment de référence est observée à 8 h et dans le bâtiment sans comble à 7 h. L'écart horaire de température entre les deux modèles est supérieur à 1 °C entre 11 h et 17 h avec un maximum d'écart de 1,7 °C observé à 14 h et 15 h.

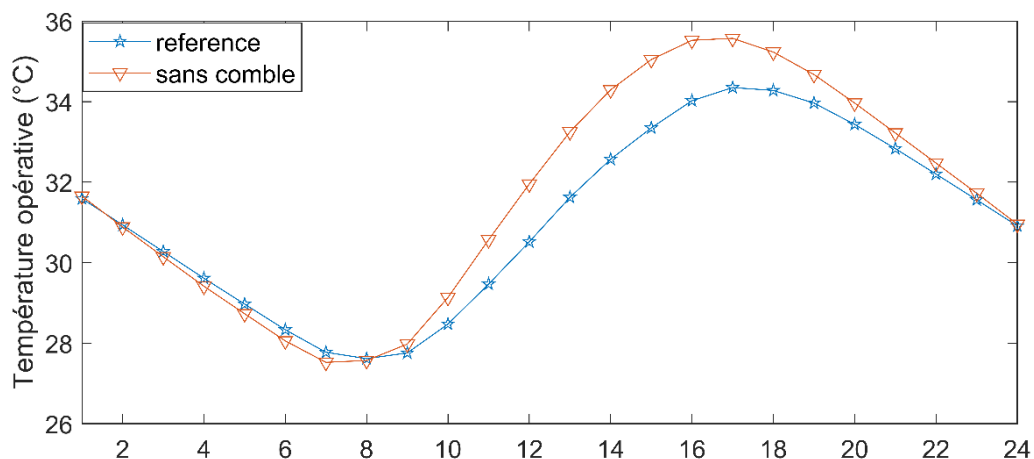


Figure 3.39: Températures opératives dans le bâtiment avec ou sans comble

La Figure 3.40 présente les températures opératives en fonction des températures mensuelles moyennes. Les limites de confort pour 80 % et 90 % sont aussi représentées sur la Figure 3.40. On observe que la plupart des points sont en dehors des deux plages de confort. La Figure 3.41 montre les nombres d'heures acceptables de confort suivant le niveau de confort envisagé. En ce qui concerne le confort à 80 %, le modèle sans comble offre 31 % de temps de confort contre 36 % pour le modèle de référence. Pour un seuil de 90 % de confort, le modèle sans comble offre 21 % de temps de confort contre 24 % pour le modèle de référence. Il s'ensuit que le comble avec les débords de toiture contribue à améliorer le confort thermique des

bâtiments. L'augmentation du temps de confort due à l'utilisation du comble et débords de toiture est respectivement de 15 % et 14 % pour les seuils de confort de 80 % et 90 %.

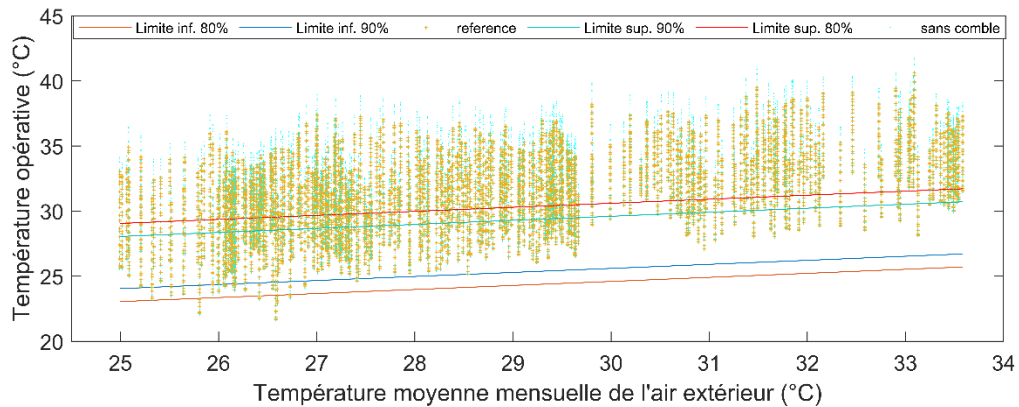


Figure 3.40 : Températures opératives en fonction de la température mensuelle moyenne

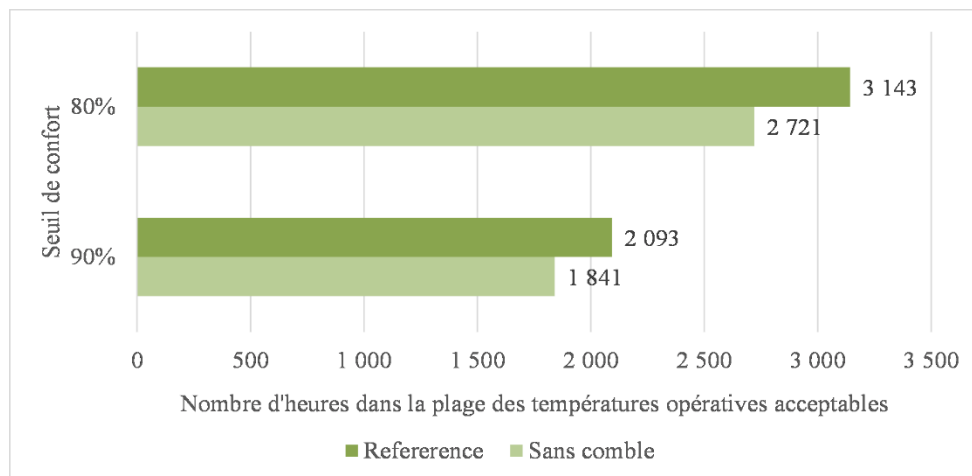


Figure 3.41: Nombre d'heures dans les plages de températures opératives acceptables

La Figure 3.42 montre la différence de température entre la toiture et le plancher suivant les deux cas de simulation considérés. Cette différence est en étroite relation avec la différence de température perçue entre la tête et les pieds d'un éventuel occupant. La limite pour une telle différence de température verticale est fixée à 3 °C selon la norme ASHRAE, ce qui correspond à un pourcentage prévisible d'insatisfaits de 5 % [26]. On peut également observer que le bâtiment sans comble expérimente les températures les plus élevées dans la journée et les plus faibles dans la nuit. Pour le bâtiment de référence, les différences de températures verticales supérieures à 3 °C sont observées entre 14 h-19 h avec un maximum à 17 h de 3,91 °C. Pour le bâtiment sans comble, les différences de températures au-delà de 3 °C surviennent entre 10 h et 18 h avec un maximum de 8,26 °C à 14 h. Ce maximum excède la plage de différence de température maximale fournie par la norme qui se limite à environ 6 °C avec un pourcentage



prévisible d'insatisfaits de 40 % [26]. Cette analyse montre qu'un bâtiment sans comble est source d'inconfort local considérable dû à une trop grande différence de températures verticales.

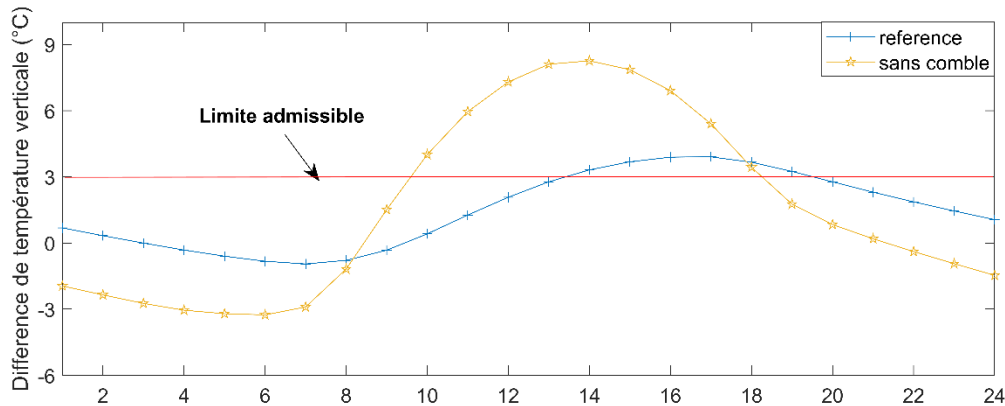


Figure 3.42 : Inconfort local dû aux températures radiantes de la toiture

### 3.5.4 Impact des masques solaires sur le confort thermique

Les Figures 64 et 65 montrent la course du soleil à Ouagadougou avec l'azimut en abscisse et l'altitude en ordonnée au cours de l'année en points colorés. Les choix de masques solaires horizontaux ou verticaux sont fonction de la course du soleil. Pour la fenêtre Sud, au regard de la course du soleil, le choix d'un pare-soleil casquette est a priori adéquat. L'angle est choisi de sorte à maximiser la protection solaire tout en tenant compte de la performance. Ainsi, l'angle d'altitude  $50^\circ$  est retenu. De même, un pare-soleil latéral de  $60^\circ$  est proposé pour chaque côté de fenêtre Nord.

Dans la suite, différents scénarios de protections solaires avec des masques proches au niveau des fenêtres sont évalués. Le choix initial des angles des masques solaires a été traité dans la section précédente en essayant d'optimiser la protection durant les périodes les plus chaudes. La profondeur de la casquette correspondant à l'angle d'altitude de  $50^\circ$  est évaluée à 1 m au regard de la hauteur de fenêtre (1,20 m). De même, la profondeur des masques proches latéraux correspondant à l'azimut de  $60^\circ$  est de 0,30 m au regard de la largeur de fenêtre (1 m). Il est à noter que les angles fournis par Climate consultant sont mesurés à partir du centre du rebord de fenêtre.

