



**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE  
COMPRIMEE**

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

SPECIALITE : **ROUTES ET OUVRAGES D'ART**

-----  
Présenté et soutenu publiquement le [29/09/2020] par

**Foundjangan Doma SORO**

**(20160136)**

**Directeur de mémoire :** M. Adamah MESSAN, Maitre de conférence CAMES

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

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

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr Décroly DJOUBISSIE

Membres et correcteurs : Dr. Philbert NSHIMIYIMANA  
M. Ousmane ZOUNGRANA

**Promotion [2020/2021]**

## DEDICACE

---

**J**e dédie cet humble travail avec grand amour, sincérité et fierté :

À DIEU, le Tout-Puissant, mon Créateur.

À la mémoire de mes grands-parents

À mon père, en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour tous les soutiens et les sacrifices dont il a fait preuve à mon égard.

À ma mère, ma raison d'être, ma raison de vivre, la lanterne qui éclaire mon chemin et m'illumine de douceur et d'amour.

À mon frère et mes sœurs, en témoignage de la fraternité.

À mes amis, et à tous mes proches.

## CITATION

---

*« Dans la recherche de la Sagesse, la première étape est le silence, la deuxième l'écoute, la troisième la mémoire, la quatrième la pratique, la cinquième l'enseignement »*

**Solomon GABRIOL (1021-1058)**

## REMERCIEMENT

---

Nous voulons exprimer par ces quelques lignes de remerciement notre gratitude envers tous ceux en qui par leur présence, leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils, nous avons eu courage d'accomplir ce stage de fin d'étude.

Nous commençons par remercier DIEU le Tout-Puissant qui nous a octroyé le souffle de vie jusqu'à ce jour et nous a facilité ce stage.

Nous tenons à remercier le personnel administratif de l'Institut Internationale d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Plus particulièrement au :

- ☛ **Professeur Mady Koanda**, le Directeur Générale de 2iE
- ☛ **Docteur ABDOU LAWANE G.** le chef de département Génie Civil et Hydraulique

Nous remercions **M. Adamah MESSAN**, Maitre de conférence CAMES, pour le temps qu'il a bien voulu nous consacrer. Malgré un emploi du temps très chargé, il a toujours été présent pour nous apporter les éclaircissements dont on avait besoin. Et aussi d'être toujours là pour nous écouter et nous guider à retrouver le chemin par sa sagesse.

Nous réservons des remerciements particuliers à **M. Césaire HEMA**, Assistant d'enseignement et de recherche et doctorant 2iE/UCLouvain, qui nous a fait l'honneur de nous guider durant ce stage. Il a toujours été présent afin d'apporter des réponses à toutes nos nombreuses questions tant opérationnelles, que d'ordre plus général. Nous le remercions profondément pour son encouragement continu et ces précieux conseils.

Nous remercions également tout le personnel du Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) pour leur soutien moral et leur preuve de compréhension.

Nous ne pouvons achever ce mémoire sans exprimer notre gratitude à tous les professeurs des différents départements, pour leur dévouement et leur assistance tout au long de notre formation.

## **RESUME**

---

L'approche bioclimatique des habitats en zone chaude et sèche préconise des parois à forte inertie thermique et une ventilation adaptée pour amélioration du climat intérieur. Cependant, plusieurs études menées ont mis en exergue l'intérêt de l'ajout d'une résistance thermique à la couche à forte inertie en BTC stabilisée. La présente étude porte sur l'évaluation du confort thermique d'une maison prototype (Bâtiment pilote) construit en BTC auquel a été associé un isolant thermique la « laine de verre ».

L'accent a été mis sur la position relative de la couche isolante dans le but d'offrir le meilleur confort intérieur. Pour ce faire, trois configurations ont été implémentées : à savoir (i) une paroi monocouche en BTC, puis une paroi à double couche : (ii) la couche en BTC à l'extérieure et la couche isolante à l'intérieure et (iii) la configuration inverse où la couche en BTC à l'intérieur et la couche isolante à l'extérieure. De plus trois (03) modes de ventilation ont également été étudiés : la ventilation nocturne, la ventilation continue et aucune ventilation autrement dit, le bâtiment est resté fermé.

Des capteurs de températures placés à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment expérimental ainsi qu'une station météorologique ont permis l'acquisition des données. Les résultats montrent que l'isolation extérieure est la configuration la plus performante dans l'atteinte du confort contrairement à l'isolation intérieure. Quant aux stratégies de ventilation passive, la ventilation du local fermé est celle qui a présenté une réduction considérablement l'amplitude thermique intérieure.

### **Mots Clés :**

---

**1 - Brique de Terre Comprimée**

**2 - Confort thermique**

**3 - Isolant thermique**

**4 - Parois multicouche**

**5 – Performance thermique**

## **ABSTRACT**

---

The bioclimatic approach of the design of habitats in hot and dry climate recommends walls with high thermal inertia and appropriate ventilation to improve the indoor climate. However, several studies carried out have highlighted the value of adding thermal resistance to the high inertia layer in BTC. The present study focuses on the evaluation of the thermal comfort of a prototype house built in BTC to which a thermal insulation has been associated.

Emphasis was placed on the relative position of the wall layer that offers the best interior comfort. For this purpose, three configurations have been implemented: (i) a single-layer BTC wall, and a double-layer wall: (ii) the BTC layer on the outside and the insulating layer on the inside, and (iii) the reverse configuration where the BTC layer was on the inside and the insulating layer on the outside. In addition, three ventilation modes were also studied: night ventilation, continuous ventilation and no ventilation, in other words, the building remained closed

Indoor and outdoor temperature sensors as well as a weather station were used to acquire the necessary data. The results show that external insulation is the most efficient configuration for achieving comfort, unlike internal insulation. As for passive ventilation strategies, the ventilation of the closed room is the one that presented the greatest reduction interior amplitude.

### **Keywords:**

---

- 1 - Compressed Earth Block**
- 2 – Multilayer walls**
- 3 - Thermal comfort**
- 4 - Thermal performance**
- 5 – Multilayer walls**

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

---

<i>NOTATION</i>	<i>SIGNIFICATION</i>
2IE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
ADEREE	Agence nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BTC	Brique de Terre Comprimée
CAMES	Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement supérieur
E	Est
EIER	École d'Ingénieurs de l'Équipement Rural
EOTA	European Organization for Technical Approvals
LEMHaD	Laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable
N	Nord
O	Ouest
PMV	Vote Moyen Prévisible
PPD	Pourcentage Prévu des insatisfaits
S	Sud
WUFI	Wärme und Feuchte instationär

## SOMMAIRE

---

DEDICACE -----	i
CITATION -----	ii
REMERCIEMENT -----	iii
RESUME -----	iv
ABSTRACT-----	v
LISTE DES ABREVIATIONS -----	vi
SOMMAIRE -----	1
LISTE DES TALEAUX-----	4
LISTE DES FIGURES -----	5
INTRODUCTION GENERALE-----	7
CHAPITRE 1 : LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION EN TERRE : ETAT D'ART ----	9
I.    LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRE-----	11
1.    L'adobe-----	11
2.    Le pisé-----	12
3.    Le torchis -----	13
4.    La bauge -----	13
5.    La Brique de Terre Comprimées (BTC)-----	15
II.   AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CONSTRUCTIONS EN TERRE-----	17
1.    Les avantages-----	17
2.    Inconvénients-----	18
III.  ANALYSE DE LA TRANSITION DES MODES DE CONSTRUCTION EN AFRIQUE -----	19
CONCLUSION PARTIELLE-----	21

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

CHAPITRE 2 : LES APPROCHES DU CONFORT THERMIQUE-----	22
I.  LE CONFORT THERMIQUE -----	23
1.  Définition -----	23
2.  Caractérisation du confort thermique dans un bâtiment-----	24
3.  Les standards et normes : le confort analytique -----	25
4.  Les standards et normes : le confort adaptatif -----	26
5.  Les diagrammes bioclimatiques -----	27
a.  Le diagramme d'Olgay ; -----	28
b.  Le diagramme de Givoni -----	28
6.  Enjeux du confort thermique dans les bâtiments en climat chaud-----	29
7.  Les Modes de refroidissement passif des habitats dans le climat soudano-sahélien 30	
II.  LES METHODES D'ISOLATION THERMIQUE D'UN BATIMENT -----	31
1.  Définition d'un isolant thermique dans le bâtiment -----	32
2.  Le principe d'isolation des bâtiments-----	33
3.  Les types d'isolant thermique-----	35
a.  Les isolants naturels -----	36
b.  Les isolants minéraux -----	36
c.  Les isolants synthétiques-----	37
III.  LES ECO-MATERIAUX : BTCs-----	38
1.  La stabilisation mécanique -----	39
2.  La stabilisation chimique -----	39
3.  La stabilisation physique -----	40
4.  Les stabilisants -----	40
CONCLUSION PARTIELLE-----	42
CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE -----	43
I.  METHODOLOGIE EXPERIMENTALE -----	44
1.  Le bâtiment expérimental-----	44
2.  Configuration des murs -----	45
3.  Le programme de ventilation naturelle -----	47

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

II.	LES PARAMETRES THERMIQUES MESURES -----	49
1.	Les radiations globales -----	49
2.	La température extérieure et intérieure du bâtiment -----	49
III.	CRITERE D'EVALUATION DU CONFORT DANS L'ENCEINTE DU BATIMENT 51	
1.	La recherche de jour similaire -----	51
2.	Les paramètres d'évaluation -----	52
IV.	LES RESULTATS -----	53
1.	La recherche de jour similaire -----	53
2.	L'impact de la configuration des murs sur le climat intérieur-----	54
3.	Impact du mode de ventilation sur le climat intérieur-----	55
V.	DISCUSSIONS-----	56
1.	Impact de la configuration des murs sur la température intérieure -----	56
2.	Stratégie de ventilation des configurations BTC, BTCin et BTCout-----	57
	CONCLUSION GENERALE -----	59
	REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE-----	61
	ANNEXES -----	65
	ANNEXE 1 : Vérification de l'impact de la sensibilité de 0.5°C pour température et de 50 W/m2 pour la radiation -----	65
	ANNEXE 2 : LA FICHE TECHNIQUE DES THERMO-PUCES -----	71

## **LISTE DES TALEAUX**

---

Tableau 1: Avantages et Inconvénients des méthodes d'isolation (a) extérieure et (b) intérieure-----	33
Tableau 2: Résumé des propriétés thermiques des différents constituants du bâtiment expérimental ----	45
Tableau 3: Caractéristiques de la laine de verre utilisée-----	45
Tableau 4 : illustration du système constitutif des parois du bâtiment : (a) sans isolation, (b) isolation intérieure et (c) l'isolation extérieure-----	46
Tableau 5: Récapitulatif des périodes de ventilation du bâtiment expérimental-----	48
Tableau 6: Récapitulatif des paramètres thermiques mesurés -----	51
Tableau 7: récapitulatif des jours similaires -----	53
Tableau 8: stratégie de répartition des radiations thermiques-----	65
Tableau 9: Résultats des températures intérieures après simulation par wufi plus -----	69
Tableau 10: sensibilité de la température intérieure obtenues -----	70

## **LISTE DES FIGURES**

---

Figure 1: La roue des techniques de construction en terre -----	10
Figure 2: La fabrication des briques adobe-----	11
Figure 3: illustration de la technique du Pise mettant en évidence en (a) le mélange de la terre de la paille en train d'être compacté dans un coffrage en bois et en (b) une maison construite en pise -----	12
Figure 4: illustration de la façade d'un bâtiment construit en torchis -----	13
Figure 5: illustration d'une construction en bauche -----	14
Figure 6: une construction à base de BTC-----	15
Figure 7: Le diagramme de la plasticité -----	16
Figure 8: Le diagramme de texture -----	16
Figure 9: illustration des mutations dans le secteur du bâtiment: en (a) et (c) les bâtiments traditionnels en matériaux locaux et en (b) et (d) les bâtiments en matériaux modernes importés-----	20
Figure 10: Interaction thermique entre le corps humain et son environnement-----	25
Figure 11: Le diagramme bioclimatique OLGAY -----	28
Figure 12: Le Diagramme de GIVONI -----	29
Figure 13: Classification des méthodes de refroidissement passif dans des bâtiments économes en énergie -----	31
Figure 14 : Répartition des déperditions thermiques dans un habitation sans isolant thermique : ADEME -----	34
Figure 15: La conductivité thermique maximale et minimale des isolants fournies par les spécification techniques de l'EOTA -----	35
Figure 16: illustration d'une isolation naturelle : en (a) un chanvre et en (b) des fibres de cellulose -----	36
Figure 17: illustration d'une isolation minérale : en (a) une laine de verre et en (b) une verre cellulaire--	37
Figure 18: illustration d'une isolant synthétique : en (a) un polystyrène expansé et en (b) une mousse phénolique -----	38
Figure 19: illustration du bâtiment expérimental: (a) la vue en plan et (b) un aperçu photographique ----	44

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

Figure 20: Mise en évidence des horaires [ 22h-5h] de la ventilation nocturne -----	48
Figure 21: La station météorologique Vaisala AWS310-----	49
Figure 22 : Caractéristiques des thermo puces utilisées-----	50
Figure 23: illustration des critères d'évaluation des jours similaires: (a) amplitudes thermique < 0.5°C; (b) amplitudes de radiation thermique<50W/m <sup>2</sup> ; (c) le pic horaire-----	54
Figure 24:Illustration de l'impact du système de paroi sur le micro-climat interieur: (a) des amplitudes thermiques dans enceinte du bâtiment et (b) des facteurs d'amortissement observé dans les configurations BTC, BTCin et BTCout -----	55
Figure 25: Impact des modes de ventilation sur le climat intérieur des configurations BTC, BTCin et BTCout : (a) l'amplitude thermique extérieure, (b) l'amplitude thermique intérieure-----	56
Figure 26: L'efficacité de la configuration des parois des murs selon le mode de ventilation adoptée----	58
Figure 27:évolution de la température intérieure après simulation -----	67
Figure 28: Analyse de la sensibilité des températures intérieures sans répartition et celle avec répartition de 0,5°C et de 50w/m <sup>2</sup> -----	68

## INTRODUCTION GENERALE

---

**J**usqu'à une certaine époque, les matériaux utilisés pour les constructions étaient directement extraits de la terre (la bauge, l'adobe, le pise,). L'industrialisation entamée depuis le XVIIIe siècle, a donné naissance à de nouveaux matériaux plus performant dont la mise en œuvre est relativement aisée comparativement à l'architecture traditionnelle. Cela a permis la naissance d'une architecture contemporaine et démonstrative où l'esthétique est privilégiée. Cependant, pour certains auteurs cette nouvelle architecture ne s'intègre pas à l'environnement, autrement dit elle constitue une aberration (Coach, 1998). En effet, la consommation énergétique pour le maintien des conditions de confort dans les bâtiments en Afrique représente en moyenne 56% de la production d'énergie électrique nationale (Kitio, 2015) car ces matériaux et standard ne sont pas toujours adaptés au contexte climatique dans lequel ils sont implémentés et engendrent des conséquences pour le moins négatif (Abdesselam, 1999).