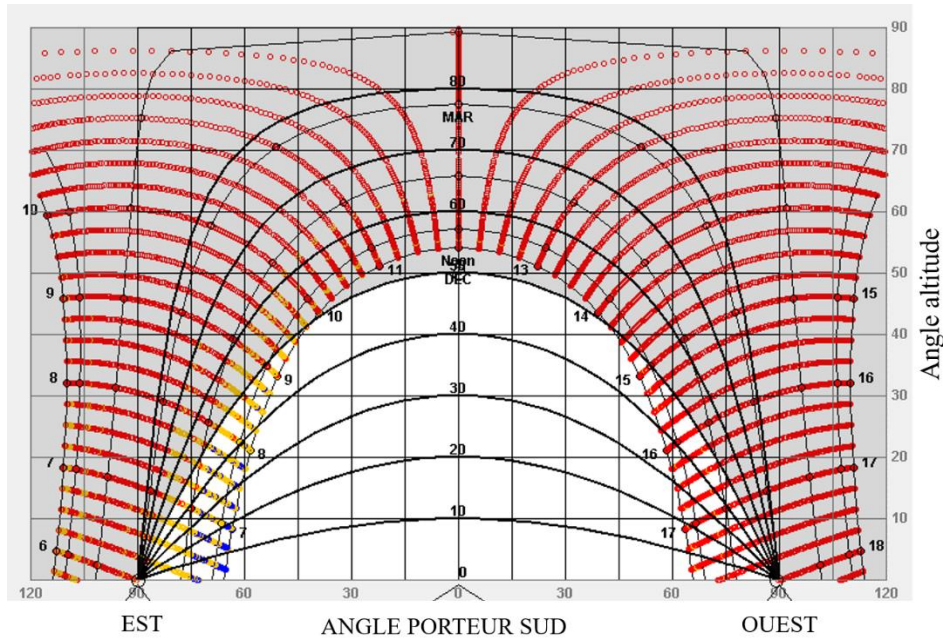


Figure 3.43 : Course du soleil avec l'ombrage lié à un pare-soleil d'angle altitude 50 °

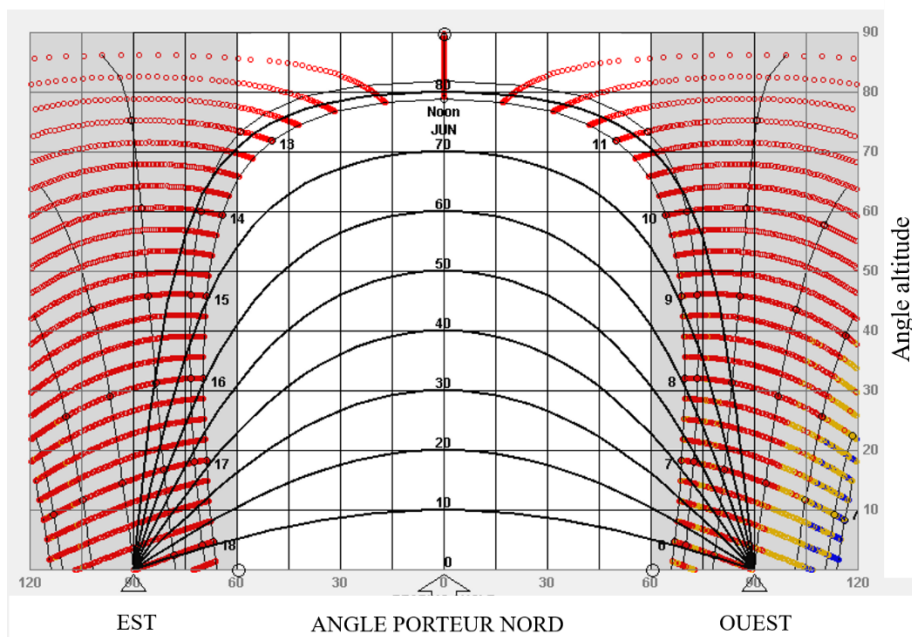


Figure 3.44 : Course du soleil avec l'ombrage lié à un pare-soleil d'angle azimut de 60 °

Le Tableau 3.7 présente les différents cas de simulation concernant les masques solaires proches retenus en fonction des performances initiales des masques choisis avec Climate consultant. On note que ces différentes configurations sont appliquées aux deux fenêtres du bâtiment durant les scénarios de simulation.

La Figure 3.45 montre que les variantes de débords proposées permettent de réduire les flux solaires directs dans le bâtiment.

Tableau 3.7: Variantes des cas de simulation de masques solaires proches

	Pare-soleil	Casquette (m)	Latéral vertical (m)
1		-	-
2		1,5	0,9
3		1	0,6
4		0,5	0,3

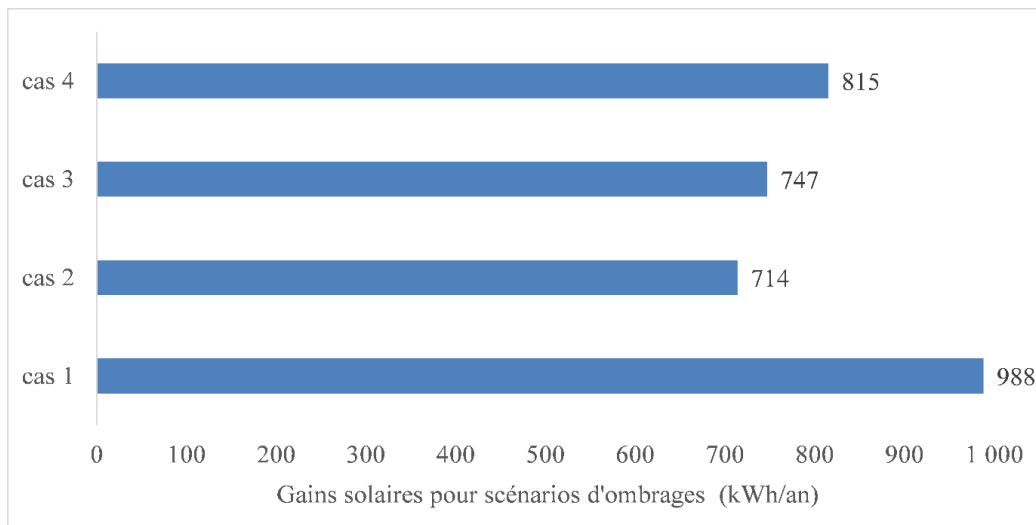


Figure 3.45 : Flux solaires des vitrages suivant les variantes de masques solaires

Les variantes 2, 3 et 4 ont respectivement permis de réduire de 38 %, 32 % et 21 % les apports solaires directs dans le bâtiment. Il est à noter que le vitrage de la porte qui représente 31 % des flux solaires par les vitrages n'est pas protégé dans cette analyse.

La Figure 3.46 montre les températures opératives observées lorsque les différentes variantes de protection solaire sont mises en œuvre.

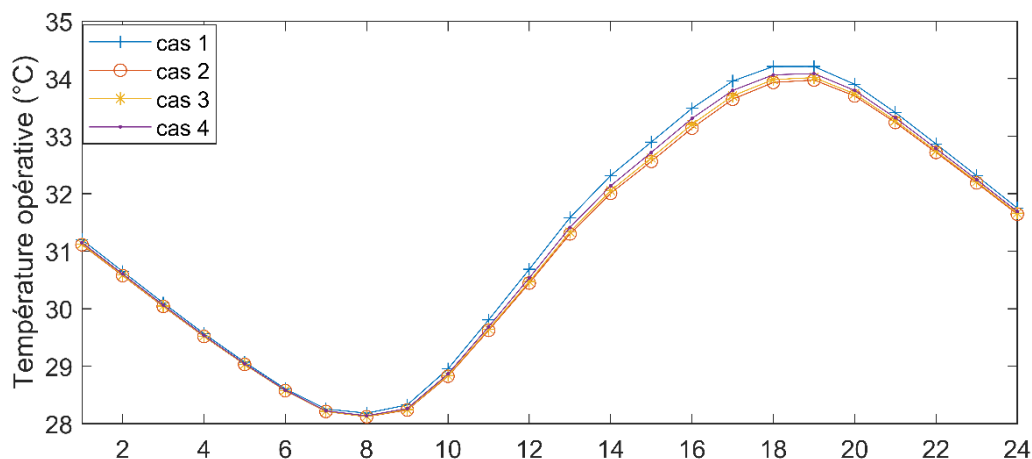


Figure 3.46:Températures opératives suivant les dispositions de masques solaires

La courbe du scénario de référence est légèrement au-dessus des autres qui elles sont pratiquement confondues. Les températures minimums d'environ 28,1 °C surviennent à 8 h et les températures maximales d'environ 34,0 °C à 19 h. L'écart entre températures maximales du modèle de référence (cas 1) et les autres variantes est de 0,3 °C pour les cas 2 et 3 et 0,2 °C pour le cas 4.

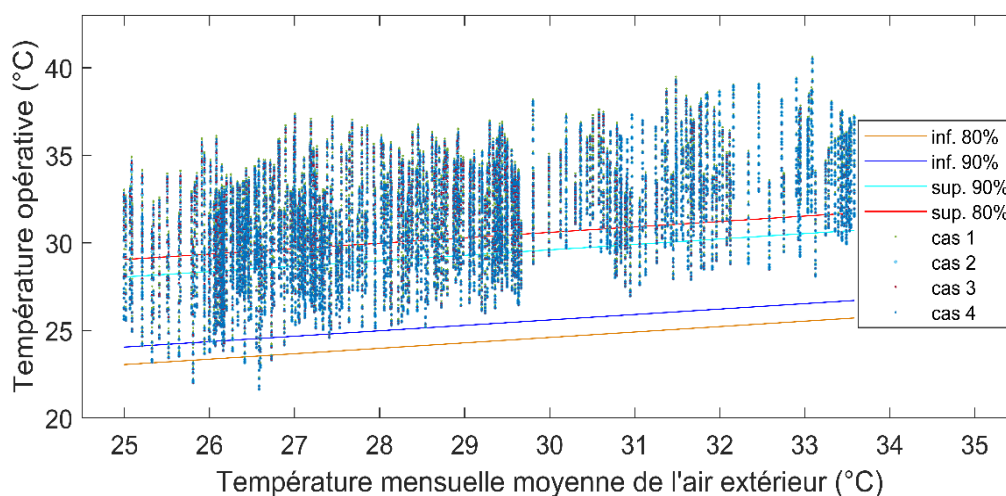


Figure 3.47 : Températures opératives en fonction des températures mensuelles moyennes pour les variantes de masques solaires

On en déduit que les masques proposés n'ont pas suffisamment influencé la température opérative intérieure. Les températures opératives moyennes des cas étudiés sont respectivement de 31,3 °C ; 31,1 °C ; 31,1 °C et 31,2 °C pour les cas 1, 2,3 et 4.

La Figure 3.47 présente les températures opératives en fonction des températures mensuelles moyennes pour les variantes simulées. Les limites de confort pour 80 % et 90 % sont aussi

représentées sur la Figure 3.47. On observe que la plupart des points sont en dehors des deux plages de confort.

La Figure 3.48 montre le nombre d'heures dans la plage de températures opératives acceptables par 80 % des occupants pour les différents vitrages étudiés. Le taux annuel d'heures de conditions acceptables est dans l'intervalle 36 -38 %. L'utilisation de masques solaires proches a amélioré le nombre d'heures de confort de 5 %, 4 % et 3 % respectivement pour les cas 2, 3, et 4 comparativement au cas 1 (cas témoin).

La Figure 3.49 montre pour les différents cas étudiés le nombre d'heures dans la plage de températures opératives acceptables par 90 % des occupants. Le taux annuel d'heures de températures opératives acceptables est entre 24-25 %. Le confort thermique a ainsi été amélioré de 5 %, 5 % et 3 % respectivement pour les cas d'études 2,3 et 4 comparativement au cas 1.