Par ailleurs, l'approche bioclimatique qui permet de définir des stratégies passives afin d'améliorer le climat intérieur des bâtiments, est à même de réduire, voire supprimer le recours à l'énergie fossile pour l'amélioration du confort. Cela est d'autant plus vrai pour les pays situés en climat chaud tel que le Burkina Faso où la disponibilité énergétique fait défaut et où l'atteinte du confort à l'intérieur des habitats est loin d'être évident au vu des conditions climatiques et des matériaux utilisés (U.Wyss, 2005) Recourir aux matériaux locaux, plus particulièrement à la terre, s'avère une alternative envisageable au vu de son regain d'intérêt. En effet, plusieurs études menées par des chercheurs tels que Hema et al (2020) Hamid et al (1998), Pittet et al (2009), Bekkouch et al (2009) ont démontré que la terre est un matériau qui répond aux exigences de la protection de l'environnement et contribue à un gain énergétique appréciable pour assurer le confort thermique dans l'habitat à moindre coût. De là, il en ressort que la composition des murs créant l'enveloppe de nos habitats joue un rôle de filtre thermique d'une part, et d'autre part reste un élément déterminant dans la création du microclimat à l'intérieur du bâtiment. On peut alors se poser la question de savoir si :

***La conception des murs dans les bâtiments à ventilation naturelle construits en brique de terre comprimée participerait-elle à la minimisation de l'inconfort thermique en climat tropical sec ?***

Afin de répondre à la problématique posée, nous avons menées des travaux de recherche au sein du Laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable de l'institut 2iE (LEHMaD-2iE) dont l'un des axes consiste en la valorisation des éco-matériaux en climat soudano-sahélien.

L'objectif de ce travail de recherche est de minimiser l'inconfort thermique dans un habitat ventilé naturellement par l'utilisation d'un système de parois multicouches (BTC+laine de verre). Spécifiquement, Il s'agira de faire (i) un état de l'art des constructions en terre, (ii) définir les scenarios d'utilisation du bâtiment reflétant l'utilisation de l'habitat local, et enfin (iii) recueillir et traiter les données de mesures du bâtiment pilote.

Pour atteindre notre objectif, nous avons mis en œuvre une démarche méthodologique adaptée. Ainsi ce travail se compose en trois (03) chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la revue bibliographique des constructions en terre. Il présentera de façon succincte les différentes techniques de construction à base de la terre. Dans le second chapitre, nous analysons les connaissances existantes en matière de confort thermique. Ceci nous conduit à effectuer un état de l'art qui permet de présenter les variables et leurs interactions dans les différentes approches actuelles du confort thermique. Cette analyse permettra la mise en œuvre des phases suivantes du travail de recherche. Le troisième chapitre est consacré à l'exploration du confort adaptatif à travers une étude expérimentale in situ qui nous conduit sur le bâtiment pilote au sein de l'Institut 2iE. Nous présenterons dans ce chapitre, la méthodologie ainsi que les outils utilisés dans cette étude expérimentale. Les données collectées à l'issue de cette expérimentation seront traitée et analysés sous la base d'hypothèse simplificatrice afin de répondre à notre problématique.

## **CHAPITRE 1 : LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION EN TERRE : ETAT D'ART**

---

<b>CHAPITRE 1 : LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION EN TERRE : ETAT D'ART</b>	<b>9</b>
<b>I. LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRE</b>	<b>11</b>
1. L'adobe	11
2. Le pisé	12
3. Le torchis	13
4. La bauge	13
5. La Brique de Terre Comprimées (BTC)	15
<b>II. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CONSTRUCTIONS EN TERRE</b>	<b>17</b>
1. Les avantages	17
2. Inconvénients	18
<b>III. ANALYSE DE LA TRANSITION DES MODES DE CONSTRUCTION EN AFRIQUE</b>	<b>19</b>
<b>CONCLUSION PARTIELLE</b>	<b>21</b>

# CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC : MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

La « terre » utilisée en construction est en réalité un mélange variable d'argile, de limon, de sable et parfois même de gravier qui se distinguent entre eux par la taille de leur grain (granulométrie). En maintes contrées dont les paysages familiers en sont très souvent richement marqués, l'architecture de terre est véritablement un témoignage vivant de l'histoire et de la culture des peuples. De la tradition de construire en terre, on dénombre de nombreux modes de construction avec une infinité de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. Celles-ci se résument principalement en 12 grandes techniques, comme illustré à la *Figure 1*.

Nous verrons dans ce chapitre les cinq (05) techniques de construction les plus répandues : il s'agit entre autre du pise, de l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimées.

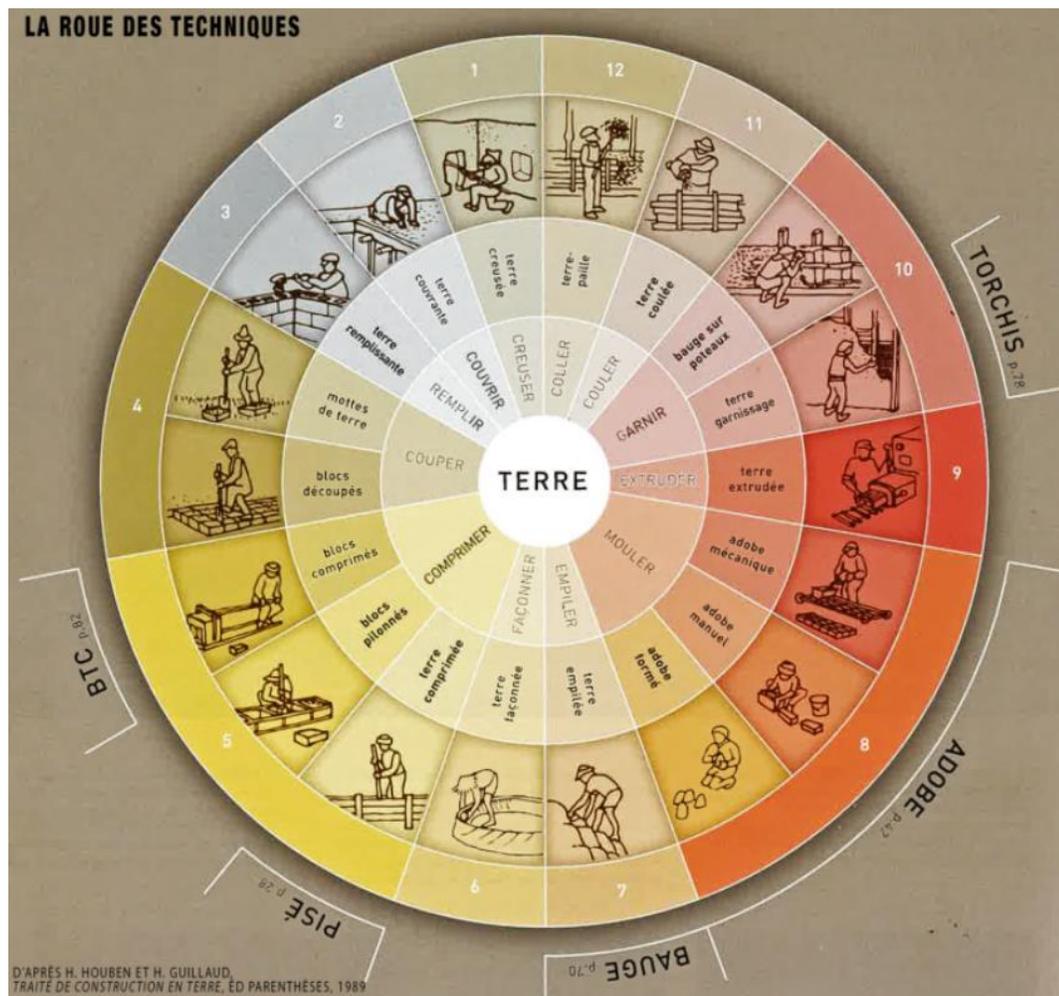


Figure 1: La roue des techniques de construction en terre (Guillaud, et al., 2006)

## I. LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRE

---

### 1. L'adobe

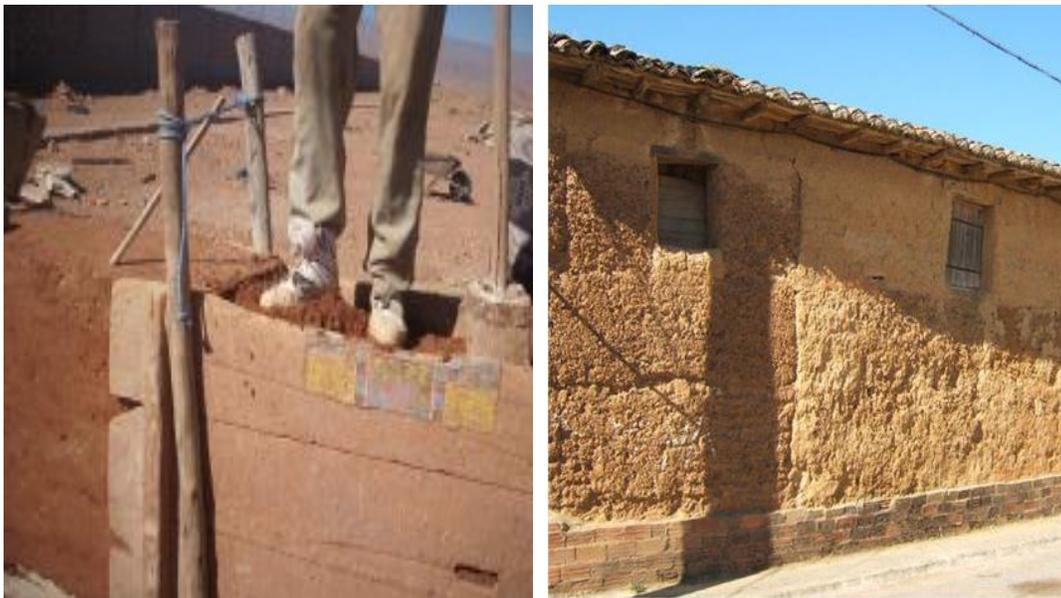
La brique de terre crue séchée au soleil est plus communément connue sous le nom d'adobe. Comme illustré à la Figure 2. Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre malléable souvent ajoutée à de la paille afin d'éviter la fissuration. A l'origine, ces briques étaient formées à la main. Plus tard (et encore aujourd'hui), elles seront fabriquées manuellement à l'aide de moules à formes prismatique variées en bois ou en métal. Pour élever les murs, on superpose les briques d'adobe. Les briques sont jointées grâce à un mélange sable - argile ou sable-chaux. La terre utilisée ne doit être ni trop argileuse afin d'éviter les fissures, ni trop sableuse afin de garantir sa cohésion. En grande quantité, ce mélange permettent également d'augmenter la capacité d'isolation des briques (Guillaud, et al., 2006)



Figure 2: La fabrication des briques adobe : Cameroun

## 2. Le pisé

La construction en pisé constitue une méthode très ancienne qui a été transmise de génération en génération. Son étalement sur plusieurs siècles a permis d'acquérir une compétence et une finesse incontestable dans le domaine de construction. Comme illustré à la Figure 3 .a, on le met en œuvre dans des coffrages appelés banches. La terre est idéalement graveleuse et argileuse, mais on trouve souvent des constructions en pisé réalisées avec des terres fines. La terre est comprimée en masse avec un pilon dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée. Traditionnellement, ces outils sont en bois (Guillaud, et al., 2006). La première couche repose sur un soubassement généralement en pierres, galets ou béton d'une hauteur allant de 50 cm à environ 2 m. Ce soubassement a pour rôle de protéger le matériau des projections d'eau, des remontées capillaires, ainsi que des animaux (Champire, 2018)



(a)

(b)

Figure 3: illustration de la technique du Pisé mettant en évidence en (a) le mélange de la terre de la paille en train d'être compacté dans un coffrage en bois et en (b) une maison construite en pisé (Sébastien Moriset et arnaud Misse)

### 3. Le torchis

Les éléments de base de la construction en torchis sont de la terre argileuse à laquelle on ajoute de la paille ou tout autre débris végétal. Le mélange peut se faire aux pieds ou dans un malaxeur prévu à cet effet. Contrairement aux constructions en pisé, le torchis a besoin d'une structure (sur une ossature en bois) pour supporter la toiture comme illustré à la *Figure 4* (Dewulf, 2015).



Figure 4: illustration de la façade d'une grange picarde à Catheux

### 4. La bauge

C'est une technique qui permet de modeler des formes directement sans l'aide de moulage ou de coffrage, en utilisant la plasticité des terres humides. La terre ne sert pas à remplir une armature comme le torchis, mais on la façonne directement comme une poterie. La qualité plastique du matériau est donc le facteur essentiel de la mise en œuvre. Il s'agit de trouver l'état de consistance intermédiaire entre une terre trop sèche et impossible à façonner et une boue trop humide,

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

manquant de cohésion (Guillaud, et al., 2006). . La terre est généralement extraite sur le lieu de la construction (d'où les nombreuses mares autour des maisons en bauge) sous la couche de terre végétale. Cette terre doit être moyennement argileuse : suffisamment pour qu'elle possède une bonne cohésion, mais pas trop pour qu'elle ne fissure pas. Ensuite, elle est piétinée par les hommes ou des animaux afin d'y incorporer les végétaux (paille, bruyère, ajonc, fougère, etc.) ou des poils ou crins animaux. Une fois ce mélange réalisé, ces couches sont tassées au fur et à mesure à coup de trique, une sorte de manche en bois. Elles dépassent largement de la largeur finie du mur. On réalise ainsi une levée d'environ 60 cm de hauteur. On laisse ensuite deux semaines s'écouler afin que la levée se tasse. A l'aide d'un outil tranchant, on rectifie ensuite le mur en se tenant debout sur le haut de la levée et en tranchant l'excédent de terre. Les encadrements de fenêtres et les poutres sont placés au fur et à mesure de la construction. La *Figure 5* illustre bien le rendu d'une construction en bauge.



Figure 5: illustration d'une construction en bauge

## 5. La Brique de Terre Comprimées (BTC)

La brique de terre comprimée est dérivée de l'adobe. Elle se fabrique à partir d'argile ou de la latérite tamisée, et comprimée. Une fois démoulée elle est mise à sécher naturellement, à l'abri du soleil. Après broyage et passage au tamis, l'argile ou la latérite est additionnée soit à de la chaux, soit à du ciment, soit à des fibres végétales (...) afin de modifier certaines caractéristiques physiques des blocs. Cela permet d'augmenter leur masse volumique, renforcer leur stabilité mécanique, leur résistance, leur capacité d'accumuler la chaleur, etc. L'illustration d'une construction en BTC est ainsi présentée à la Figure 6. Les dimensions des BTC varient en fonction des moules utilisés et des caractéristiques recherchées.



Figure 6: une construction à base de BTC

Pour la bonne qualité des BTC, il convient de choisir une terre répondant à certaines normes définies (Houben, et al., 2014). En effet, la norme ARS-680<sup>1</sup>, définit la plasticité et la texture de la terre à utiliser. Il s'agira de celle inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité défini à la

---

<sup>1</sup> Blocs de Terre Comprimée : Code et bonne pratique pour la production de bloc de terre comprimée

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIEMEE

---

---

Figure 7 et celle ayant une texture s'inscrivant dans la bande mis en évidence à la Figure 8.

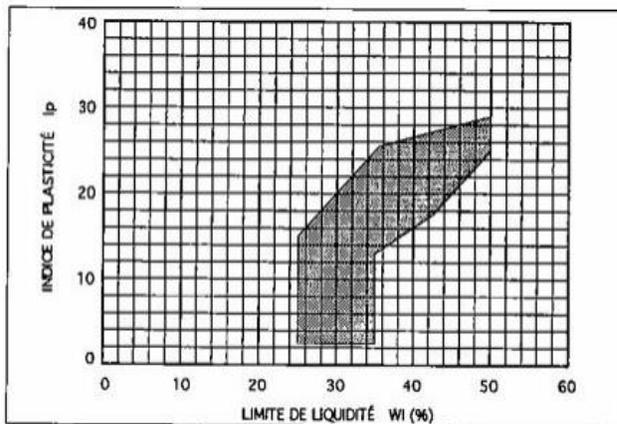


Figure 7: Le diagramme de la plasticité (Guillaud, et al., 2006)

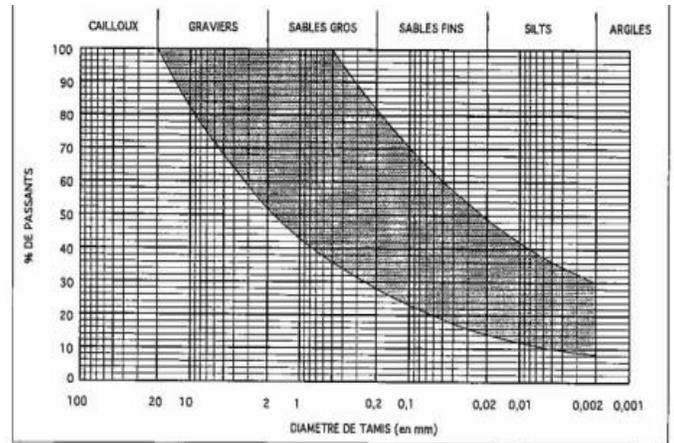


Figure 8: Le diagramme de texture (Guillaud, et al., 2006)

En plus de la bonne sélection des latérites utilisées dans la fabrication des BTC, il convient de recourir à la stabilisation de la terre en vue de l'amélioration des caractéristiques mécaniques des BTC.

Cette stabilisation s'effectue au moyen de liants hydrauliques (chaux éteinte, ciment Portland,...) à plusieurs pourcentages (5%, 10%, 20%, ...) en fonction des caractéristiques mécaniques et thermiques recherchées. Une stabilisation optimale au ciment ou à la chaux nécessite des dosages massiques allant de 6% à 12% ou de 4% à 12% respectivement (Guillaud, et al., 2006).

## II. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CONSTRUCTIONS EN TERRE

---

### 1. Les avantages

La terre crue offre de nombreux avantages face aux matériaux de construction qui prédominent actuellement. Nous énumérerons ci-dessous<sup>2</sup> les plus notables (Paulus, 2014-2015) :

- **Une Forte inertie thermique** : l'intérieur d'une maison construite avec ce matériau requerra une utilisation moins importante des systèmes de climatisation, qu'un logement conventionnel édifié avec des matériaux industriels.
- **Bon isolant phonique** : les logements construits en terre crue sont beaucoup plus isolés des bruits extérieurs, donc plus silencieux que ceux construits avec du matériel industriel.
- **Économie d'énergie en climatisation** : les murs construits en terre constituent des isolants thermiques excellents qui permettent de réduire ou même parfois d'éviter l'utilisation de climatisation, ce qui représentera une importante économie en énergie et en émission de CO<sub>2</sub>.
- **Faible impact environnemental** : la quantité d'énergie utilisée pour la construction des habitats en terre est très inférieure à celle qu'il faudrait employer pour fabriquer du matériel industriel.
- **Réintégration à la nature** : les constructions en terre étant constitués de matériaux locaux et naturellement présents dans l'environnement, peuvent être réintégrés entièrement à la nature à la fin de la vie utile de la construction.
- **Résistance au feu** : grâce à sa composition physique et chimique, la terre présente une grande stabilité et une grande résistance au feu, nettement supérieures à celle de l'acier ou de la brique industrielle.
- **Auto-construction** : dû au fait que le matériel se trouve de façon naturelle sur le terrain et que le processus de fabrication est simple et ne demande pas un équipement complexe,

---

<sup>2</sup> <http://yaamsolidarite.blogspot.com/p/construire-en-terre.html>

il peut être produit manuellement et de façon très simple. Cette facilité d'utilisation des instruments utilisés et d'élaboration des murs rend possible l'auto-construction.

## 2. Inconvénients

Les constructions en terre présentent cependant quelques inconvénients par rapport aux bétons de ciment. (Paulus, 2014-2015) :

- **Grande disparité** : En fonction de l'emplacement géographique, la composition de terre peut varier très fortement. ; cela nécessite une certaine connaissance du terrain.
- **La fabrication fragile sur quand la brique n'est pas stabilisée** : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite
- **Une main d'œuvre qualifiée et nombreuses** : La fabrication exige beaucoup de terre et de main d'œuvre spécialisée.

### III. ANALYSE DE LA TRANSITION DES MODES DE CONSTRUCTION EN AFRIQUE

---

Selon Kissanga, c'est au cours de la période du 19<sup>ème</sup> siècle, que les Africains se sont vu entrer en contact avec les styles et les matériaux de construction du monde occidental (Kisanga, 1990). Cet avis est partagé par Moriarty en 1979 où il affirme que l'impact des technologies de constructions importées a changé l'aspect des logements africains, ou du moins, les aspirations de logement, de deux façons d'une part dans le choix des matériaux de construction et, d'autre part, dans la forme et la structure de l'habitat (Moriarty, 1979).

Les blocs de béton, fabriqués à partir de sables alluvionnaires ou de latérite, ont été introduits pour leur résistance à l'eau d'une part. D'autre part, la durabilité de ces nouveaux matériaux donne au bâtiment une durée de vie élevée, et leurs résistances permettent de construire en plusieurs niveaux facilitant ainsi une meilleure gestion des espaces (Costa, 1989). Ces matériaux de construction comme le métal et le ciment ont un impact énergétique plus élevé. L'impact des technologies importées se manifeste aussi par l'évolution vers la conception rectiligne de logements. Le style, la morphologie et la disposition des maisons ont été impactés. Ajibola (1997) note que, les bâtiments modernes semblent être des répliques de bâtiments des pays européens dans la forme et la structure malgré des différences climatiques. La morphologie des logements a changé : par exemple, la cabane traditionnelle de forme hémisphérique a cédé la place à la construction rectiligne comme illustre à la Figure 9.

Il faut noter qu'en règle générale les technologies traditionnelles du bâtiment ont montré leurs insuffisances pour faire face à la croissance démographique, à l'urbanisation et aux mutations socioculturelles, d'où l'adoption de matériaux et des techniques importés (on human settlement, 1993). Cependant l'adaptation des constructions au contexte climatique dans les climats chauds est une nécessité si l'on veut améliorer les conditions de vie dans l'habitat et diminuer les risques qui pèsent sur l'état de santé et la productivité des occupants du fait de l'inconfort thermique dans les bâtiments. Cette adaptation passe par une meilleure connaissance des performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment et de ses composants.

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 9: illustration des mutations dans le secteur du bâtiment: en (a) et (c) les bâtiments traditionnels en matériaux locaux et en (b) et (d) les bâtiments en matériaux modernes importés (Madi, 2015)

---

## CONCLUSION PARTIELLE

---

Après l'état de l'art des constructions en terre, nous notons que la terre est un matériau peu coûteux, qui s'adapte parfaitement à l'environnement. Entre tradition et innovation, nous avons vu dans ce chapitre, une brève reconstitution de l'histoire des matériaux de construction en terre. Cela a été fait par la présentation des méthodes et techniques anciennement utilisées pour la réalisation des habitats à base de terre. Puis les nouvelles méthodes utilisées pour la construction de ces types habitat en terre en l'occurrence le BTC qui nous a amené à faire une analyse de la transition des modes de construction en Afrique. Aujourd'hui des fabricants, des entrepreneurs, des architectes et des chercheurs proposent de redonner à l'architecture en terre ses lettres de noblesse en adaptant les techniques traditionnelles aux exigences actuelles. C'est ainsi que dans le cadre de cette étude expérimentale, notre choix de matériaux s'est porté sur la BTC car (Hema, et al., 2020) ont affirmé que cette masse thermique réduit la température du climat intérieur contrairement aux autres matériaux dans un climat chaud et sec.

## **CHAPITRE 2 : LES APPROCHES DU CONFORT THERMIQUE**

---

CHAPITRE 2 : LES APPROCHES DU CONFORT THERMIQUE .....	22
I. LE CONFORT THERMIQUE .....	23
1. Définition .....	23
2. Caractérisation du confort thermique dans un bâtiment .....	24
3. Les standards et normes : le confort analytique.....	25
4. Les standards et normes : le confort adaptatif.....	26
5. Les diagrammes bioclimatiques.....	27
a. Le diagramme d'Olgay ; .....	28
b. Le diagramme de Givoni .....	28
6. Enjeux du confort thermique dans les bâtiments en climat chaud .....	29
7. Les Modes de refroidissement passif des habitats dans le climat soudano-sahélien .....	30
II. LES METHODES D'ISOLATION THERMIQUE D'UN BATIMENT .....	31
1. Définition d'un isolant thermique dans le bâtiment .....	32
2. Le principe d'isolation des bâtiments .....	33
3. Les types d'isolant thermique .....	35
a. Les isolants naturels .....	36
b. Les isolants minéraux .....	36
c. Les isolants synthétiques .....	37
III. LES ECO-MATERIAUX : BTCs.....	38
1. La stabilisation mécanique.....	39
2. La stabilisation chimique .....	39
3. La stabilisation physique.....	40
4. Les stabilisants .....	40

Ce deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art sur le confort thermique dans les bâtiments. Les besoins de l'être humain ainsi que les variables et leurs interactions dans les différentes approches actuelles du confort thermique seront explicités. Les différents mécanismes mis en jeu seront détaillés et précisés afin de cerner le rôle des différents paramètres et caractéristiques physiques, physiologiques et psychologiques dans la perception thermique de l'homme dans son environnement. Cette analyse permettra la mise en œuvre des phases suivantes du travail de recherché.

Selon Jean & Faurestier (1962), la notion de confort n'a pas attendu la tique, c'est à dire l'électronique, pour entrer dans une maison. Le confort de l'antiquité et du moyen âge était celui de l'espace. Le confort de l'ancien régime était celui de l'ornement, aujourd'hui le confort est celui de l'économie des corvées ménagères mais aussi son autonomie et la plénitude de son être. Il en ressort que les conditions de confort ne sont pas constantes dans le temps et dans l'espace. Bien au contraire, ces conditions varient socialement selon le niveau de vie et les classes géographiquement selon les régions et historiquement selon les périodes. Loin d'être une valeur immanente le confort est une construction culturelle qui s'élabore et se transforme selon les mythes et les valeurs dominantes de la culture dans laquelle il se déploie (Chabane Chaouche, et al., 2017).

Dans les lignes qui suivent, nous nous intéresserons la notion de confort thermique étroitement liée à la performance énergétique dans le bâtiment. Cependant, cette notion est difficile à appréhender étant donné son caractère subjectif.