Il convient de souligner que les masques solaires ne protègent que contre la pénétration de rayonnement direct, mais n'ont aucune influence sur le rayonnement diffus et la conduction à travers le vitrage. Il importe alors de tester aussi des modes de protection solaire capables à la fois de contrer les rayonnements directs et diffus. L'utilisation de vitrages sélectifs est une solution fortement envisageable dans ce contexte.

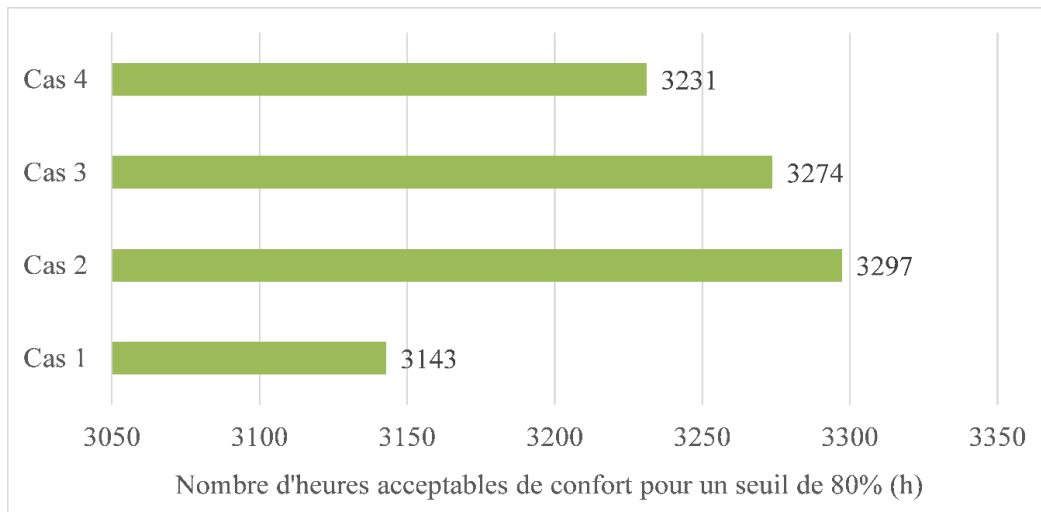


Figure 3.48 : Durée annuelle de températures acceptables à 80 % pour les scénarios d'ombrages

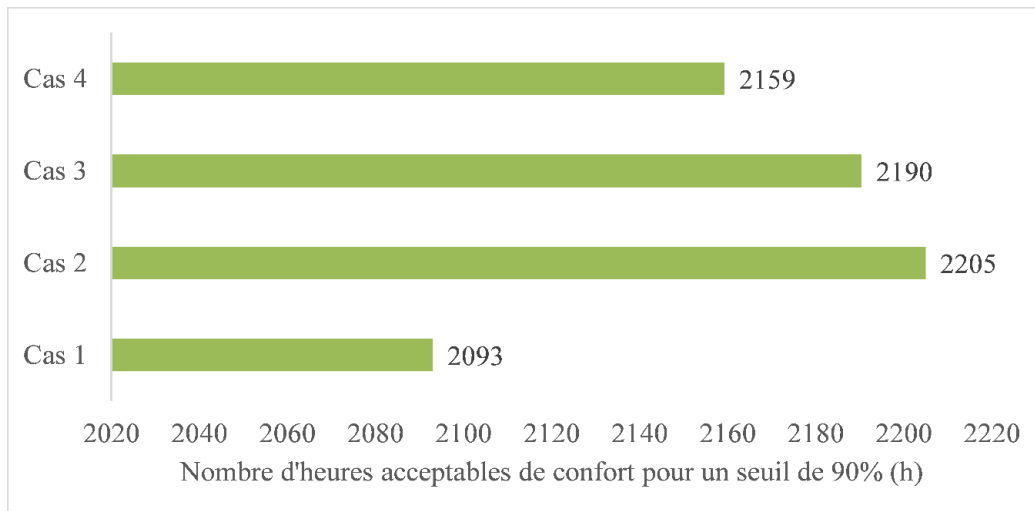


Figure 3.49 : Durée annuelle de températures acceptables à 90 % pour les scénarios d'ombrages

### 3.5.5 Impact des technologies de vitrage sur le confort thermique

Des types de vitrage appropriés sont proposés dans cette section en vue de réduire les gains thermiques à l'intérieur du bâtiment. Les vitrages sont choisis de sorte à minimiser la transmittance solaire et maximiser la réflexion solaire. Les flux solaires suite à l'utilisation des vitrages sont évalués et représentés sur la Figure 3.50. On note que les cinq technologies de vitrage spécial réduisent de façon significative les flux solaires directs dans le bâtiment. Le vitrage électrochimique ECREF permet de réduire de 88 % les flux solaires directs. De même, les recouvrements avec l'acier inoxydable (REF A), le titane (REF B), l'étain (REF C) et l'oxyde d'étain (REF D) permettent respectivement de réduire de 92 %, 83 %, 87 % et 50 % les flux solaires directs.

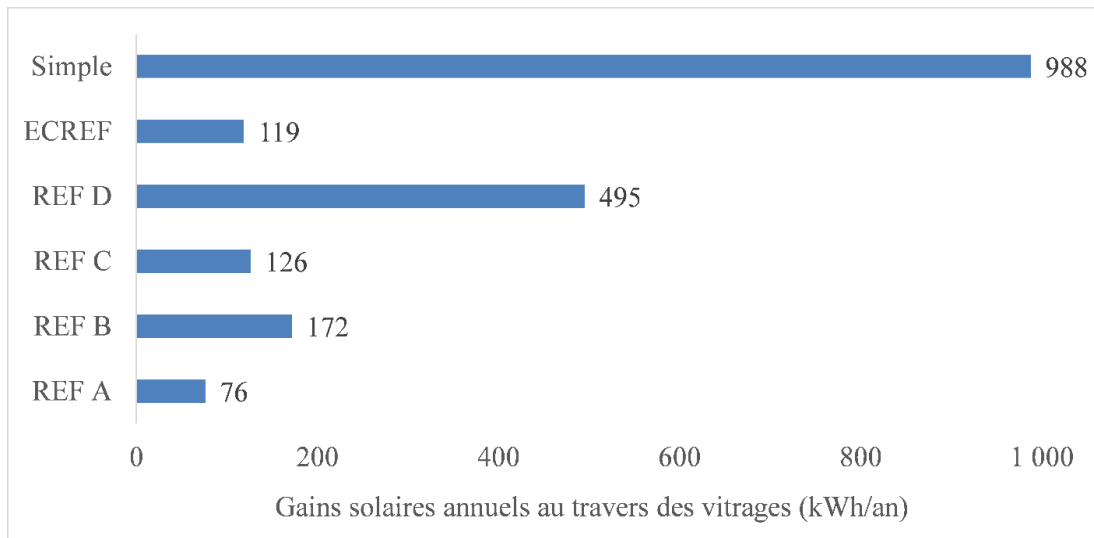


Figure 3.50: Flux solaires au travers des différents vitrages

La Figure 3.51 montre les températures opératives observées lorsque les différents vitrages spéciaux sont utilisés.

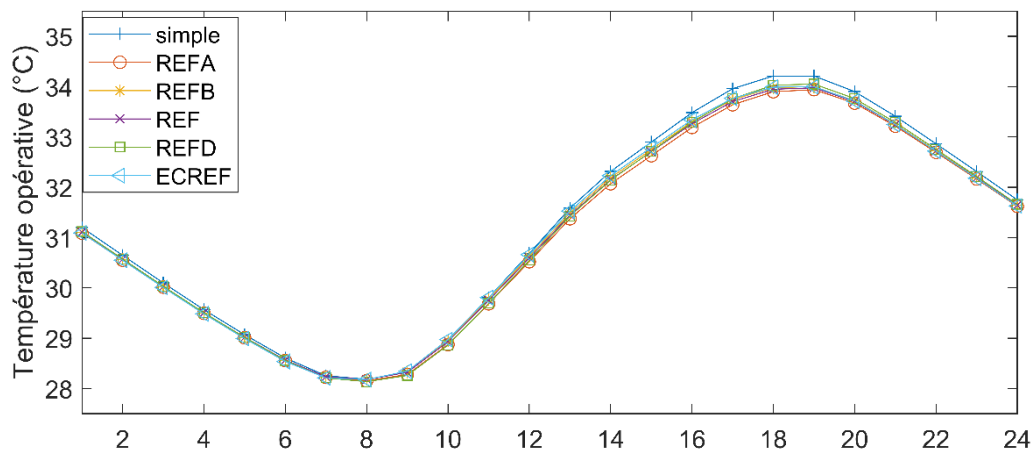


Figure 3.51: Impact sur la température opérative des différents vitrages

On observe que la courbe de vitrage 3 mm est légèrement au-dessus de celles des autres vitrages. Toutefois, les courbes des vitrages spéciaux proposés sont pratiquement confondues. Les températures minimales d'environ 28,2 °C surviennent à 8 h et les températures maximales d'environ 34 °C à 19 h. L'écart entre températures maximales de vitrage simple et celles des vitrages spéciaux est d'environ 0,2 °C. Les moyennes des différentes températures opératives sont respectivement de 31,1 °C ; 31,2 °C ; 31,1 °C ; 31,2 °C ; 31,2 °C et 31,3 °C respectivement pour les vitrages REF A, REF B, REF C, REF D, ECREF et simple 3 mm. Le remplacement du vitrage ordinaire simple de 3 mm par des vitrages spéciaux améliore la température opérative moyenne de 0.1-0.2 °C ce qui est sans conséquence notable sur le confort thermique.