## I. LE CONFORT THERMIQUE

---

### 1. Définition

Le confort thermique est une notion difficile à appréhender et à définir. On peut cependant répertorier des tentatives de définitions trouvées dans la littérature professionnelle et scientifique. C'est ce que reconnaissent de nombreux auteurs dont Desmon (2009). En effet selon Desmons, le confort est une notion subjective. Une ambiance donnée peut satisfaire un individu et pas un autre. Le confort dépend de nombreux facteurs en dehors de l'ambiance elle-même. Ces facteurs sont: la santé, l'âge, le vêtu, les habitudes, l'état psychologique du moment, etc. Il est donc presque utopique d'espérer satisfaire la totalité des individus se trouvant dans une même enceinte climatisée (Jean, 2009). C'est dans la même perspective, que Jannot et Djiako du département énergie de EIERS<sup>3</sup> définissent le confort thermique comme étant une notion complexe dépendant de nombreux paramètres. Il peut être défini de la façon suivante : un individu est en situation de confort thermique lorsqu'il ne ressent la sensation ni chaud ni de froid (Jannot, et al., 1993). Selon

---

<sup>3</sup> École d'Ingénieurs de l'Équipement Rural

Givoni, ce sont les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale (Givoni, 1992). Alain & André le définissent comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique (Alain, et al., 1996). Cette définition est intéressante car elle replace le concept du confort dans un cadre plus global qui est celui de l'échange énergétique entre le corps humain et son environnement. Certains auteurs dont le Prof. Franger, quant à eux préfèrent définir le confort thermique en mettant en évidence la notion de l'inconfort. Car pour eux il est plus facile de définir clairement une ambiance inconfortable pour un individu donné. En effet, l'idée directrice de la notion d'inconfort thermique est de considérer une situation où une proportion non négligeable d'une population représentative est clairement insatisfaite (en général  $\geq 10\%$ ). (Munaretto, 2014).

## **2. Caractérisation du confort thermique dans un bâtiment**

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. La définition du confort thermique est ainsi d'une grande importance pour le bâtiment afin de lui permettre d'atteindre ses objectifs de fonctionnalité tout en justifiant, à tort ou à raison, l'installation des équipements d'ambiance (chauffage, ventilation et climatisation).

Le confort d'un occupant est principalement régi par les transferts de chaleur mis en jeu entre le corps humain et son environnement. Le corps est une machine thermique qui régule en permanence la température corporelle aux alentours de 37 °C (ASHRAE, 2004). Pour le maintien de cette température, la surface épidermique échange avec son environnement par convection, conduction, rayonnement (Leduc, et al.). La Figure 10 résume l'interaction thermique entre le corps humain et son environnement. Par ailleurs, des aspects psychologiques et sociologiques rentrent en jeu dans le ressenti subjectif du confort thermique (KEN, 2003)

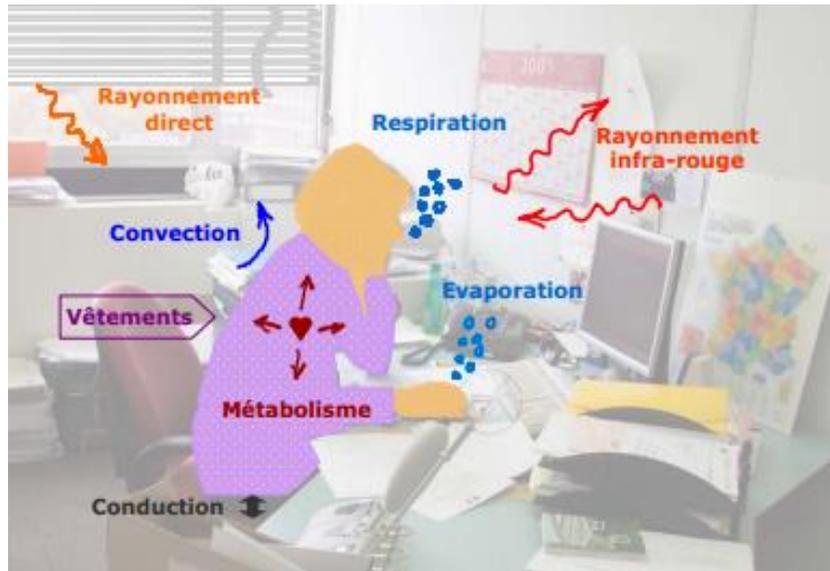


Figure 10: Interaction thermique entre le corps humain et son environnement (Moujalled, 2007)

Il est d'usage de différencier grossièrement deux principales écoles de pensée, quant aux modèles qui tentent de quantifier l'insatisfaction des occupants par rapport à une ambiance thermique intérieure donnée. Il s'agit de l'école dite « *statique* » et l'autre dite « *adaptative* ».

### 3. Les standards et normes : le confort analytique

L'approche analytique traite le confort thermique à travers le calcul du bilan thermique du corps humain. Les résultats de recherches publiés jusqu'à ce jour, notamment ceux de (Gagge, et al., 1967) aux États unis et de (Fanger, et al., 1985) au Danemark permettent d'opérer une sélection des principaux paramètres à prendre en compte. Les paramètres qui influencent le confort sont essentiellement la vitesse et l'hygrométrie de l'air, la température sèche et la température moyenne radiante. Le modèle statique le plus répandu est le modèle PMV<sup>4</sup>/PPD<sup>5</sup> de Fanger. Il s'appuie sur une large étude statistique (population de 1300 individus ayant été placés dans des chambres climatiques avec une ambiance thermique stable) et un modèle de bilan thermique du corps humain mettant en jeu 6 entrées (la température d'air sec, la température radiative moyenne, la vitesse

---

<sup>4</sup> Predicted Mean Vote

<sup>5</sup> Predicted Percentage Dissatisfied

d'air, l'humidité relative, le métabolisme et l'habillement) et une sortie représentant la différence entre la chaleur produite par le corps humain et la chaleur échangée à la surface des vêtements : Durant les expériences, les individus étaient amenés à noter leur ressenti sur une échelle de -3 (froid) à 3 (chaud), ce qui a permis à Fanger de calibrer la relation prédisant le vote moyen d'un occupant (PMV). Le pourcentage d'individus insatisfaits (ou PPD) est ensuite dérivé du PMV par une loi empirique s'appuyant sur plusieurs hypothèses :

- Le climat extérieur, le genre, le physique et l'âge de l'individu n'ont pas d'influence significative dans le lien entre la sortie du modèle « Bilan thermique » et le PMV,
- Même lorsque le bilan thermique est neutre, 5 % des individus se disent toujours insatisfaits,
- Les conditions acceptables de confort thermique (c'est-à-dire PPD inférieur à 10%) correspondent à l'intervalle de PMV [-0.5, +0.5].

Le modèle de *Fanger* a été critiqué à cause d'une trop grande stabilité des conditions d'expérimentations dans les chambres climatiques, et de données d'entrée trop importantes et difficiles à évaluer.

#### 4. Les standards et normes : le confort adaptatif

Une autre approche considère le confort thermique à travers les réactions comportementales qui caractérisent la capacité adaptative de l'occupant dans son environnement. Cette approche est basée sur des sondages de terrain, et utilise les résultats des études expérimentales in situ pour définir les conditions de confort en fonction des données météorologiques extérieures. Cette approche suscite actuellement beaucoup d'intérêts. Des réflexions ont été menées afin de l'inclure dans les normes actuelles en supplément de l'approche analytique. La méthode adaptative, développée dans standard ASHRAE55 en 2004, permet de calculer la température de confort  $T_c$  dans les bâtiments soumis à une ventilation naturelle en fonction de la moyenne mensuelle de la température extérieure  $T_o$

$$T_c = 0.31T_o + 17.8 \quad \text{Equation 1}$$

Avec :  $T_c$  : la température de confort ;

$T_o$  : la moyenne mensuelle de la température extérieure.

---

---

## CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC : MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

Cette température de confort est la température opérative dans le bâtiment qui prend en compte le rayonnement des parois ainsi que la vitesse de l'air. Le standard ASHRAE55 définit une bande de +/- 2,5°C de largeur autour la température de confort pour 90% d'acceptabilité, et de +/-3,5°C de largeur pour 80% d'acceptabilité.

Les méthodes traitant du confort adaptatif ne définissent pas en générale de limites quand il s'agit de l'humidité de l'air <sup>6</sup> : le standard ASHRAE55 se limite à la température opérative

D'autre principaux contributeurs de l'école adaptative quant à eux, ont différencié les bâtiments ayant des ambiances thermiques conditionnées (climatisation et chauffage) et naturellement ventilées. Il a été observé que les occupants ont une plus grande tolérance dans leur degré de satisfaction du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, ce qui impliquerait que les ressorts psychologiques y ont plus d'influence que dans les bâtiments conditionnés (Nicol, et al., 2002) où l'adaptabilité de l'occupant est majoritairement comportementale (modulation de l'habillement par exemple).

Cependant, le confort adaptatif présente des limites, car il revêt un volet culturel et climatique.

### 5. Les diagrammes bioclimatiques

Les diagrammes bioclimatiques sont des outils de synthèse qui permettent de choisir les grandes options architecturales à partir des exigences du confort thermique et des profils du climat. Le principe consiste à confronter sur un même graphique, « un polygone de confort », représentant les conditions extérieures et l'aire d'influence thermique et hygrométrique. Parmi les outils les plus connus dans ce domaine on peut citer le diagramme bioclimatique (Olgyay, 1963), celui de (Givoni, 1992), les tables de Mahoney, et la méthode de Szokolay.

Dans les lignes qui suivent nous parlerons du diagramme de Givoni et d'Olgyay.

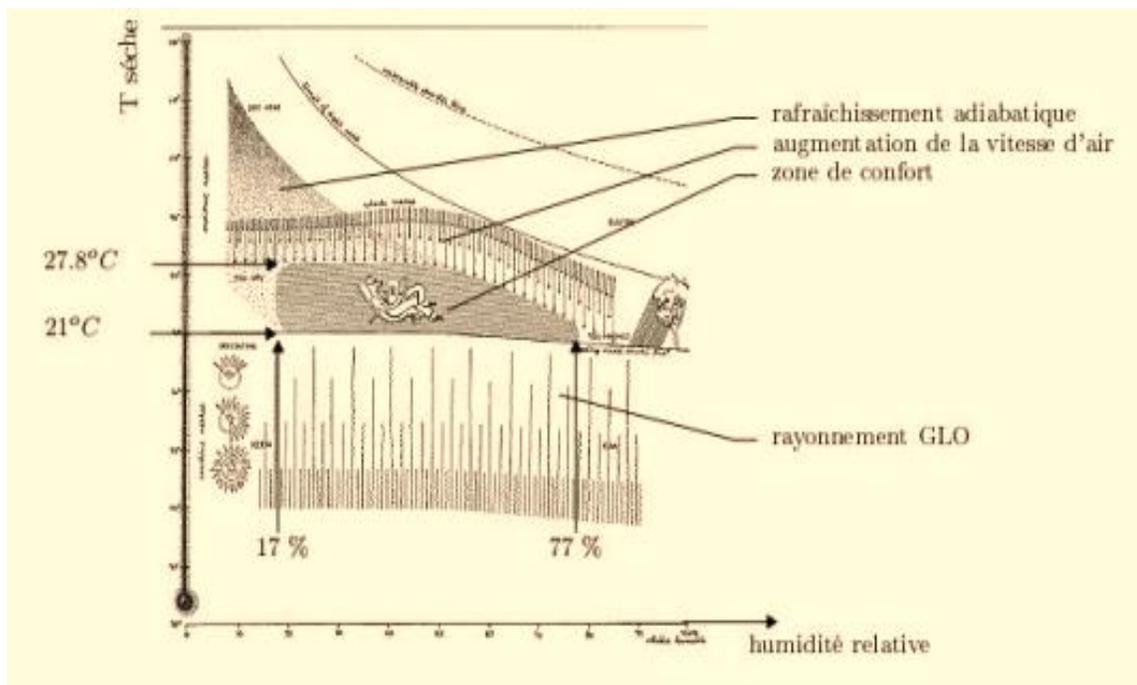
---

<sup>6</sup> EN15251 : Norme relatif Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique

**a. Le diagramme d'Olgay ;**

Le Diagramme d'Olgay est basé sur un diagramme bioclimatique mettant en évidence la zone du confort humain en relation avec la température de l'extérieur, l'humidité, la température radiante moyenne, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la perte de chaleur par évaporation. C'est une méthode destinée aux bâtiments dont l'évolution de température intérieure est fortement corrélée à la température extérieure. La méthode est adaptée pour une application dans les régions humides où il y a une légère différence entre les conditions intérieures et celles de l'extérieur.

La Figure 11 illustre bien le diagramme de (Olgay, 1963).



*Figure 11: Le diagramme bioclimatique Olgay (Madi, 2015)*

**b. Le diagramme de Givoni**

L'architecte israélien Baruch Givoni élabore, sur la base de la carte de climatologie de Olgay, une carte bioclimatique qui est un outil très simple. Il s'agit grosso modo de savoir quel type de stratégie doit être pris en compte pour un climat spécifique. Le diagramme de GIVONI permet de situer les actions possibles pour créer une situation favorable au confort. Ces actions sont de trois types :

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

- Une action liée à la conception des composants du bâtiment, par exemple utilisation de l'inertie en climat chaud et sec ;
- Une action liée à la gestion des parties du bâtiment pour moduler la ventilation des locaux ;
- Une action liée au choix de la technique de climatisation.

Une illustration de ce diagramme est faite à la Figure 12. (Givoni, 1992). Ce diagramme est divisé en plusieurs zones, chacune avec un numero. Ces zones correspondent à des zones dans lesquelles il existe des conditions climatiques similaires.