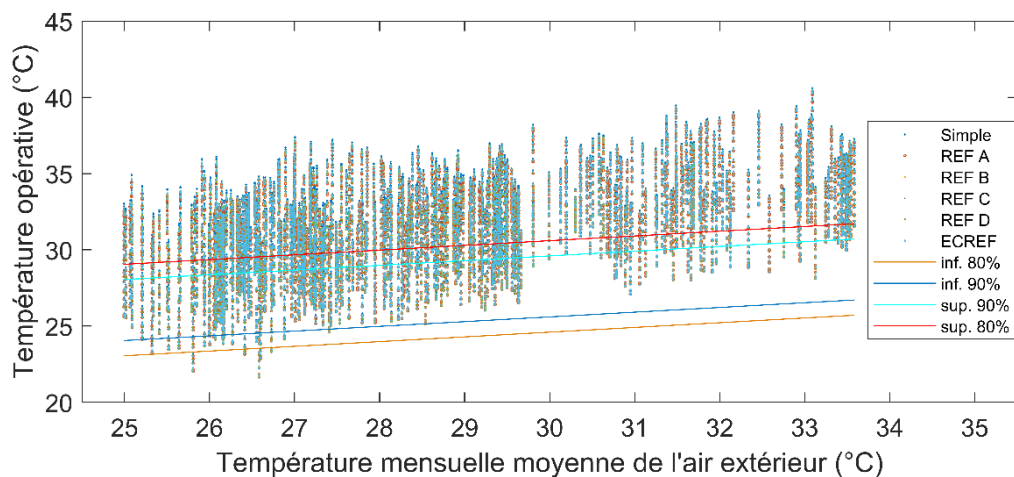


Figure 3.52:Températures opératives en fonction des moyennes mensuelles de températures extérieures suivant les scénarios de vitrages

La Figure 3.52 présente les températures opératives en fonction des températures mensuelles moyennes. On observe que la plupart des points sont en dehors des deux plages de confort. La Figure 3.53 montre le nombre d’heures de températures opératives acceptables par 80 % des occupants pour les différents vitrages étudiés. Le taux annuel d’heures de conditions acceptables est entre 35-36 %. Le remplacement du vitrage simple a amélioré le nombre d’heures de confort de 4 % pour REF A et 3 % pour tous les autres vitrages.

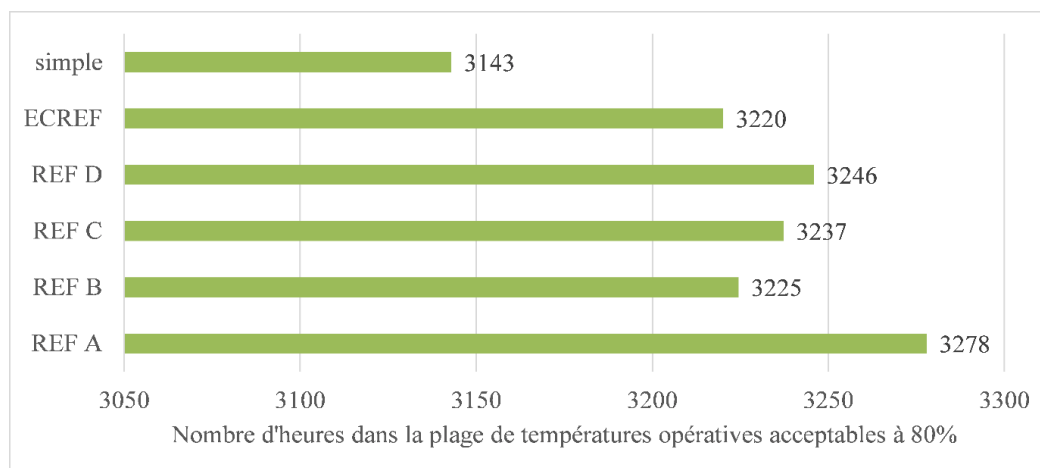


Figure 3.53:Impact des vitrages sur le confort thermique adaptatif à 80 % d’acceptabilité

La Figure 3.54 montre le nombre d’heures de conditions de confort acceptables par 90 % des occupants pour les différents cas étudiés. Le taux annuel d’heures de températures opératives acceptables est entre 23 et24 %. Le remplacement du vitrage simple a amélioré le nombre d’heures de confort de 5 % pour REF A, 4 % pour REF D et 3 % pour le reste des vitrages.



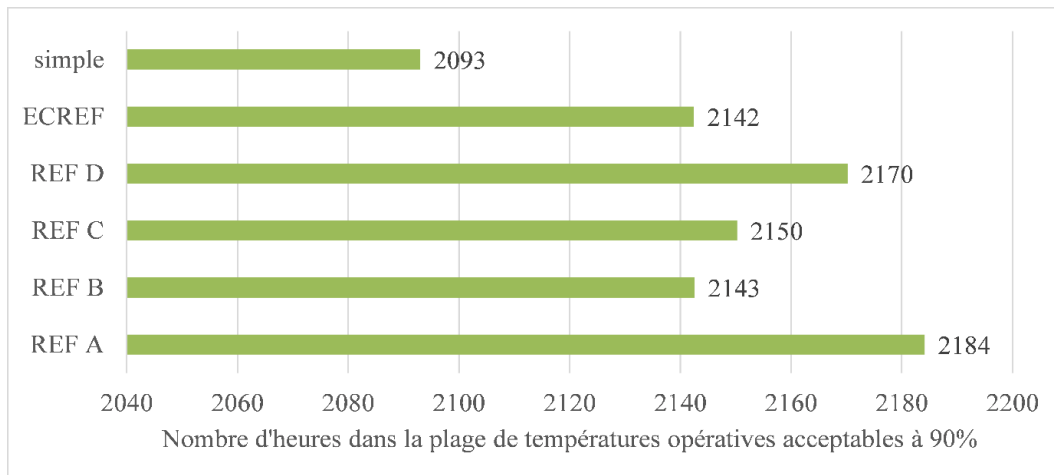


Figure 3.54: Impact des vitrages sur le confort thermique adaptatif à 90 % d'acceptabilité

Dans cette partie, l'étude s'est penchée sur la question relative aux flux solaires dans les bâtiments en climat chaud et sec. La quantification des flux solaires directs et indirects a d'abord été réalisée. L'analyse a montré que les flux solaires qui pénètrent dans le bâtiment pilote au travers du vitrage représentent 4 % du total des flux solaires. Cette faible proportion est aussi liée au faible ratio fenêtre-mur qui est de 6,19 %. Toutefois, des stratégies solaires passives sont nécessaires pour les limiter. L'impact des solutions existantes comme le comble non ventilé et les débords de toiture a alors été analysé. On note à ce niveau une amélioration du confort thermique de 15 % et 14 % du fait de l'existence de ces solutions respectivement pour les seuils d'acceptabilité thermique de 80 % et 90 %. Il convient de souligner à ce niveau que l'absence de ces solutions entraîne aussi un inconfort local notamment lié à la différence de température entre la tôle et le plancher. Cependant, le bâtiment existant expose à des périodes d'inconfort évalué à 64 % du temps annuel d'occupation proposé pour un taux d'acceptabilité de 80%. Ainsi des solutions passives consistant à protéger les fenêtres avec des masques proches ou en utilisant des vitrages spéciaux sont proposées. L'impact des masques proches a été évalué en utilisant Climate Consultant pour concevoir les différents types de masques et EnergyPlus pour déterminer leurs performances thermiques. Il s'ensuit que les masques proches permettent de réduire de 21-30 % les flux solaires au travers des vitrages des fenêtres. Le confort thermique est ainsi amélioré de 4 à 6 %. L'analyse des vitrages spéciaux a consisté à choisir des vitrages recouverts de surface métallique de sorte à réduire leur transmittance solaire et accroître leur réflexion solaire. Les résultats obtenus montrent que les flux solaires sont réduits de 80 à 90 % suite à l'utilisation de ces vitrages. Dans la même logique, les vitrages spéciaux améliorent le confort thermique de 4 à 5 %. L'ensemble des solutions complémentaires envisagées montrent de faibles répercussions sur le confort

thermique, toutefois elles sont essentielles. En effet, les rayonnements directs sur les occupants affectent sérieusement leur confort thermique. Aussi les faibles valeurs d'impacts sont surtout liées au faible ratio fenêtre-mur de 6,19 %. Toutefois, ces solutions nécessitent aussi une prise en compte du confort visuel, donc des analyses complémentaires sont nécessaires pour s'assurer que les stratégies permettent un éclairage naturel suffisant dans le bâtiment.

## **Conclusion**

En résumé, ce troisième chapitre a présenté les résultats expérimentaux et de simulation visant l'amélioration des conditions intérieures des maisons en BTC. Les données expérimentales ont été comparées avec les données de simulation au travers du processus de validation empirique pour garantir la fiabilité des stratégies passives envisagées. L'outil de simulation détaillé EnergyPlus a été utilisé, combiné avec Climate Consultant, un outil simplifié en vue de démontrer la complémentarité des outils bioclimatiques dans la simulation thermique dynamique. L'étude de l'impact de l'épaisseur des murs et de l'inertie thermique ainsi que de l'isolation sur le confort a été étudiée. Une épaisseur de BTC de plus de 0,35 m n'a pas de réelle influence sur le comportement thermique dynamique du bâtiment pilote. L'utilisation de la ventilation nocturne est particulièrement recommandée pour l'isolation extérieure pour profiter des températures nocturnes qui sont plus faibles que celles observées dans le bâtiment pilote. L'impact des masques solaires et vitrages spéciaux sur le confort thermique a montré que ces solutions améliorent le confort thermique de l'ordre de 4-6 %. Toutefois, il convient de souligner que la réduction des flux solaires pour les vitrages spéciaux est de 80-90 % contre 21-30 % pour les masques solaires. Il importe de souligner que le faible ratio fenêtre mur de 6,19 % justifie la faible influence des stratégies de protection solaire sur le confort thermique.

Les bonnes propriétés d'isolation de la paille font des mixages de BTC et paille une piste de recherche très intéressante pour améliorer les propriétés des BTC. On pourrait par exemple envisager des BTC anisotropes, creuses et emplies de paille.

Des stratégies qui méritent d'être analysées à la suite de ce travail sont :

- L'influence des effets d'orientation et des longues surfaces exposées
- Le stockage de fraîcheur dans les lits de galets
- Les stratégies de masques solaires avec effet de cheminée
- L'impact de l'inertie thermique combiné à la ventilation nocturne

- L'influence d'un double toit ouvert sur les quatre cotés
- La protection solaire à base de l'émissivité et réflectivité des matériaux de façade

# Conclusion générale

L'objectif global de cette thèse a été d'examiner la valorisation des matériaux locaux au travers du concept d'architecture bioclimatique pour la réalisation de bâtiments confortables dans les régions chaudes d'Afrique subsaharienne.

L'état de l'art réalisé a permis de mettre en exergue les origines de l'architecture bioclimatique, les différentes stratégies bioclimatiques notamment passives, et l'intérêt de l'architecture bioclimatique dans le monde avec une attention particulière sur l'Afrique. Bien que l'architecture bioclimatique ait été découverte dans les années 1950, elle suscite toujours l'intérêt des scientifiques et même des décideurs pour la mise en œuvre de stratégies économiques assurant un équilibre sain entre l'homme, son environnement et son climat. Toutefois, l'Afrique subsaharienne devra développer ses capacités de recherche à l'instar des pays du Maghreb pour impulser le développement de stratégies bioclimatiques à l'échelle africaine. L'état de l'art a aussi permis de clarifier le concept d'architecture bioclimatique au travers des diagrammes d'analyse et des techniques associées.

Le potentiel bioclimatique de la ville de Ouagadougou a été analysé au travers du diagramme de Givoni pour les pays chauds en voie de développement et celui de Givoni et Milne. La ventilation naturelle, la protection solaire, l'isolation et l'inertie thermique ont été identifiées comme des stratégies à fort potentiel pour la ville de Ouagadougou. Les diagrammes bioclimatiques sont des méthodes générales qui n'intègrent pas les spécificités propres à chaque bâtiment et l'adéquation de leur prédiction peut alors être interrogée. D'où l'utilité d'outils de simulation détaillée comme EnergyPlus pour fournir des analyses minutieuses prenant en compte la complexité des échanges thermiques dynamiques dans les bâtiments.

Dans le même ordre d'idées, les expériences et modèles réalisés au cours des travaux de thèse ont été décrites. Il s'agit d'une description du bâtiment pilote, des conditions d'expérimentation et d'une présentation des moyens d'instrumentation. A cela s'ajoute la modélisation des mécanismes de transfert de chaleur, les critères de validation du modèle de même que les méthodes de calcul des facteurs d'inertie thermique et de confort thermique adaptatif. La modélisation a consisté à évaluer les transferts de chaleur intervenant dans le comportement thermique du bâtiment. Un modèle mathématique a alors été proposé pour l'évaluation des différents flux de chaleur. Les équations de ce modèle ont été implémentées

dans le moteur de calcul thermique EnergyPlus au travers de l'interface Windows EP-Launch. La simulation a consisté à la détermination des températures intérieures sur la base de données relatives à l'enveloppe du bâtiment et à la météo.

Le troisième chapitre concerne l'analyse des résultats d'expérimentation et simulation dans l'optique d'améliorer le climat intérieur du bâtiment pilote. Les données expérimentales ont été présentées sur deux périodes de l'année, l'une chaude et l'autre froide. Les résultats montrent que des stratégies passives sont utiles pour réduire les températures radiantes et intérieures de l'air observées. Une simulation du modèle est effectuée. L'influence de la position géographique des murs sur leurs performances thermiques a alors été examinée. On retient que les déphasages horaires et amortissements thermiques varient suivant la position du mur. Les valeurs de facteurs d'amortissement thermique sont respectivement de 64 %, 64 %, 49 % et 65 % pour les positions Nord, Sud, Est et Ouest. Aussi les valeurs de déphasage horaire sont respectivement de 3,1 h ; 3,1 h ; 7,7 h et 2,6 h pour les positions Nord, Sud, Est et Ouest. Le processus de validation empirique a ensuite permis de confirmer que le modèle prédit les températures intérieures avec des plages d'erreurs acceptables. Des investigations approfondies sur l'inertie thermique et la protection solaire ont alors été initiées à partir du modèle thermique du bâtiment.

De façon globale, l'isolation a permis de réduire la température maximale aux heures chaudes et améliorer la stabilité thermique. L'étude a aussi montré que l'utilisation de 0,15 m de paille avec 0,02 m de chaux donne des performances thermiques identiques à 0,10 m de laine de verre comme isolant. La paille recouverte de chaux peut alors remplacer la laine de verre et représenter une réelle plus-value sur les plans économiques et écologiques. Les bénéfices d'isolation intérieure ou extérieure dépendent du scénario d'occupation. L'isolation intérieure permet de profiter des températures basses nocturnes à l'exemple des cas de référence. Pour l'épaisseur de 0,14 m, l'isolation intérieure a assuré des températures plus faibles après l'occurrence du pic de température du cas de référence. Il convient de noter que l'amélioration des conditions climatiques intérieures, grâce à l'amélioration thermique de l'enveloppe des logements, est toujours possible en réduisant la transmission de chaleur à travers les ouvertures et le toit du bâtiment, et en utilisant également la ventilation naturelle nocturne. Une autre alternative qui pourrait être abordée dans les travaux futurs concerne la possibilité de stocker la fraîcheur nocturne dans les cloisons internes des bâtiments pour améliorer le refroidissement de l'ensemble de la structure. L'étude contribue à combler le

manque d'informations sur l'influence de l'épaisseur des BTC et des matériaux d'isolation dans des conditions climatiques tropicales difficiles. En raison du caractère chaud du climat, des investigations sur les protections solaires appropriées ont aussi été menées.

La quantification des apports solaires directs et indirects a été d'abord réalisée. L'analyse a montré que les flux solaires qui pénètrent dans le bâtiment pilote au travers du vitrage représentent 4 % du total des flux solaires. Cette faible proportion est aussi liée au faible ratio fenêtre-mur qui est de 6,19 %. Toutefois, des stratégies solaires passives sont nécessaires pour les limiter en raison de leur impact direct sur le confort thermique. L'impact des solutions existantes comme l'utilisation de comble et les débords de toiture a alors été analysé. On note à ce niveau une amélioration du confort thermique de 4 % et 5 % respectivement pour les seuils d'acceptabilité thermique de 80 % et 90 %. Il convient de souligner à ce niveau que l'absence de ces solutions entraîne aussi un inconfort local notamment lié à la différence de température entre la tôle et le plancher. Cependant, le bâtiment existant expose à des périodes d'inconfort évalué à 64 % du temps annuel d'occupation proposé pour une acceptabilité de 80%. Ainsi des solutions passives consistant à protéger les fenêtres avec des masques proches ou en utilisant des vitrages sélectifs sont proposées. Les masques solaires réduisent les flux solaires directs de 21 à 30 % tandis que les vitrages spéciaux atteignent les seuils de 80 à 90 %. Toutefois, l'amélioration du confort est entre 4 et 6 % pour ces deux types de solutions. Cette situation se justifie notamment par le faible ratio fenêtre-mur du bâtiment, qui est de 6,19 %. L'ensemble des solutions complémentaires envisagées montrent de faibles répercussions sur le confort thermique. En effet, les rayonnements directs sur les occupants affectent sérieusement leur confort thermique même si la température opérative est acceptable.

Enfin, cette étude pourra évoluer en s'appuyant sur une maison de taille résidence familiale afin d'affiner l'ensemble des résultats obtenus dans le présent travail. Une attention particulière devra alors être portée sur la manière de combiner les stratégies passives les plus efficaces pour assurer des conditions de confort thermique adéquates dans des maisons à faible coût en régions climatiques sèches et chaudes. La notion de confort dans le contexte d'étude mérite d'être examinée pour mieux prendre en compte l'acclimatation des populations que le diagramme de Givoni et Milne sous-estime.

Les dimensions économiques et environnementales gagneraient à être intégrées dans une telle recherche. Il est aussi important de souligner que ce travail peut constituer un support utile dans la démarche de normalisation des secteurs de l'efficacité énergétique dans le

bâtiment en zone sahélienne.

# Bibliographie

- [1] Y. Jannot et T. Djiako, « Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale », *Revue Internationale du Froid*, vol. 17, n° 3, p. 166-173, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0140-7007(94)90015-9).
- [2] Y. Coulibaly, G. Thiombiano, et M. Y. Traoré, « Climat et confort thermique », *Sud Sciences & Technologies*, vol. 2, p. 6, Juillet 1998.
- [3] K. Z. Farhan, M. A. M. Johari, et R. Demirboğa, « Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: A review », *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120276, déc. 2020, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.120276](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120276).
- [4] A. M. Neville, *Properties of concrete*, 5th New edition. Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited, 2012.
- [5] I. C. Change, *The scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [6] O. B. Adegun et Y. M. D. Adedeji, « Review of economic and environmental benefits of earthen materials for housing in Africa », *Frontiers of Architectural Research*, vol. 6, n° 4, p. 519-528, déc. 2017, doi: [10.1016/j.foar.2017.08.003](https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.08.003).
- [7] A. J. Fopossi, R. N. Mutuku, et F. Ngapgue, « Effects of stabilizers on water absorption of compressed earth blocks made from mangu soil », *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, vol. 7, p. 490-495, 2014.
- [8] A. Adam et P. J. Jones, « Thermophysical Properties of Stabilised Soil Building Blocks », p. 9.
- [9] E. Ouedraogo, O. Coulibaly, A. Ouedraogo, et A. Messan, « Mechanical and Thermophysical Properties of Cement and/or Paper (Cellulose) Stabilized Compressed Clay Bricks », *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, vol. 2, n° 2, p. 68-76, 2015.
- [10] (International Energy Agency) IEA, « Africa Energy Outlook: World Energy Outlook Special Report », IEA, Paris, 2019.
- [11] S. Iona, « Albert A. Bartlett », *The Physics Teacher*, vol. 20, n° 5, p. 298-303, mai 1982, doi: [10.1119/1.2341039](https://doi.org/10.1119/1.2341039).
- [12] L. J. Becker et C. Seligman, « Welcome to the Energy Crisis », *Journal of Social Issues*, vol. 37, n° 2, p. 1-7, avr. 1981, doi: [10.1111/j.1540-4560.1981.tb02623.x](https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1981.tb02623.x).
- [13] S. Attia, « Modern History of Sustainable Architecture », in *Regenerative and Positive Impact Architecture*, Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 7-11.
- [14] S. V. Szokolay, « Bioclimatic Architecture and Solar Energy », in *Human Bioclimatology*, vol. 5, A. Auliciems, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, p. 111-131.
- [15] D. Watson, « Bioclimatic design », in *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, R. A. Meyers, Éd. New York, NY: Springer New York, 2017, p. 1-24.
- [16] D. Watson, « Bioclimatic Design bioclimatic design », in *Sustainable Built Environments*, V. Loftness et D. Haase, Éd. New York, NY: Springer New York, 2013, p. 1-30.
- [17] M. Beccali, V. Strazzeri, M. L. Germanà, V. Melluso, et A. Galatioto, « Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, p. 1726-1736, févr. 2018, doi: [10.1016/j.rser.2017.06.062](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.062).