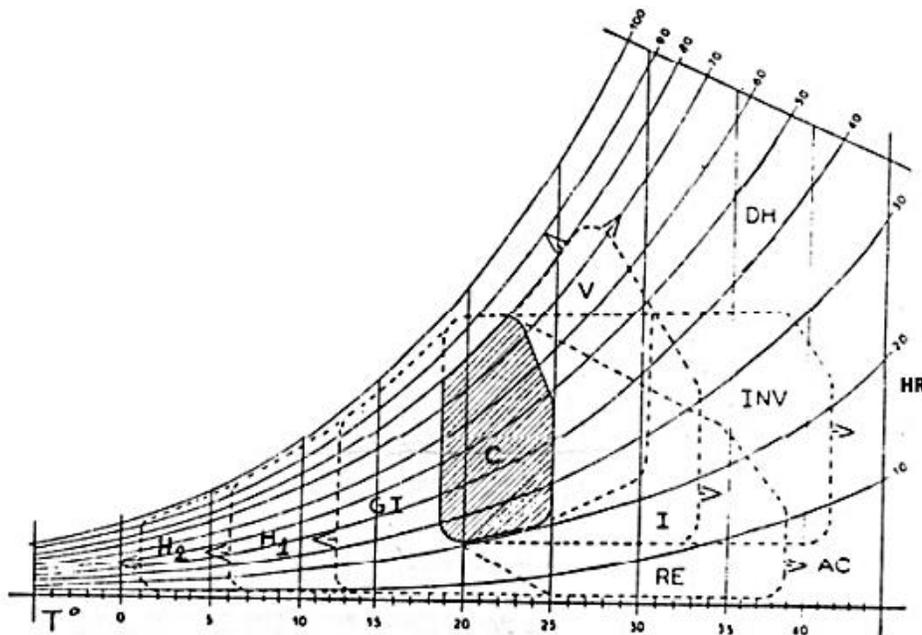


Figure 12: Le Diagramme de Givoni (Madi, 2015)

## 6. Enjeux du confort thermique dans les bâtiments en climat chaud

Malgré la faible consommation d'énergie électrique du au faite qu'elle est majoritairement consommée sous une autre forme : bois de chauffe pour la cuisine, le gaz, (...) dans les pays africains, il y a un potentiel significatif pour les économies d'énergie et la démarche durable d'une manière générale dans le secteur du bâtiment <sup>7</sup>. Les coûts des nouveaux matériaux et la forte

---

<sup>7</sup> « ONU habitat (<http://unhabitat.org/urban-themes-2/>) »

croissance démographique entraînent des constructions informelles. Face à cette crise de logement, le plus urgent est de fournir des logements aux millions de foyers. Très souvent les règles de constructions durables et d'efficacité énergétique sont ignorées ou tout simplement n'existent pas. En effet, les populations les plus pauvres doivent s'adapter au stress thermique et se contenter des équipements les moins performants. Les environnements intérieurs sont inconfortables et cela pèse sur la santé et la productivité. Etant dans un climat soudano-sahélien, les occupants des bâtiments auront de plus en plus besoin de ressources énergétiques pour atteindre des consignes de confort thermique, source potentielle d'importante consommation d'énergie. (Janda, et al., 1994)

## **7. Les Modes de refroidissement passif des habitats dans le climat soudano-sahélien**

Dans le contexte climatique tropical et subtropical la conception bioclimatique se résumera aux techniques de refroidissement passif et d'éclairage naturel. Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement. Le refroidissement passif couvre tous les processus naturels et les techniques de refroidissement ne nécessitant aucune forme d'apport énergétique, autre que les sources d'énergie renouvelables. La Figure 13 présente la classification des stratégies passives pour le bâtiment proposé par Geetha and Velraj (2012). (Geetha, et al., 2012)

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

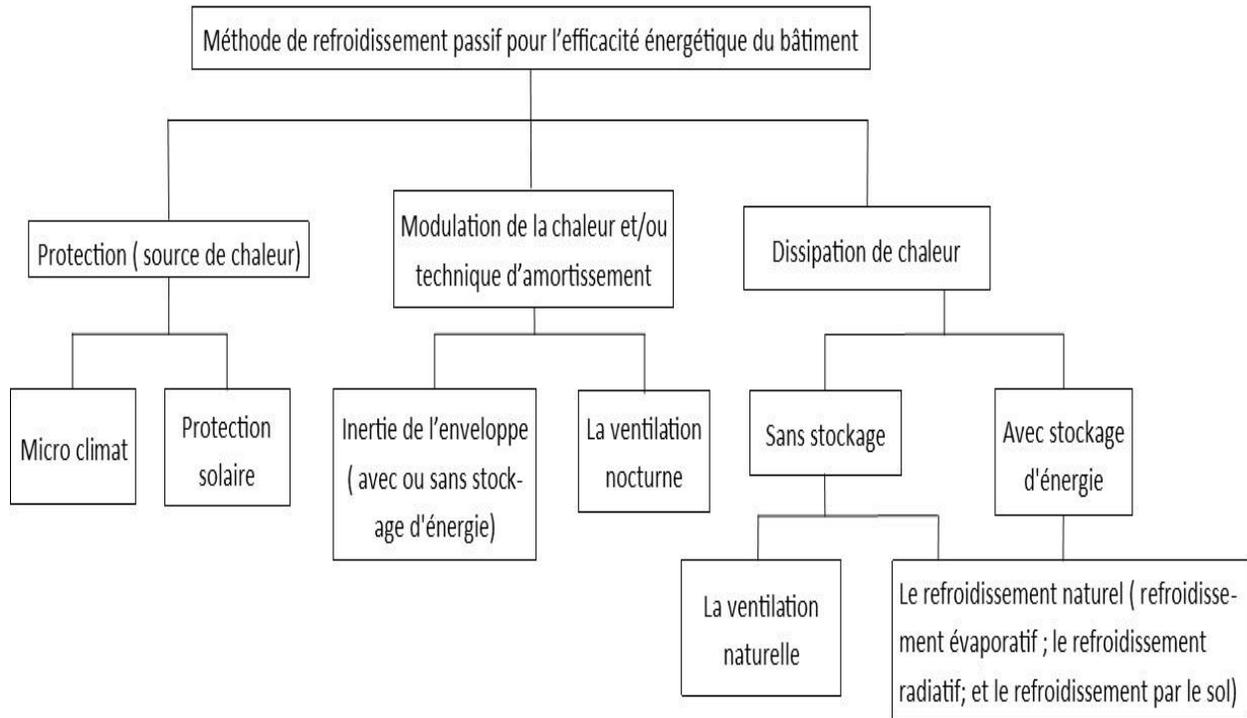


Figure 13: Classification des méthodes de refroidissement passif dans des bâtiments économes en énergie (Madi, 2015)

## II. LES METHODES D'ISOLATION THERMIQUE D'UN BATIMENT

---

Le gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment induit un transfert de chaleur de l'ambiance thermique la plus chaude vers le côté le plus froid. Un bâtiment perd sa fraîcheur vis-à-vis de l'extérieur de deux façons :

- Il perd la chaleur par transmission à travers toute l'enveloppe (vitrages, murs, toiture, planchers bas) ;
- Et aussi par renouvellement d'air.

Pour diminuer les déperditions d'énergie, la solution la plus efficace est d'isoler la maison. L'isolation thermique permet à la fois de réduire les consommations d'énergie de climatisation et d'accroître le confort.

Ainsi, la réduction des besoins énergétiques entraîne une baisse de la consommation d'énergie et, par conséquent, des émissions de gaz à effet de serre. Ce qui rend l'isolation thermique avantageux en termes de protection de l'environnement, de confort et d'économies financières. (Bareau, 2008).

## 1. Définition d'un isolant thermique dans le bâtiment

« Selon la NF P75-101 (1983) un isolant thermique destiné au bâtiment, est un produit qui réduit par sa présence, les échanges thermiques à travers la paroi sur ou dans laquelle il est placé. Par convention, on considère qu'un produit destiné à un bâtiment, peut être défini comme isolant thermique si sa conductivité thermique est au plus égal à 0,065W/m.K et sa résistance thermique est au moins égale à 0,5m<sup>2</sup>K/W» <sup>8</sup>

De façon plus générale, il existe deux grands types d'isolation d'un bâtiment et chaque type présente ses avantages et ses inconvénients (voir le *Tableau 1:*) :

- L'isolation intérieure
- L'isolation extérieure

### (a) Isolation Extérieure

Avantages

- Augmentation de la performance thermique globale du bâtiment.
- Pas de réduction de la surface habitable ni de décoration à refaire.
- Modernisation de l'aspect des façades.
- Pas d'obligation de quitter le logement pendant les travaux. Limitation des ponts thermiques structurels. Amélioration globale du confort des habitants.

Inconvénients

- Augmente l'occupation au sol sur le terrain.
- Modifie l'aspect global de la maison (façades, toitures et ouvertures).
- Nécessite de créer une avancée complémentaire de la couverture et de la toiture et de modifier le système de récupération des eaux de pluie.
- Le pont thermique entre les combles et la façade reste malgré tout très important.
- Fixation des systèmes de fermeture à revoir (volets battants).
- Isolation des tableaux et appuis de fenêtres réduisant la grandeur des ouvertures et donc l'apport lumineux.
- Ne peut pas être appliqué sur tous les bâtiments. Obligation de consulter les règles d'urbanisme et de s'assurer de l'accord des architectes.

### (b) Isolation Intérieure

Avantages

- Augmentation de la performance thermique globale du bâtiment.
- Amélioration du confort acoustique intérieur avec mise en œuvre de systèmes thermo-acoustiques.
- Coût d'exécution moins onéreux qu'une solution d'isolation par l'extérieur.

<sup>8</sup> ADEREE : Agence nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

- Systèmes d'isolation faciles et rapides à mettre en œuvre.
- Réhabilitation et redistribution des pièces facilitée par les systèmes de doublage permettant le passage des gaines (électricité ou alimentation en eau).

Inconvénients

- Réduction de l'espace habitable.
- Révision du plan électrique (déplacement des prises, appliques et interrupteurs).
- Embrasure des portes et des fenêtres à prévoir pour réduire au minimum les déperditions lumineuses.
- Décoration intérieure à refaire.
- Lors des travaux à effectuer dans un local évacué de ses habitants durant la période des travaux.

---

Tableau 2: Avantages et Inconvénients des méthodes d'isolation (a) extérieure et (b) intérieure

NB : Il existe d'autres types d'isolation dérivées des deux précédemment cités tels que : l'isolation repartie, l'isolation sandwich, ...

## 2. Le principe d'isolation des bâtiments

L'interaction thermique d'un bâtiment avec son environnement se traduit par des échanges de flux de chaleur. Le flux prend un sens ou une direction et ce sera toujours dans le sens du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Il est également important de remarquer que ce flux prendra toujours le chemin de moindre résistance. Le but de l'isolation est de freiner cet échange thermique<sup>9</sup>. Pour ce faire le principal intérêt est d'identifier la répartition des déperditions et de proposer des scénarios d'amélioration énergétique les plus cohérents possibles. La répartition des déperditions dans une habitation non isolée est illustrée par la Figure 14

---

<sup>9</sup> ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

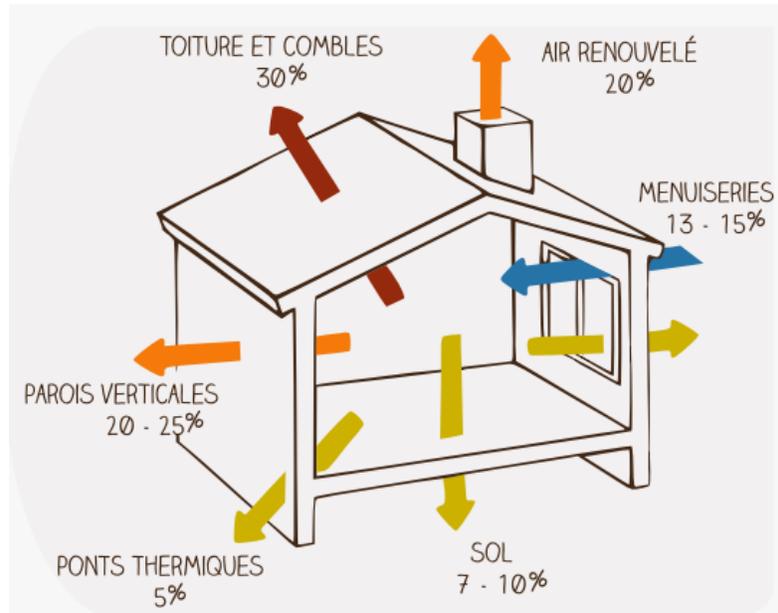


Figure 14 : Répartition des déperditions thermiques dans un habitation sans isolant thermique : ADEME 2011

Ces chiffres n'ont qu'une vertu pédagogique pour montrer où se situent habituellement les déperditions. Selon le niveau d'isolation, la forme, le nombre d'étages, la surface de chaque élément, la mitoyenneté, etc. les résultats peuvent donc être très différents.

### 3. Les types d'isolant thermique

« Il existe plusieurs matériaux pouvant être utilisés pour une efficacité maximale de l'isolation thermique. Mais chaque isolant dispose de caractéristiques différentes dont la conductivité (voir Figure 15). Il n'en n'existe pas un meilleur que d'autres, car l'isolant à utiliser dépend de la structure de l'habitat »<sup>10</sup>. On distingue trois familles principales d'isolants : les isolants naturels, minéraux et synthétiques.