- [18] F. Convertino, S. Di Turi, et P. Stefanizzi, « The color in the vernacular bioclimatic architecture in Mediterranean region », *Energy Procedia*, vol. 126, p. 211-218, sept. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.142.
- [19] I. Cañas et S. Martín, « Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture », *Building and Environment*, vol. 39, n° 12, p. 1477-1495, déc. 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.04.007.
- [20] P. Pourvahidi et M. B. Ozdeniz, « Bioclimatic analysis of Iranian climate for energy conservation in architecture », *Scientific Research and Essays*, vol. 8, n° 1, p. 6–16, 2013.
- [21] G. Desogus, L. G. Felice Cannas, et A. Sanna, « Bioclimatic lessons from Mediterranean vernacular architecture: The Sardinian case study », *Energy and Buildings*, vol. 129, p. 574-588, oct. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.051.
- [22] V. Anna-Maria, « Evaluation of a sustainable Greek vernacular settlement and its landscape: Architectural typology and building physics », *Building and Environment*, vol. 44, n° 6, p. 1095-1106, juin 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.05.026.
- [23] M. K. Singh, S. Mahapatra, et S. K. Atreya, « Bioclimatism and vernacular architecture of north-east India », *Building and Environment*, vol. 44, n° 5, p. 878-888, mai 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.06.008.
- [24] I. Cañas et S. Martín, « Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture », *Building and Environment*, vol. 39, n° 12, p. 1477–1495, 2004.
- [25] L. C. Labaki et D. C. Kowaltowski, « Bioclimatic and vernacular design in urban settlements of Brazil », *Building and Environment*, vol. 33, n° 1, p. 63–77, 1998.
- [26] ANSI/ASHRAE (2017) Standard 55: 2017, « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy », ASHRAE, Atlanta.
- [27] CEN, *EN 15251 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2007.
- [28] ISO, *ISO 7730 – 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*. Switzerland: International Organization for Standardization, 2005.
- [29] X. J. Ye, Z. P. Zhou, Z. W. Lian, H. M. Liu, C. Z. Li, et Y. M. Liu, « Field study of a thermal environment and adaptive model in Shanghai », *Indoor Air*, vol. 16, n° 4, p. 320-326, août 2006, doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00434.x.
- [30] M. Indraganti, R. Ooka, H. B. Rijal, et G. S. Brager, « Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India », *Building and Environment*, vol. 74, p. 39-53, avr. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.01.002.
- [31] M. K. Singh, S. Mahapatra, et S. K. Atreya, « Development of bio-climatic zones in north-east India », *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 12, p. 1250-1257, déc. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.01.015.
- [32] D. H. C. Toe et T. Kubota, « Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot–humid climates using ASHRAE RP-884 database », *Frontiers of Architectural Research*, vol. 2, n° 3, p. 278-291, sept. 2013, doi: 10.1016/j.foar.2013.06.003.
- [33] A. T. Nguyen, M. K. Singh, et S. Reiter, « An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia », *Building and Environment*, vol. 56, p. 291-300, oct. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.03.021.

- [34] C. M. Rodriguez et M. D'Alessandro, « Indoor thermal comfort review: The tropics as the next frontier », *Urban Climate*, vol. 29, p. 100488, sept. 2019, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100488.
- [35] R. J. de Dear et G. S. Brager, « Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55 », *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 6, p. 549-561, juill. 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.
- [36] R. de Dear, J. Xiong, J. Kim, et B. Cao, « A review of adaptive thermal comfort research since 1998 », *Energy and Buildings*, vol. 214, p. 109893, mai 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109893.
- [37] M. Humphreys, « Understanding the adaptive approach to thermal comfort, field studies of thermal comfort and adaptation », *ASHRAE Technical Data Bulletin*, vol. 14, n° 1, p. 1-14, 1998.
- [38] F. Nicol et M. Humphreys, « Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251 », *Building and Environment*, vol. 45, n° 1, p. 11-17, janv. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.12.013.
- [39] S. Semahi, N. Zemmouri, M. K. Singh, et S. Attia, « Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria », *Building and Environment*, vol. 161, p. 106271, août 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106271.
- [40] IEPPF, « Efficacité Énergétique de la climatisation en région tropicale », Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie, Québec, Canada, tome 1 : conception des nouveaux bâtiments, 2006. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF>.
- [41] V. Olgyay, *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism: Some Chapters Based on Cooperative Research with Aladar Olgyay*. Princeton University Press, 1963.
- [42] B. Givoni, « Comfort, climate analysis and building design guidelines », *Energy and Buildings*, vol. 18, n° 1, p. 11-23, janv. 1992, doi: 10.1016/0378-7788(92)90047-K.
- [43] B. Givoni, *Man, climate, and architecture*. Elsevier, 1969.
- [44] D. H. K. Lee et B. Givoni, « Man, Climate, and Architecture », *Geographical Review*, vol. 61, n° 2, p. 318, avr. 1971, doi: 10.2307/214009.
- [45] M. Milne, and B. Givoni, *Architectural design based on climate*, McGraw-Hill. New York: D. Watson (ed.), Energy Conservation Through Building Design, 1979.
- [46] UCLA Energy Design Tools Group, « Climate consultant manuel ». 2020.
- [47] B. Givoni, « Comfort, climate analysis and building design guidelines », *Energy and Buildings*, vol. 18, n° 1, p. 11-23, janv. 1992, doi: 10.1016/0378-7788(92)90047-K.
- [48] S. V. Szokolay, « Climate analysis based on the psychrometric chart », *International Journal of Ambient Energy*, vol. 7, n° 4, p. 171-182, oct. 1986, doi: 10.1080/01430750.1986.9675499.
- [49] S. V. Szokolay, « Climate indices », *International Journal of Ambient Energy*, vol. 11, n° 3, p. 115-120, juill. 1990, doi: 10.1080/01430750.1990.9675165.
- [50] J. C. R. Martínez et V. A. F. Freixanet, « Bioclimatic Analysis Tool: An Alternative to Facilitate and Streamline Preliminary Studies », *Energy Procedia*, vol. 57, p. 1374-1382, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.128.
- [51] S. Visitsak et J. S. Haberl, « An analysis of design strategies for climate-controlled residences in selected climates », p. 11, 2004.
- [52] R. D. Judkoff, « Validation of building energy analysis simulation programs at the solar energy research institute », *Energy and Buildings*, vol. 10, n° 3, p. 221-239, janv. 1988, doi: 10.1016/0378-7788(88)90008-4.

- [53] « Software Listing | Best Directory ». <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software-listing> (consulté le juill. 01, 2020).
- [54] A.-T. Nguyen, S. Reiter, et P. Rigo, « A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis », *Applied Energy*, vol. 113, p. 1043-1058, janv. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- [55] D. Coakley, P. Raftery, et M. Keane, « A review of methods to match building energy simulation models to measured data », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, p. 123-141, sept. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.007.
- [56] P. Strachan, K. Svehla, I. Heusler, et M. Kersken, « Whole model empirical validation on a full-scale building », *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 9, n° 4, p. 331-350, juill. 2016, doi: 10.1080/19401493.2015.1064480.
- [57] P. Strachan, « Model validation using the PASSYS Test cells », *Building and Environment*, vol. 28, n° 2, p. 153-165, avr. 1993, doi: 10.1016/0360-1323(93)90049-9.
- [58] J. Rojas, G. Barrios, G. Huelsz, R. Tovar, et S. Jalife-Lozano, « Thermal performance of two envelope systems: Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations », *Journal of Building Physics*, vol. 39, n° 5, p. 452-460, mars 2016, doi: 10.1177/1744259115591993.
- [59] A. L. Pisello, F. Cotana, A. Nicolini, et C. Buratti, « Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal-energy performance in winter conditions: In field experiment », *Energy and Buildings*, vol. 80, p. 218-230, sept. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.017.
- [60] A. Piccolo, « Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environmental test cell », *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 9, p. 1409-1417, sept. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.03.010.
- [61] H. Manz, P. Loutzenhiser, T. Frank, P. A. Strachan, R. Bindi, et G. Maxwell, « Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes—Experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis », *Building and Environment*, vol. 41, n° 12, p. 1784-1797, déc. 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.020.
- [62] A. J. N. Khalifa et R. H. Marshall, « Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 33, n° 10, p. 2219-2236, oct. 1990, doi: 10.1016/0017-9310(90)90122-B.
- [63] F. Bauman, B. Andersson, W. L. Carroll, R. Kammerud, et N. E. Friedman, « Verification of BLAST by Comparison With Measurements of a Solar-Dominated Test Cell and a Thermally Massive Building », *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 105, n° 2, p. 207-216, mai 1983, doi: 10.1115/1.3266367.
- [64] A. Akbarzadeh, W. W. S. Charters, et D. A. Lesslie, « Thermocirculation characteristics of a Trombe wall passive test cell », *Solar Energy*, vol. 28, n° 6, p. 461-468, 1982, doi: 10.1016/0038-092X(82)90317-6.
- [65] A. I. Omar, D. David, E. Vergnault, J. Virgone, et A. I. Idriss, « A new set of indicators to evaluate the bioclimatic performance of air conditioned buildings in a hot and humid climate », *Journal of Building Engineering*, vol. 31, p. 101350, sept. 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101350.
- [66] L. Rincón, A. Carrobé, I. Martorell, et M. Medrano, « Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design », *Journal of Building Engineering*, vol. 24, p. 100732, juill. 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.100732.

- [67] M. K. Cherier, T. Benouaz, S. M. A. Bekkouche, et M. Hamdani, « Some solar passive concepts in habitat through natural ventilation case study: Dry climate in Algeria Ghardaia », *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 12, p. 1-7, sept. 2018, doi: 10.1016/j.csite.2018.02.002.
- [68] A. I. Omar, J. Virgone, E. Vergnault, D. David, et A. I. Idriss, « Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by Natural Convection in Djibouti », *Energy Procedia*, vol. 140, p. 361-373, déc. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.149.
- [69] N. E. Karabag et N. Fellahi, « Learning from Casbah of Algiers for more Sustainable Environment », *Energy Procedia*, vol. 133, p. 95-108, oct. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.376.
- [70] N. Aste, R. S. Adhikari, C. Del Pero, F. Leonforte, et I. Timis, « Sustainable Building Design in Kenya », *Energy Procedia*, vol. 105, p. 2803-2810, mai 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.606.
- [71] T. Camara, B. Kamsu-Foguem, B. Diourte, A. I. Maiga, et A. Habbadi, « Management and assessment of performance risks for bioclimatic buildings », *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, p. 654-667, mars 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.063.
- [72] N. Belkacem, L. Loukarfi, M. Missoum, H. Naji, A. Khelil, et M. Braikia, « Assessment of energy and environmental performances of a bioclimatic dwelling in Algeria's North », *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 38, n° 1, p. 64-88, janv. 2017, doi: 10.1177/0143624416669554.
- [73] F. Abbassi, N. Dimassi, et L. Dehmani, « Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations », *Energy and Buildings*, vol. 80, p. 302-308, sept. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.036.
- [74] A. H. A. Mahmoud, « An analysis of bioclimatic zones and implications for design of outdoor built environments in Egypt », *Building and Environment*, vol. 46, n° 3, p. 605-620, mars 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.09.007.
- [75] D. Morillón-Gálvez, R. Saldaña-Flores, et A. Tejeda-Martínez, « Human bioclimatic atlas for Mexico », *Solar Energy*, vol. 76, n° 6, p. 781-792, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.11.008.
- [76] K. Ajibola, « Design for comfort in Nigeria — a bioclimatic approach », *Renewable Energy*, vol. 23, n° 1, p. 57-76, mai 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00113-0.
- [77] N. Borda-Diaz, P. I. Mosconi, et J. A. Vazquez, « Passive cooling strategies for a building prototype design in a warm-humid tropic climate », *Solar & Wind Technology*, vol. 6, n° 4, p. 389-400, janv. 1989, doi: 10.1016/0741-983X(89)90058-1.
- [78] R. K. Herz, « Considering climatic factors for urban land use planning in the Sahelian zone », *Energy and Buildings*, vol. 11, n° 1-3, p. 91-101, mars 1988, doi: 10.1016/0378-7788(88)90025-4.
- [79] B. I. Ouedraogo, G. J. Levermore, et J. B. Parkinson, « Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso », *Building and Environment*, vol. 49, p. 270-282, mars 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.10.003.
- [80] Y. Coulibaly, *Economies d'Énergie Dans Le Bâtiment Zones Tropicales & Chaudes*. Sud Sciences Et Technologies, 2020.
- [81] Y. Coulibaly, *Economies d'Énergie Dans Le Bâtiment Zones Tropicales & Régions Chaudes*. Sud Sciences Et Technologies, 2020.
- [82] INSD, « Habitat, assainissement et accès à l'eau potable », Institut national de la statistique et de la démographie, Enquête multisectorielle continue (EMC) 2014, nov. 2015.
- [83] M. Achenza et L. Fenu, « On Earth Stabilization with Natural Polymers for Earth Masonry Construction », *Mater Struct*, vol. 39, n° 1, p. 21-27, août 2007, doi: 10.1617/s11527-005-9000-0.

- [84] A. J. Bryan, « Criteria for the suitability of soil for cement stabilization », *Building and Environment*, vol. 23, n° 4, p. 309-319, janv. 1988, doi: 10.1016/0360-1323(88)90037-6.
- [85] M. R. Hall, K. B. Najim, et P. K. Dehdezi, « 9 - Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques », in *Modern Earth Buildings*, M. R. Hall, R. Lindsay, et M. Krayenhoff, Éd. Woodhead Publishing, 2012, p. 222-255.
- [86] R. Bahar, M. Benazzoug, et S. Kenai, « Performance of compacted cement-stabilised soil », *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, n° 7, p. 811-820, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>.
- [87] S. Omar Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, et F. Tsobnang, « Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso », *Construction and Building Materials*, vol. 165, p. 333-345, mars 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051.
- [88] C. M. Hema, G. Van Moeseke, A. Evrad, L. Courard, et A. Messan, « Vernacular housing practices in Burkina Faso: representative models of construction in Ouagadougou and walls hygrothermal efficiency », *Energy Procedia*, vol. 122, p. 535-540, sept. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.398.
- [89] R. Tiskatine *et al.*, « Thermo-physical analysis of low-cost ecological composites for building construction », *Journal of Building Engineering*, vol. 20, p. 762-775, nov. 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2018.09.015.
- [90] E. Quagliarini et S. Lenci, « The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks », *Journal of Cultural Heritage*, vol. 11, n° 3, p. 309-314, juill. 2010, doi: 10.1016/j.culher.2009.11.012.
- [91] L. Aouba, M. Coutand, B. Perrin, et H. Lemercier, « Predicting thermal performance of fired clay bricks lightened by adding organic matter: Improvement of brick geometry », *Journal of Building Physics*, vol. 38, n° 6, p. 531-547, mai 2015, doi: 10.1177/1744259115571078.
- [92] M. B. Pritchard et A. Pitts, « Evaluation of Strawbale Building: Benefits and Risks », *Architectural Science Review*, vol. 49, n° 4, p. 372-384, déc. 2006, doi: 10.3763/asre.2006.4949.
- [93] D. Y. K. Toguyeni, « Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw », *Energy and Buildings*, p. 7, 2012.
- [94] D. Samuel, E. Arnaud, B. Christophe, et L. Frédéric, « Temperature and moisture storage in crop-based materials: Modelling a straw bale wall subject to a thermal shock », *Journal of Building Physics*, vol. 39, n° 5, p. 421-439, mars 2016, doi: 10.1177/1744259115589680.
- [95] O. Douzane, G. Promis, J.-M. Roucoult, A.-D. Tran Le, et T. Langlet, « Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations », *Journal of Building Engineering*, vol. 8, p. 91-98, déc. 2016, doi: 10.1016/j.jobe.2016.10.002.
- [96] F. D'Alessandro, F. Bianchi, G. Baldinelli, A. Rotili, et S. Schiavoni, « Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance », *Journal of Building Engineering*, vol. 11, p. 56-68, mai 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.03.012.
- [97] S. Verbeke et A. Audenaert, « Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, p. 2300-2318, févr. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.083.
- [98] K. Ip et A. Miller, « Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building – The Brighton Earthship », *Renewable Energy*, vol. 34, n° 9, p. 2037-2043, sept. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.02.006.

- [99] D. Medjelekh, L. Ulmet, S. Abdou, et F. Dubois, « A field study of thermal and hygric inertia and its effects on indoor thermal comfort: Characterization of travertine stone envelope », *Building and Environment*, vol. 106, p. 57-77, sept. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.06.010.
- [100] S. Ferrari, « Building envelope and heat capacity: re-discovering the thermal mass for winter energy saving », p. 6, 2007.
- [101] L. Zhu, R. Hurt, D. Correia, et R. Boehm, « Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house », *Energy and Buildings*, vol. 41, n° 3, p. 303-310, mars 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.10.003.
- [102] S. C. Camacho-Montano, M. Cook, et A. Wagner, « Avoiding overheating in existing school buildings through optimized passive measures », *Building Research & Information*, p. 1-15, sept. 2019, doi: 10.1080/09613218.2019.1663137.
- [103] J. Jazaeri, R. L. Gordon, et T. Alpcan, « Influence of building envelopes, climates, and occupancy patterns on residential HVAC demand », *Journal of Building Engineering*, vol. 22, p. 33-47, mars 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2018.11.011.
- [104] G. Guglielmini, U. Magrini, et E. Nannei, « The Influence of the Thermal Inertia of Building Structures On Comfort and Energy Consumption », *Journal of Thermal Insulation*, vol. 5, n° 2, p. 59-72, oct. 1981, doi: 10.1177/109719638100500201.
- [105] L. Rodrigues, V. Sougkakis, et M. Gillott, « Investigating the potential of adding thermal mass to mitigate overheating in a super-insulated low-energy timber house », *Int J Low-Carbon Tech*, vol. 11, n° 3, p. 305-316, sept. 2016, doi: 10.1093/ijlct/ctv003.
- [106] A. Brambilla et T. Jusselme, « Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype », *Energy and Buildings*, vol. 156, p. 281-292, déc. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.070.
- [107] P. M. Toure, Y. Dieye, P. M. Gueye, M. Faye, et V. Sambou, « Influence of envelope thickness and solar absorptivity of a test cell on time lag and decrement factor », *Journal of Building Physics*, p. 174425911986344, juill. 2019, doi: 10.1177/1744259119863446.
- [108] A. B. Daemei, S. R. Eghbali, et E. M. Khotbehsara, « Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones », *Journal of Building Engineering*, vol. 25, p. 100758, sept. 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100758.
- [109] Y. G. Yohanis et B. Norton, « Useful solar heat gains in multi-zone non-domestic buildings as a function of orientation and thermal time constant », *Renewable Energy*, vol. 27, n° 1, p. 87-95, sept. 2002, doi: 10.1016/S0960-1481(01)00163-X.
- [110] I. Csáky et F. Kalmár, « Investigation of the relationship between the allowable transparent area, thermal mass and air change rate in buildings », *Journal of Building Engineering*, vol. 12, p. 1-7, juill. 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.05.002.
- [111] L. G. Valladares-Rendón, G. Schmid, et S.-L. Lo, « Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems », *Energy and Buildings*, vol. 140, p. 458-479, avr. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.073.
- [112] T. Zhang, D. Wang, H. Liu, Y. Liu, et H. Wu, « Numerical investigation on building envelope optimization for low-energy buildings in low latitudes of China », *Build. Simul.*, oct. 2019, doi: 10.1007/s12273-019-0577-6.
- [113] M. K. Nematchoua *et al.*, « Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates », *Solar Energy*, vol. 207, p. 458-470, sept. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.110.

- [114] A. Aldawoud, « Conventional fixed shading devices in comparison to an electrochromic glazing system in hot, dry climate », *Energy and Buildings*, vol. 59, p. 104-110, avr. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.031.
- [115] A. K. K. Lau, E. Salleh, C. H. Lim, et M. Y. Sulaiman, « Potential of shading devices and glazing configurations on cooling energy savings for high-rise office buildings in hot-humid climates: The case of Malaysia », *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, n° 2, p. 387-399, déc. 2016, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2016.04.004.
- [116] IEA, « World Energy Outlook 2019 – Analysis and key findings », IEA, 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (consulté le oct. 29, 2020).
- [117] J. Robins, « Case study: Feasibility analysis of renewable energy supply systems in a small grid connected resort », 2009.
- [118] J. Yang, H. Fu, et M. Qin, « Evaluation of Different Thermal Models in EnergyPlus for Calculating Moisture Effects on Building Energy Consumption in Different Climate Conditions », *Procedia Engineering*, vol. 121, p. 1635-1641, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.194.
- [119] U.S. Department of Energy, « EnergyPlus Engineering Reference ». 2016.
- [120] C. Giaconia et A. Orioli, « On the reliability of ASHRAE conduction transfer function coefficients of walls », *Applied Thermal Engineering*, p. 27, 2000.
- [121] E. R. G. Eckert, « Radiative transfer, H. C. Hottel and A. F. Sarofim, McGraw-Hill Book Company, New York, 1967. 52 pages », *AIChE Journal*, vol. 15, n° 5, p. 794-796, 1969, doi: 10.1002/aic.690150504.
- [122] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, et J. L. M. Hensen, « Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty », *Applied Thermal Engineering*, vol. 56, n° 1-2, p. 134-151, juill. 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003.
- [123] G. N. Walton, « Thermal Analysis Research Program Reference Manual », *National Bureau of Standards, March*, 1983.
- [124] R. Perez, R. Stewart, R. Seals, et T. Guertin, « The development and verification of the Perez diffuse radiation model », SAND88-7030, 7024029, ON: DE89002469, oct. 1988. doi: 10.2172/7024029.
- [125] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, et D. Menicucci, « A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces », *Solar Energy*, vol. 39, n° 3, p. 221-231, 1987, doi: 10.1016/S0038-092X(87)80031-2.
- [126] ASHRAE, *2001 ASHRAE handbook: fundamentals*. Atlanta, GA.: ASHRAE, 2001.
- [127] M. ABOUBACAR ABDOULAYE, « Analyse de faisabilité technico-économique d'une installation de climatisation par puits canadien », Mémoire de master, 2iE - Institut International d'ingénierie de l'eau et de l'environnement -, Burkina Faso, 2020.
- [128] American Society of Heating, *ASHRAE Handbook -- Fundamentals*. 2009.
- [129] E. Mazria, *The passive solar energy book*. Emmaus, Pa, 1979.
- [130] O. J. Ojo et A. F. Lawal, « Assessment of thermal performance of residential buildings in Ibadan Land, Nigeria », août 01, 2011. .
- [131] F. A. YAO, « Exploration du potentiel hygroscopique des briques de terre comprimée (BTC) pour l'amélioration du confort thermique de l'habitat en climat chaud », Mémoire de master, 2iE - Institut International d'ingénierie de l'eau et de l'environnement -, Burkina Faso, 2019.
- [132] M. Kabore, « Assessment on Passive Cooling Techniques to Improve Steel Roof Thermal Performance in Hot Tropical Climate », *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 3, n° 6, p. 287, 2014, doi: 10.11648/j.ijepe.20140306.12.
- [133] E. Stéphan, R. Cantin, A. Caucheteux, S. Tasca-Guernouti, et P. Michel, « Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old