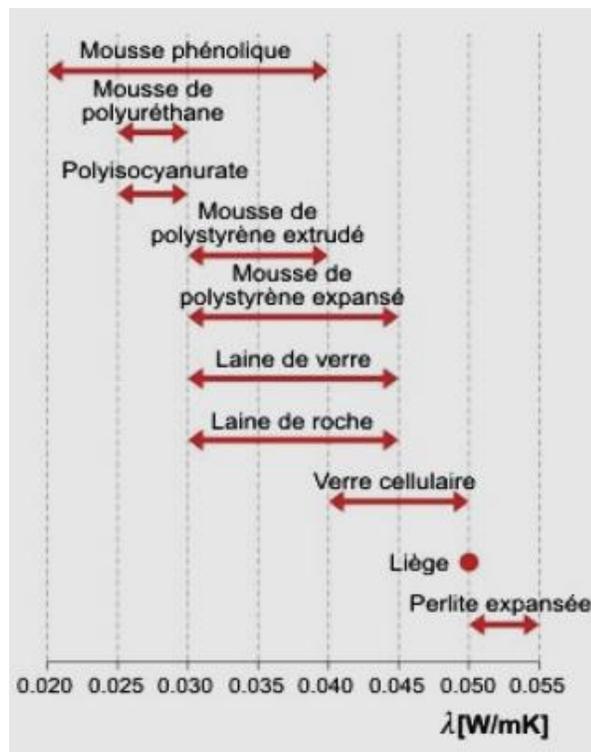


Figure 15: La conductivité thermique maximale et minimale des isolants fournis par les spécifications techniques de l'EOTA 2013

---

<sup>10</sup>EOTA: European Organization for Technical Approvals

### a. Les isolants naturels

Les isolants naturels sont réputés pour participer à la biodiversité et au développement durable. Créés à base de fibres animales ou végétales, ils bénéficient aujourd'hui d'une aura positive, du fait du développement des énergies vertes et des produits bio-sourcés. Parmi les isolants naturels, on peut citer le chanvre, les fibres de bois, la laine de mouton ou encore les fibres de cellulose, (...). La Figure 16 illustre deux exemples d'isolant naturel



(a)

(b)

Figure 16: illustration d'une isolation naturelle : en (a) un chanvre et en (b) des fibres de cellulose : VirageVert

### b. Les isolants minéraux

Peu chers, les isolants minéraux ont des qualités thermiques et phoniques importantes et sont généralement les plus utilisés lors de travaux d'isolations, à l'image de la laine de verre qui est l'un des isolants les plus connus par les particuliers. Ces isolants sont fabriqués à partir de matières premières comme la roche, le sable ou le verre recyclé. Parmi les isolants minéraux, on trouve la laine de roche, le verre cellulaire, la perlite ou encore l'argile expansée, (...). A titre exemple, une illustration a été faite à la Figure 17.



Figure 17: illustration d'une isolation minérale : en (a) une laine de verre et en (b) une verre cellulaire : VirageVert

### c. Les isolants synthétiques

D'origine organique, les isolants synthétiques tels que le polyuréthane, le phénolique, le polystyrène ou même le textile recyclé, sont très efficaces en ce qui concerne l'isolation thermique et phonique. Résistants et très perméables, il faut tout de même noter qu'ils sont nocifs pour l'environnement. Les professionnels les utilisent régulièrement pour les isolations des sols, des murs et des toitures. En cas d'incendie, ce sont des isolants dangereux, car ils dégagent des particules toxiques pour l'homme. Parmi les isolants synthétiques on peut citer : polystyrène expansé, polystyrène extrudé, polyuréthane, mousse phénolique, (...). La Figure 18 en illustre deux exemples.



Figure 18: illustration d'un isolant synthétique : en (a) un polystyrène expansé et en (b) une mousse phénolique : VirageVert

### III. LES ECO-MATERIAUX : BTCs

---

L'habitat et son contexte urbain apparaissent de plus en plus en Afrique comme un outil important de la mondialisation référée à la modernité occidentale, qui y est de fait, considérée comme l'unique modernité (Ouedraogo, 2015). Ce qui conduit à l'importation de certains produits de construction. Au Burkina Faso, la proportion des importations de produits manufacturés liées au secteur du bâtiment et des travaux publics est aujourd'hui de l'ordre de 45% (Ouagadougou, 1994). De plus ces matériaux de construction sont relativement chers car leurs matières premières sont importées et ne sont pas abordables pour une grande partie de la population et d'autre part inadapté au contexte climatique chaud. La solution à ce problème pourrait se trouver dans l'utilisation des matériaux locaux de construction (Ouedraogo, 2015).

Dans ce contexte, les matériaux en terre restent le moyen de construction le plus économique pour ces populations car ces matériaux, en particulier la latérite, se trouvent sur la quasi-totalité du territoire national à l'exception de la zone désertique de l'extrême nord et de l'extrême est du pays (U.Wyss, 2005). Cependant, ces constructions en terre tel que l'adobe souffrent malheureusement de mauvaises réputations dues à leurs résistances mécaniques et à leur grande sensibilité à l'eau. Autrement dit suivant l'usage que l'on va faire des briques, il peut être utile, voire nécessaires de

les stabiliser. La stabilisation est un ensemble de procédé physique ou chimique visant à améliorer les caractéristiques d'une brique en terre : en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité et ses caractéristiques thermo-physiques. En d'autres termes, elle réduit le volume des vides entre les particules solides ; colmater les vides que l'on peut supprimer ; crée des liens ou améliorer les liaisons existantes entre les particules (MEUKAN, 2004).

Elle permet de :

- réduire le volume des vides entre les particules solides ;
- créer des liens ou d'améliorer les liaisons existantes entre les particules ;
- incorporer de la matière isolante dans la matrice

Plusieurs procédés de stabilisation, font objet d'existence :

### **1. La stabilisation mécanique**

Elle améliore la brique de terre par la modification de sa densité naturelle. Il s'agit du compactage qui permet une réduction de la porosité du matériau par resserrement des particules, ce qui conduit à une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. La stabilisation mécanique est faite par une presse. Dans le cas de la production de blocs de terre comprimée, l'action des presses consiste à resserrer les grains (MEUKAN, 2004).

### **2. La stabilisation chimique**

Elle modifie les propriétés d'une brique de terre par l'intermédiaire de certains adjuvants. Pour réduire la sensibilité à l'eau, l'adjonction de certains liants hydrauliques (le ciment, la chaux, ...) est nécessaire, car ils rendent les sols traités moins hydrophiles. La chaux et le ciment étant tous deux des liants hydrauliques contribuent en général à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques des poudres minérales.

Pour la chaux, c'est l'hydroxyde de calcium, produit de l'hydratation de la chaux vive qui réagit avec les minéraux argileux et la silice fine ; ceci est responsable de la modification des propriétés géotechniques et mécaniques des matériaux. Quant au ciment, il contribue à l'amélioration desdites propriétés par un mécanisme de jonction des particules du sol par les silicates de calcium hydratés produits au cours de l'hydratation du ciment d'une part, et d'autre part, par la réaction

pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit et les particules argileuses du sol. L'ampleur des effets des liants dépend surtout de la granulométrie et de la minéralogie de la matière première traitée (MEUKAN, 2004).

### **3. La stabilisation physique**

Elle modifie les propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granulométrie. Le mélange obtenu conduit selon le cas, soit à diminuer l'indice de plasticité du matériau de base, soit à lui conférer une certaine cohésion. Sikali cité par (MEUKAN, 2004) a étudié la stabilisation granulaire d'une latérite par ajout de gravillons concassés. Il a constaté que pour un pourcentage optimum du matériau d'apport, la portance du matériau étudié s'améliore considérablement (Ouedraogo, 2015)

### **4. Les stabilisants**

Le premier liant du BTC est l'argile contenue dans la terre. Mais lorsque le matériau simplement compressé ne répond pas aux critères requis (sa résistance en compression ou traction, et surtout sa tenue à l'eau), ses performances peuvent être modifiées en y ajoutant un liant. La nature et la quantité du liant à ajouter dépendent du type de sol considéré et des performances mécaniques et thermo physiques désirées des blocs. En cas d'utilisation du ciment, il est préconisé de faire varier la teneur en poids sec entre 4% et 12% et en cas de chaux entre 2% et 6% (P'KLA, 2002). L'amélioration des propriétés mécaniques par l'ajout de ciment a été étudiée par de nombreux auteurs (Boffoue, et al., 2015), (Millogo, et al., 2012) et ils s'accordent à dire que cette amélioration peut être attribuée à la création de liens entre les particules de sol et les hydrates formés lors de l'hydratation du ciment. Ces hydrates, généralement composés de silicates de calcium hydratés et de plaquettes de Portlandite, se développent à la fois dans les zones de contact entre l'argile et le sable et dans la matrice argileuse. Ils génèrent des liaisons argilo-ciment ou argilo-sable-ciment, ce qui permet aux grains de CEB d'être plus consolidés et de résister aux contraintes mécaniques. Malheureusement, l'utilisation du ciment Portland pour la stabilisation des CEB dégrade les propriétés thermiques de ces matériaux, ce qui entraîne des problèmes de confort thermique (Sore, 2018). A défaut, (Sore, 2018) a mis en évidence la

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

stabilisation la terre avec un liant : géopolymère, une solution pour limiter la production de gaz à effet de serre liés à la fabrication du ciment et pour répondre aux problèmes de logement. Ces travaux ont pu montrer, que les CEBs stabilisés au géopolymère (contenu 10%) présentent des valeurs de compression à sec bien supérieures aux 4 MPa recommandés par la norme XP P13-901 (2001). D'un point de vue thermique, les blocs géopolymérisés ont des valeurs plus faibles pour certaines propriétés thermiques que les blocs stabilisés au ciment. La valeur de la conductivité thermique reste très proche de celle des blocs sans stabilisateur. L'amélioration des propriétés mécaniques par le liant géopolymère n'altère pas les propriétés thermiques des échantillons, alors que la stabilisation au ciment le fait. C'est un atout pour l'utilisation de ce type de matériau dans les matériaux de construction.

Par ailleurs, d'autres auteurs tels que (Nshimiyimanan, 2020) s'engagent à revaloriser les sous-produits provenant de l'agriculture, de l'industrie ou des déchets municipaux dans les matériaux de construction en terre en général et des CEB en particulier. Il s'agit des résidus de carbure de calcium (CCR<sup>11</sup>) et les cendres de balle de riz (RHA<sup>12</sup>). Cela permet d'une part de réutiliser les déchets qui seraient autrement dangereux pour l'environnement et d'autre part de maintenir éventuellement le matériau en terre à faible énergie intrinsèque et recycle. Ces résultats ont pu montrer que la compression des CEB stabilisés par le CCR a dépassé 4 et 2 Mpa avec 10% de CCR respectivement en condition sèches et humides, comme requis pour les constructions de bâtiment à deux étages. L'efficacité thermique des CEB stabilisés est démontrée par la diminution de l'effusivité thermique et de l'augmentation de la capacité thermique. Cela entraîne une diminution de la conductivité thermique de 1,02W/mK pour le CEB non stabilisé à 0.69W/mK ou 0.64W/mK respectivement pour les CEB stabilisés avec 25% de CCR ou de 16 :4% de CCR :RHA.

---

<sup>11</sup> Calcium Carbide Residue

<sup>12</sup> Rice Husk Ash

---

## CONCLUSION PARTIELLE

---

Cet état de l'art sur le confort thermique montre le conflit actuel entre deux approches : l'approche analytique et l'approche adaptative. Malgré le conflit apparent entre les deux approches, elles ne sont pas contradictoires dans leur principe. Elles restent complémentaires. Par ailleurs, nous avons mis en avant le fait qu'il n'est pas évident d'être dans des conditions de confort en climat chaud avec le mode de construction actuel qui font usage de matériaux qui sont de plus en plus énergivore. *Ne devrait-on pas changer la manière de construire ? est-ce opportun d'ajouter un isolant comme dans les pays occidentaux ?*

Par ailleurs, les chercheurs (Hema, et al., 2020), ont montré par stimulation que les murs à double couche en termes de propriétés thermiques (masse thermique et une couche de résistance thermique) doivent être considérés dans les bâtiments à ventilation naturelle car elle améliore le climat intérieur contrairement aux murs creux en blocs de béton. Dans ce même ordre d'idée, nous allons mener dans le chapitre qui suit, une étude expérimentale sur un bâtiment pilote au sein de l'institut 2ie afin de tenter de répondre à ces questions.

## CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE

---

CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE	43
I. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	44
1. Le bâtiment expérimental	44
2. Configuration des murs	45
3. Le programme de ventilation naturelle	47
II. LES PARAMETRES THERMIQUES MESURES	49
1. Les radiations globales	49
2. La température extérieure et intérieure du bâtiment	49
III. CRITERE D'EVALUATION DU CONFORT DANS L'ENCEINTE DU BATIMENT	51
1. La recherche de jour similaire	51
2. Les paramètres d'évaluation	52
IV. LES RESULTATS	53
1. La recherche de jour similaire	53
2. L'impact de la configuration des murs sur le climat intérieur	54
3. Impact du mode de ventilation sur le climat intérieur	55
V. DISCUSSIONS	56
1. Impact de la configuration des murs sur la température intérieure	56
2. Stratégie de ventilation des configurations BTC, BTCin et BTCout	57

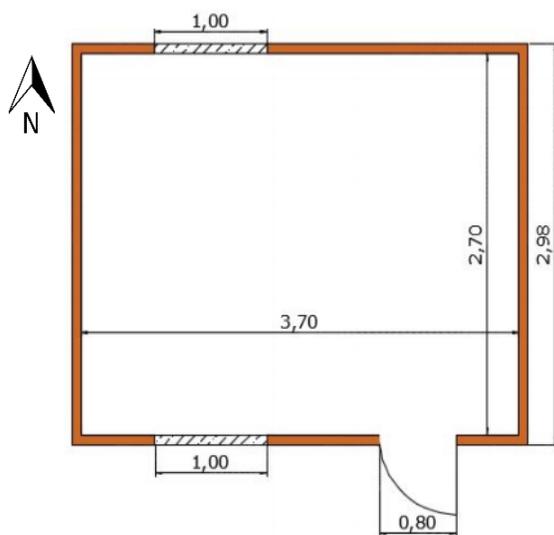
Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale d'un bâtiment pilote au sein de l'institut 2iE. Nous présenterons de façons succincte les outils et la méthodologie utilisées au cours de cette étude expérimentale. Les données collectées seront traitées, analyses et devront permettre de confirmer ou infirmer l'utilisation d'une résistance thermique à une paroi multicouche (BTC+ laine de verre).

## I. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

---

### 1. Le bâtiment expérimental

Le bâtiment expérimental (  $12^{\circ}27'49''N$  et  $1^{\circ}33'12.2''W$ ) est situé dans l'enceinte de L'institut International de l'Eau de l'Environnement (2iE) sur le site de Kamboinsin. Les parois du bâtiment sont en BTC stabilisé à 8% de ciment et jointé au mortier de ciment. Le système de toiture consiste en une tôle métallique en alliage aluminium-zinc de 35/100 mm d'épaisseur, un comble naturellement ventilé grâce à des orifices circulaires, et en un faux plafond en contre plaque de 3 mm d'épaisseur. Les fenêtres ainsi que la porte d'entrée consistent en un système de cadre métallique et d'un vitrage de 3 mm d'épaisseur. La Figure 19 montre le schéma du bâtiment expérimental tandis que le Tableau 3 résume les propriétés thermiques des principaux composants sur base de la littérature (Aimé, 2019).