- limestone buildings », *Building and Environment*, vol. 80, p. 241-248, oct. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.05.035.
- [134] P. M. Touré, « L'écoconstruction dans le contexte du climat tropical: de l'échelle du matériau à l'échelle du bâtiment », PhD Thesis, 2018.
- [135] S. Kachkouch, « Évaluation expérimentale et par simulation des performances thermiques de techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments en climat chaud », phdthesis, Université de La Rochelle ; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc), 2018.
- [136] L. Chahwane, *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments*. 2011.
- [137] ANSI/ASHRAE Standard 55, « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy », p. 44, 2010.
- [138] N. M. Mateus, A. Pinto, et G. C. da Graça, « Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell », *Energy and Buildings*, vol. 75, p. 511-522, juin 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.043.
- [139] P. M. Toure, Y. Dieye, P. M. Gueye, V. Sambou, S. Bodian, et S. Tiguampo, « Experimental determination of time lag and decrement factor », *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, p. e00298, déc. 2019, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00298.
- [140] A. Moschella, A. Gagliano, A. L. Faro, A. Mondello, A. Salemi, et G. Sanfilippo, « A Methodology for an Integrated Approach for Seismic and Energy Refurbishment of Historic Buildings in Mediterranean Area », 2018, doi: 10.3390/su10072448.
- [141] H. Asan, « Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor », *Energy and Buildings*, vol. 28, n° 3, p. 299-305, nov. 1998, doi: 10.1016/S0378-7788(98)00030-9.
- [142] S. A. Al-Sanea et M. F. Zedan, « Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass », *Applied Energy*, vol. 88, n° 9, p. 3113-3124, sept. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.02.036.
- [143] D. E. M. Bond, W. W. Clark, et M. Kimber, « Configuring wall layers for improved insulation performance », *Applied Energy*, vol. 112, p. 235-245, déc. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.06.024.
- [144] M. Ozel, « Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness », *Energy and Buildings*, vol. 72, p. 288-295, avr. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.015.



# Annexes

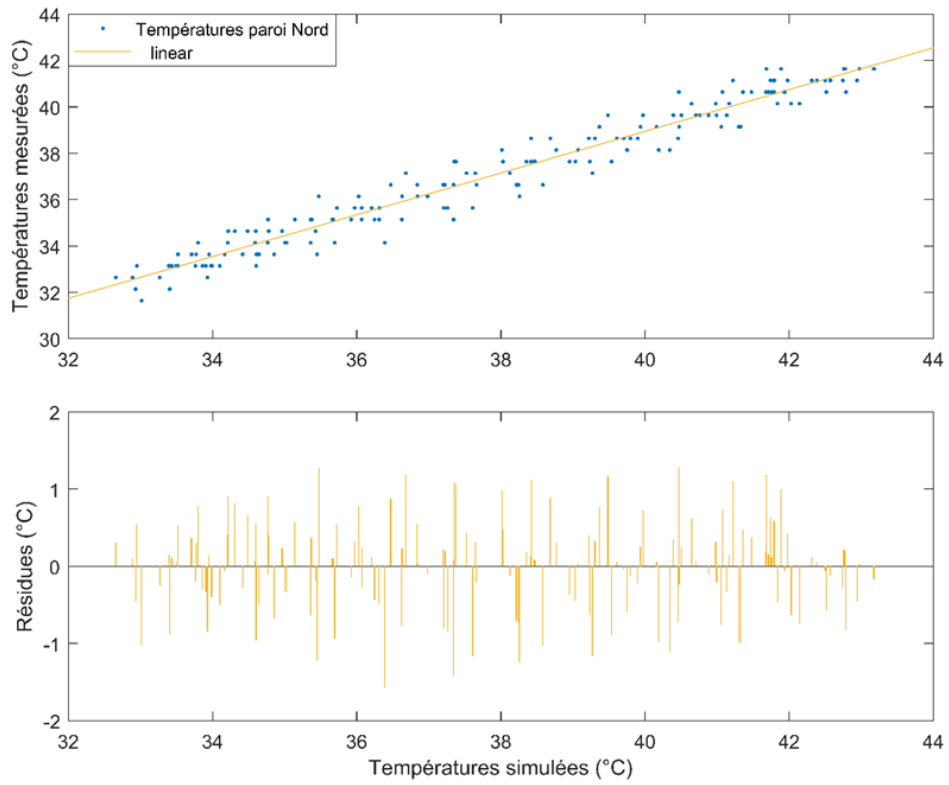


Figure A : Corrélation entre températures internes simulée et mesurée de la paroi Nord

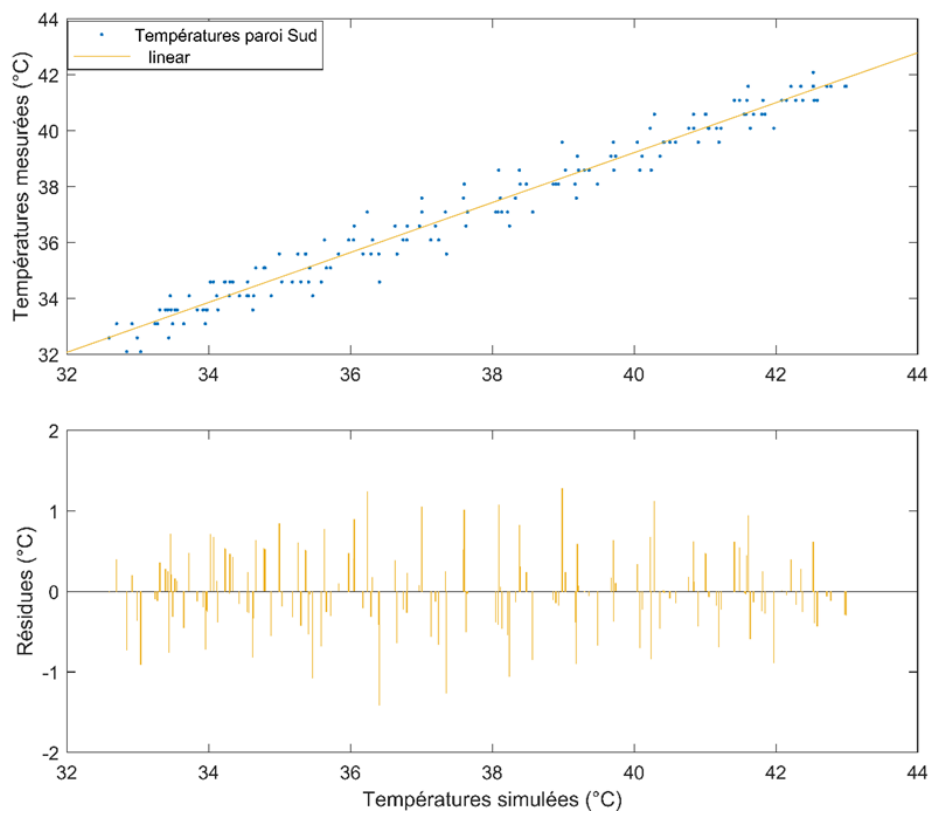


Figure B : Corrélation entre températures internes simulée et mesurée de la paroi Sud

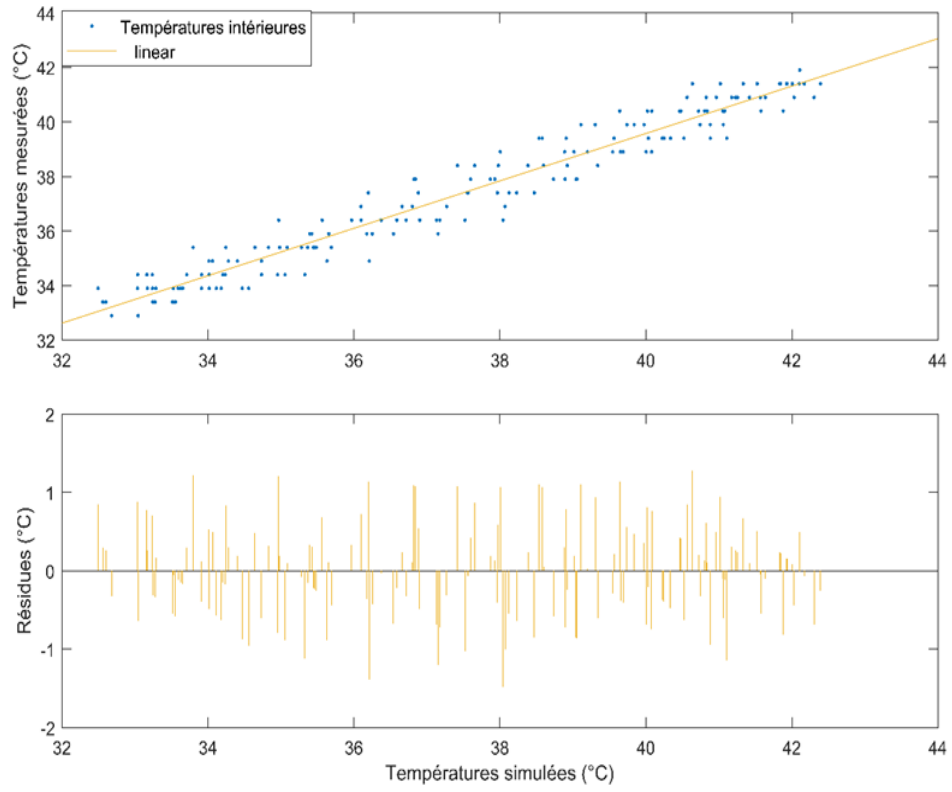


Figure C : Corrélation entre températures internes simulée et mesurée de la zone du bâtiment