(a)

(b)

Figure 19: illustration du bâtiment expérimental : (a) la vue en plan et (b) un aperçu photographique

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
**MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A**  
**VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE**

		Thermal conductivity (W/mK)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/kg.K)
BTC		1.016	1963,08	985,92
Système de toiture	Feuille	7.07	7800	450
	Plafond	0.13	410	1600
Fenêtre		6	2700	//
Porte		60	7800	450

Tableau 3: Résumé des propriétés thermiques des différents constituants du bâtiment expérimental

## 2. Configuration des murs

L'impact de l'ajout d'une résistance thermique à la paroi en BTC sur le confort thermique est investigué dans la présente étude. Par conséquent, de la laine de verre, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 4, a été utilisée dans deux configurations différentes : La configuration dans laquelle la masse thermique, c'est-à-dire la BTC est à l'extérieur et la résistance thermique à l'intérieur, nommée « BTCout » et celle où la BTC est à l'intérieur et la résistance thermique à l'extérieur, nommée « BTCin ». Il s'agit de rajouter au cas de base, une couche résistive à l'extérieur et à l'intérieur pour se trouver dans la configuration « BTCout » et « BTCin » respectivement. Le cas de base, décrit dans la section précédente, nous servira de référence pour comparer les performances thermiques des différentes configurations de paroi. Le Tableau 5 résume les différents systèmes constructifs de notre paroi.



Désignation	Laine de Verre
Type	ISOVER
Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)	0,04
Masse Volumique $\rho$ ( kg/m3)	30
Capacité thermique (kg/m3)	1000
Epaisseur (cm)	5

Tableau 4: Caractéristiques de la laine de verre utilisée

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
 MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
 VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

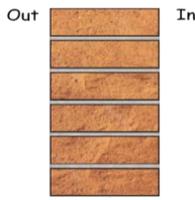
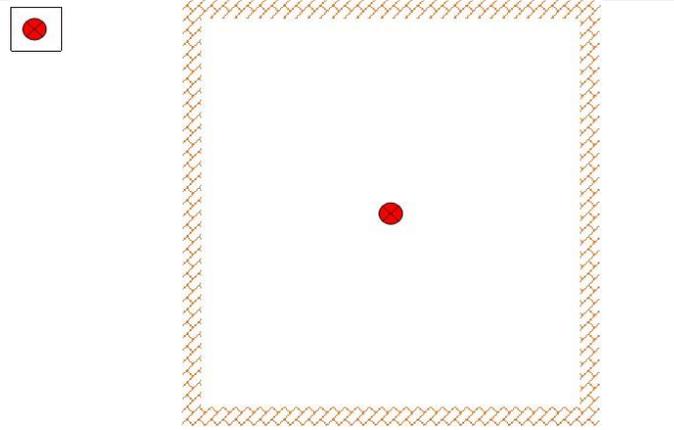
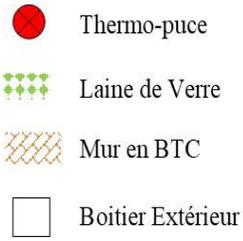
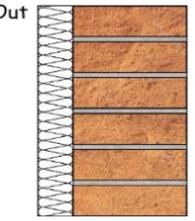
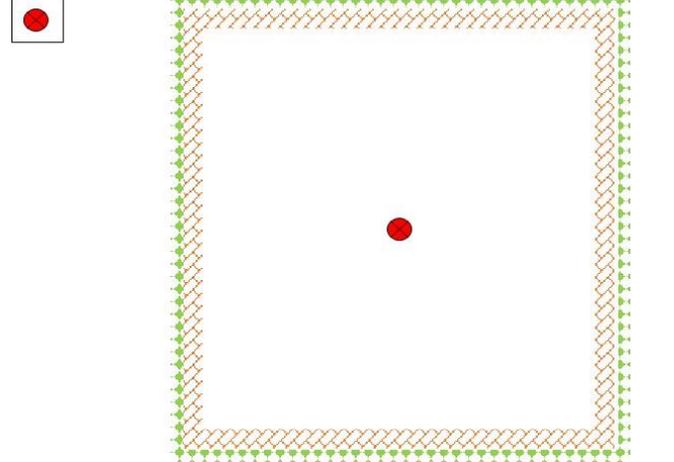
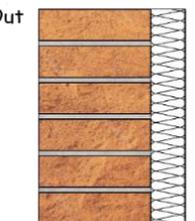
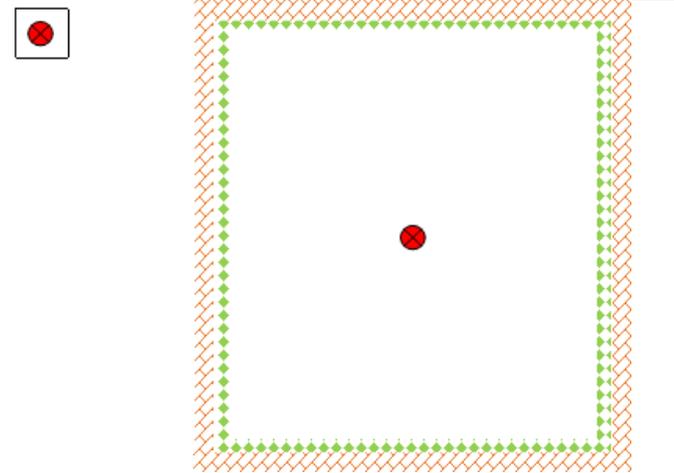
	Système de paroi	Configuration des parois	Legende
BTC (a)			
BTCin (b)			
BTCout (c)			

Tableau 5 : illustration du système constitutif des parois du bâtiment : (a) sans isolation, (b) isolation extérieure et (c) l'isolation intérieure

### 3. Le programme de ventilation naturelle

Un programme de ventilation naturel a été établi à des fins de refroidissement passif du bâtiment. Comme définit par Tableau 6, le bâtiment a fait objet d'ouverture ou de fermeture selon les périodes et des heures définies sur la base d'analyse minutieuse de l'ambiance extérieure (température et radiation extérieure). Cette analyse a permis de ressortir trois (03) programmes de ventilation :

- Le bâtiment fermé en continue : pendant la période où les mesures ont été effectuées, les fenêtres ainsi que la porte d'entrée sont restées fermées ; l'objectif étant de n'appliquer aucune ventilation. Ainsi, les échanges d'air avec l'ambiance extérieure sont donc dus uniquement à l'infiltration.
- Le bâtiment en ventilation continue : pendant la période où les mesures ont été effectuées, les fenêtres sont restées continuellement ouvertes ; l'objectif étant d'avoir un échange d'air permanent entre l'ambiance intérieur et l'ambiance extérieur. La porte quant à elle est restée fermé pour des raisons de sécurité.
- Le bâtiment en ventilation nocturne : pendant la période où les mesures ont été effectuées, les fenêtres sont restées fermées le jour et ouvertes la nuit. L'objectif était de limiter les échanges durant la journée où l'air est chaud et de favoriser les échanges durant la nuit où la température de l'air est plus faible. Durant cette période, le bâtiment est resté fermé de 5h00 à 22h00, ouvert de 22h00 à 5h00. Ces horaires ont été fixés sur la base des températures de l'air extérieur observées comme indiquée sur le graphique de la Figure 20 le 31/08/2019 et le 01/09/2019. En effet les minimas horaires de températures sont observés généralement entre 05h dans la matinée et 22h00 en soirée.

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
 MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
 VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

	BTC	BTCout	BTCin	Configuration des ouvertures du bâtiment
Local fermé	22/01/2020 au 03/02/2020 & 23/06/2017 au 02/09/2017	24/07/2019 Au 22/09/2019	01/05/2019 au 03/05/2019 & 08/04/2019 au 15/04/2019	Portes fermée ; Fenêtre fermée
Ventilation continue	20/02/2020 Au 03/03/2020	25/10/2019 Au 14/11/2019	23/04/2019 au 28/04/2019 & 09/05/2019 au 13/05/2019	Porte fermée ; Fenêtre ouverte
Ventilation nocturne	04/02/2020 Au 17/02/2020	23/09/2019 Au 25/11/2019	10/06/2019 au 16/06/2019 & 18/05/2019 au 02/06/2019	Porte fermée ; Fenêtre ouvert à 22h et fermé à 5h

Tableau 6: Récapitulatif des périodes de ventilation du bâtiment expérimental

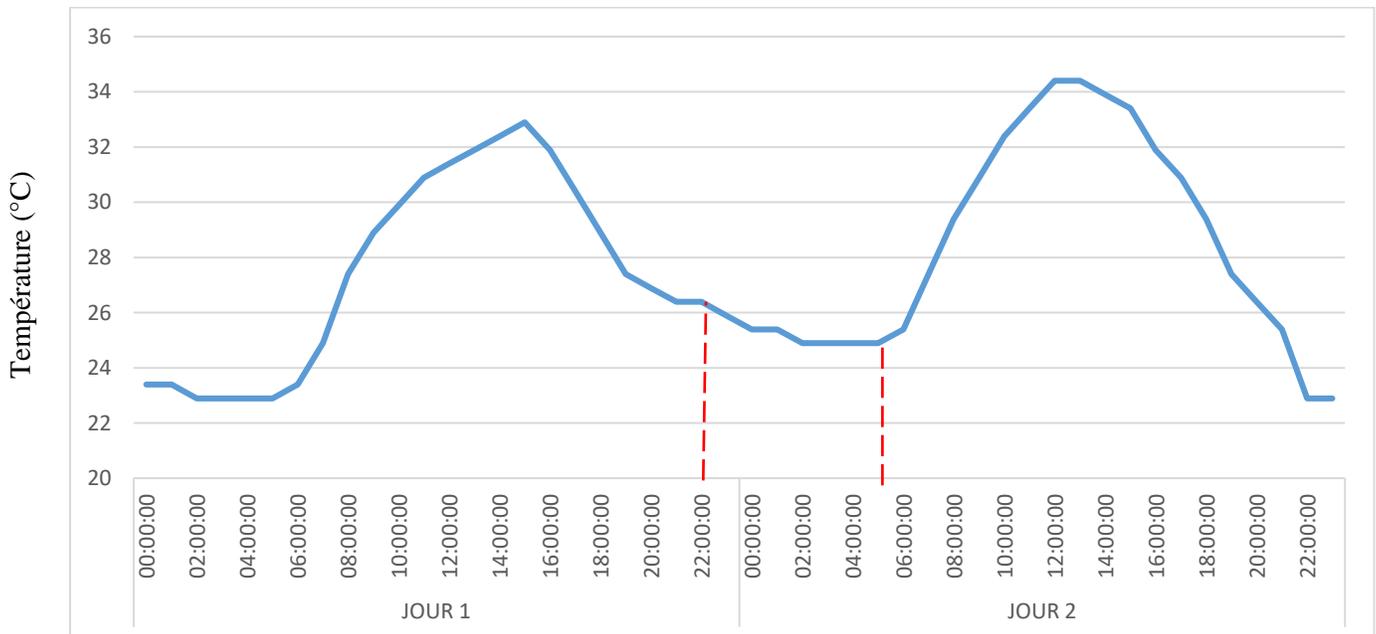


Figure 20: Mise en évidence des minima horaires [ 22h-5h] durant la ventilation nocturne

## II. LES PARAMETRES THERMIQUES MESURES

---

### 1. Les radiations globales

Les données sur la radiation solaire ont été obtenues grâce à une mini station météorologique Vaisala AWS310 (voir Figure 21) installée à proximité (environ 200 m) du bâtiment expérimental. Cet abri météorologique est doté d'un ensemble de capteurs qui enregistrent et fournissent les paramètres météorologiques liés aux variations du climat. Les données qui ont pu être mesurées par la station météorologique sont les radiations globales avec un pas d'enregistrement de 1 mn. L'acquisition des données a été possible grâce au logiciel Vaisala AWS client. Le traitement des données mesurées a permis d'obtenir les radiations globales heure par heure.



Figure 21: La station météorologique Vaisala AWS310

### 2. La température extérieure et intérieure du bâtiment

La température de l'air extérieur et intérieur a été mesurée grâce à des Thermo-Puces de type G Waranet-solution (voir Figure 22 ). Ces enregistreurs miniatures programmables, enregistrent les données de la température de l'environnement dans lequel ils sont soumis. Un pas d'enregistrement horaire a été choisi pour cette étude expérimentale.

Au nombre de deux (2) (voir ANNEXE 2 : LA FICHE TECHNIQUE DES THERMO-PUCES ), ces

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

Thermo-Puces ont été utilisé et disposée de la manière suivante :

- Une (01) à proximité du bâtiment expérimental pour la mesure de la température extérieure, a été disposé dans un boîtier comportant des aérations afin de la protéger du rayonnement solaire.
- Une (01) au milieu, à l'intérieur du bâtiment à une hauteur de 1,2 m du sol, pour la mesure de l'air intérieur.



Désignation	Thermopuce
Modele	TG
Constructeur	Waranet Solution
Diamètre	17.5 mm
Plage de Fonctionnement	[-40;+85]°C
Résolution	0.5°C

Figure 22 : Caractéristiques des thermo puces utilisées

Le Tableau 5 illustre bien la disposition des Thermo-Puces sur le bâtiment expérimental dans les cas de l'isolation extérieure et intérieure. Les Thermo-Puces placées en surface intérieur et extérieur ont été isolé grâce à de la laine de verre afin de réduire l'impact de la température de l'air et de la radiation solaire sur la mesure de la température de surface des parois. L'acquisition des données a été possible grâce au logiciel Warito II de Waranet-solution.

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
 MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
 VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

Le Tableau 7 résume les paramètres thermiques mesurés durant l'expérimentation.

	<b>Outils d'acquisition</b>	<b>Outils de traitement</b>
<b>Radiation solaire</b>	Vaisala AWS310	logiciel Vaisala AWS client
<b>Temperature de l'air exterieur</b>	Thermo-Puce de type G Waranet-solution	Warito II de Waranet-solution
<b>Temperature de l'air interieur</b>		

Tableau 7: Récapitulatif des paramètres thermiques mesurés

### III. CRITERE D'EVALUATION DU CONFORT DANS L'ENCEINTE DU BATIMENT

---

#### 1. La recherche de jour similaire

Pour permettre la comparaison entre les configurations de parois, tout en s'affranchissant de l'influence du climat extérieur, il aurait fallu pouvoir expérimenter simultanément trois bâtiments (correspondant aux trois configurations prédéfinies). Cependant, pour palier à cette contrainte, des hypothèses ont été émises afin de réduire, voire annuler, l'impact de la différence du climat extérieur des jours choisis sur l'évaluation de l'ambiance intérieure. Ces hypothèses concernent l'amplitude thermique journalière extérieure, l'intensité de la radiation globale et l'heure d'occurrence du pic de température : alors les trois configurations sont considérées sous l'influence d'une même contrainte climatique extérieure lorsque (i) l'amplitude thermique journalière est inférieure à 0.5°C, (ii) la moyenne de la radiation thermique journalière inférieure à 50 W/m<sup>2</sup> et (iii) que le pic de température se produit à la même heure. Il s'agira donc d'identifier au minimum trois jours (dans les trois configurations) qui respectent ces conditions. L'Equation 2 résume les conditions de validité des jours considérés comme ayant la même contrainte climatique extérieure.

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{jour similaire} \\ \text{Max}(Amp_{CEB}; Amp_{CEBin}; Amp_{CEBout}) - \text{Min}(Amp_{CEB}; Amp_{CEBin}; Amp_{CEBout}) < 0.5^\circ \\ \text{Max}(Rd_{CEB}; Rd_{CEBin}; Rd_{CEBout}) - \text{Min}(Rd_{CEB}; Rd_{CEBin}; Rd_{CEBout}) < 50 \text{ W/m}^2 \\ pic_h(CEB) = pic_h(CEB_{out}) = pic_h(CEB_{in}) \end{array} \right. \quad (\text{Equation 2})$$

Avec, **Amp<sub>BTC</sub>** : l'amplitude thermique journalière dans la configuration BTC ( °C), **Amp<sub>BTCin</sub>** : l'amplitude thermique journalière dans la configuration BTC<sub>in</sub>( °C), **Amp<sub>BTCext</sub>** : L'amplitude thermique de journalière dans la configuration BTC<sub>ext</sub> ( °C), **Rd<sub>BTC</sub>** : La radiation thermique moyenne journalière de la configuration BTC ( W/m<sup>2</sup>), **Rd<sub>BTCin</sub>** : La radiation thermique moyenne journalière de la configuration BTC<sub>in</sub>( W/m<sup>2</sup>), **Rd<sub>BTCout</sub>**: La radiation thermique moyenne journalière de la configuration BTC<sub>out</sub>( W/m<sup>2</sup>), **pic<sub>h</sub> ( BTC)** : Pic de température horaire de la configuration BTC (h), **pic<sub>h</sub> ( BTC<sub>out</sub>)** : Pic de température horaire de la configuration BTC<sub>out</sub>(h), **pic<sub>h</sub> ( BTC<sub>int</sub>)** : Pic de température horaire de la configuration BTC<sub>in</sub>(h).

L'analyse de l'impact de la sensibilité de 0.5°C de la température et de 50w/m2 de la radiation a été effectué en vue de voir l'effet de ses sensibilités sur le climat intérieur du bâtiment. Cela a été possible grâce au logiciel de stimulation dynamique Wufi ( *ANNEXE 1 : Vérification de l'impact de la sensibilité de 0.5°C pour température et de 50 W/m2 pour la radiation* )

## 2. Les paramètres d'évaluation

Les conditions du climat extérieure étant fixées par la recherche des jours similaires, l'évaluation de la réponse thermique selon les trois configurations sera faites par deux paramètres physiques : (i) l'amplitude thermique qui est la différence du maximum et le minimum de la température observée sur une période de 24heures traduite par l' Equation 3 et (ii) le facteur d'amortissement qui est le rapport entre l'amplitude intérieure et l'amplitude extérieure traduite par l' Equation 4. En outre, plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties et mieux est le confort.

$$Amp_{xj} = \max(temp_j) - \min(temp_j) \quad \text{Equation 3}$$

$$f = \frac{\Delta T_{int}}{\Delta T_{ext}} = \frac{Amp_{xintj}}{Amp_{xextj}} \quad \text{Equation 4}$$

Avec, **Amp<sub>xj</sub>** : l'amplitude thermique de la configuration x à la journée « j » (°C), **Temp<sub>j</sub>** : la température de la journée « j » (°C), **Amp<sub>xintj</sub>** ; amplitude thermique intérieure de la configuration x de la journée « j » (°C), **Amp<sub>xextj</sub>** ; amplitude thermique extérieure de la configuration x de la journée « j » (°C), **f** : le facteur d'amortissement

## IV. LES RESULTATS

### 1. La recherche de jour similaire

Le Tableau 8 présente les résultats de la recherche des jours similaires. Les critères précédemment définis (Cf. Section III) sont considérés. La recherche des jours similaires est catégorisée en fonction des stratégies de ventilation, l'amplitude thermique extérieure, la radiation thermique et les horaires de pics journalières. La Figure 23 présente à titre illustratif, les jours similaires pour l'évaluation du système de parois multicouche. Sur la Figure 23(a) il est constaté que les différences entre les amplitudes thermiques sont inférieures à 0,5°C. Sur la Figure 23(b) les différences entre radiation sont inférieures à 50W/m<sup>2</sup> et sur la Figure 23(c), les pics de température observés à la même heure.

		Configuration des murs	Jours similaires	Critère amplitude thermique <0,5°C	Critère amplitude thermique <50W/m <sup>2</sup>	Critère des pics horaires (h)
<b>SYSTÈME DE PAROI MULTICOUCHE</b>		BTCin	16/05/2019	8,50	317,08	15
		BTCout	01/08/2019	8,99	284,83	
		BTC	07/08/2017	8,53	301,56	
<b>STRATEGIE DE VENTILATION</b>	FERME	BTCin	14/05/2019	12,43	508,73	
		BTCout	11/09/2019	12,21	547,44	
		BTC	23/01/2020	12,16	532,56	
	NOCTURNE	BTCin	23/05/2019	12,49	300,82	
		BTCout	27/09/2019	12,21	263,25	
		BTC	12/02/2020	12,33	261,59	
	CONTINUE	BTCin	09/05/2019	12,49	330,83	
		BTCout	27/10/2019	12,01	290,53	
		BTC	24/02/2020	12,40	263,78	

Tableau 8: récapitulatif des jours similaires

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
**MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A**  
**VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE**

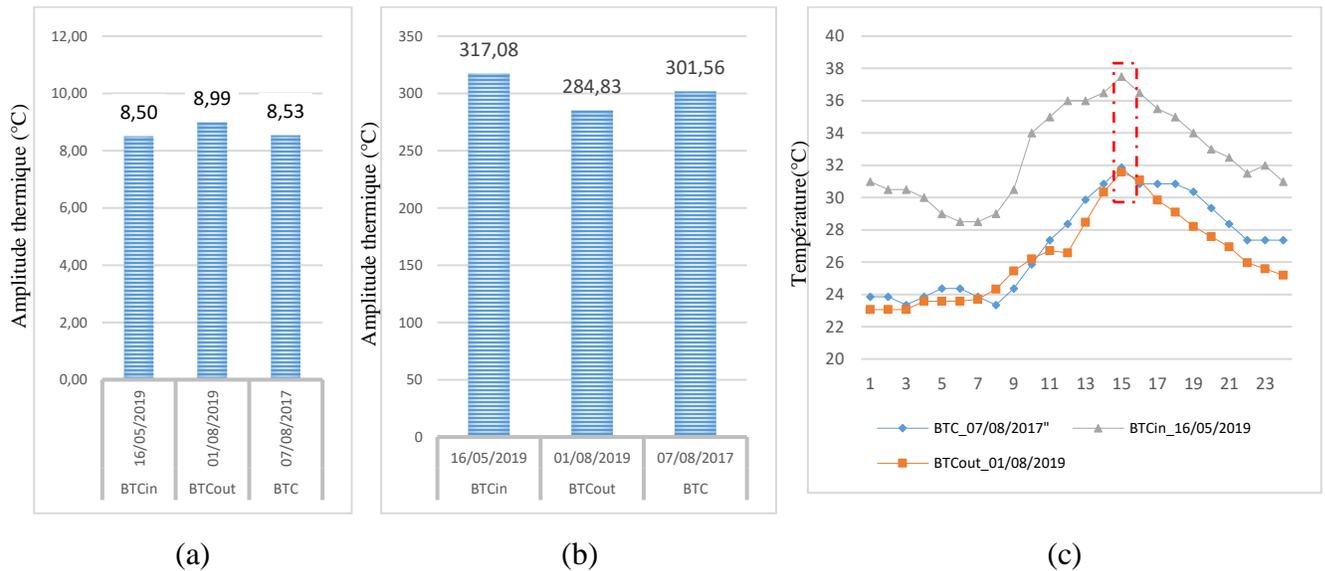


Figure 23: illustration des critères d'évaluation des jours similaires: (a) amplitudes thermique  $< 0.5^{\circ}\text{C}</math>; (b) amplitudes de radiation thermique  $< 50\text{W}/\text{m}^2</math>; (c) le pic horaire$$

## 2. L'impact de la configuration des murs sur le climat intérieur

La Figure 24.a montré les amplitudes thermiques observées à l'intérieur du bâtiment expérimental selon les trois configurations définies plus haut. Sur cette figure, les amplitudes thermiques intérieures sont réduites dans l'ensemble des trois configurations par rapport aux amplitudes extérieures observée à la Figure 23.a. En outre, la Figure 24.b présente le facteur d'amortissement thermique du bâtiment expérimental selon les mêmes configurations définies. Cette figure, montre un faible facteur amortissement dans l'ensemble des trois configurations. Il ressort de ces résultats que les murs disposant d'un isolant thermique présentent une plus basse amplitude thermique et une plus faible facteur d'amortissement que le mur BTC simple. Bien que cette amplitude thermique soit basse dans l'ensemble des configurations, celle de la configuration BTCin est de  $3^{\circ}\text{C}$  alors qu'elle était de  $9^{\circ}\text{C}$  à l'extérieur et celle de la configuration BTCout qui est de  $5^{\circ}\text{C}$  alors qu'elle était de  $9^{\circ}\text{C}$  à l'extérieur.

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

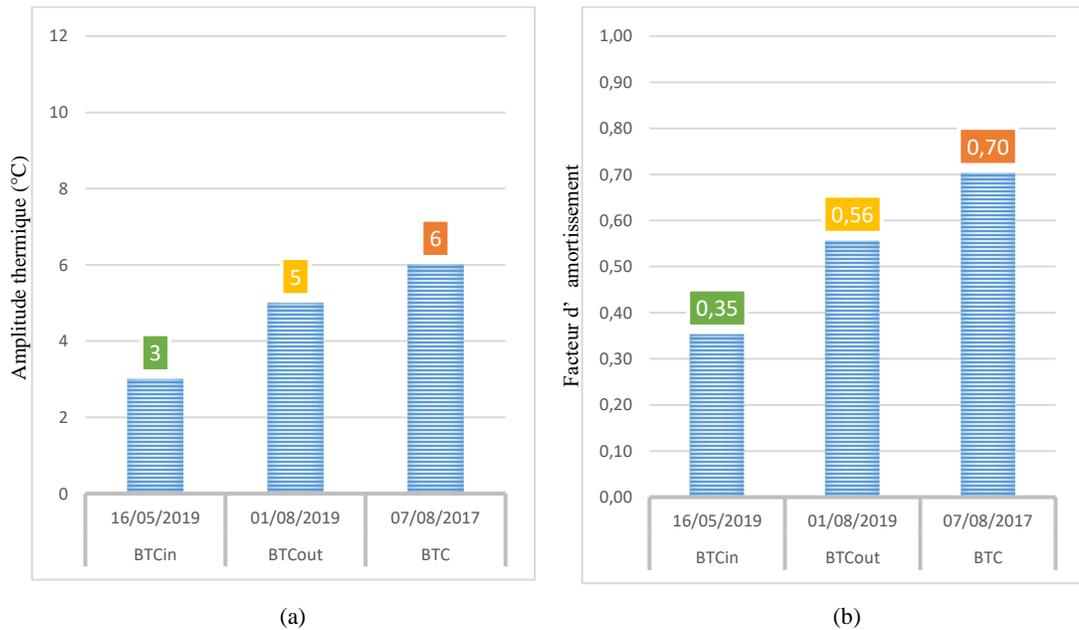


Figure 24: Illustration de l'impact du système de paroi sur le micro-climat intérieur: (a) des amplitudes thermiques dans enceinte du bâtiment et (b) des facteurs d'amortissement observé dans les configurations BTC, BTCin et BTCout

### 3. Impact du mode de ventilation sur le climat intérieur

La *Figure 25* illustre l'impact des stratégies de ventilation (Local Fermé, ventilation Nocturne et continue) sur le climat intérieur du bâtiment expérimental selon les configurations BTC, BTC<sub>in</sub> et BTC<sub>out</sub>. La *Figure 25(a)* montre les amplitudes thermiques de l'air extérieur. Pour chaque stratégie de ventilation, le critère d'une amplitude extérieure < 5°C est respecté. Les jours similaires sont ainsi définis pour chaque stratégie de ventilation. La *Figure 25(b)* présente les amplitudes thermiques de l'air intérieur des jours similaires déterminés. La stratégie du locale fermé présente une faible amplitude thermique intérieure (de 5,98 à 8,33°C) contrairement à la stratégie de la ventilation Nocturne (de 4.48 à 10.04) et de la ventilation continue (10,64 à 12,01) et ce, quelle que soit la configuration adoptée. La configuration BTCin est celle qui présente une faible amplitudes thermique intérieure quelle que soit la stratégie de ventilation. Suivie de la configuration BTCout et BTC.

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
**MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A**  
**VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE**

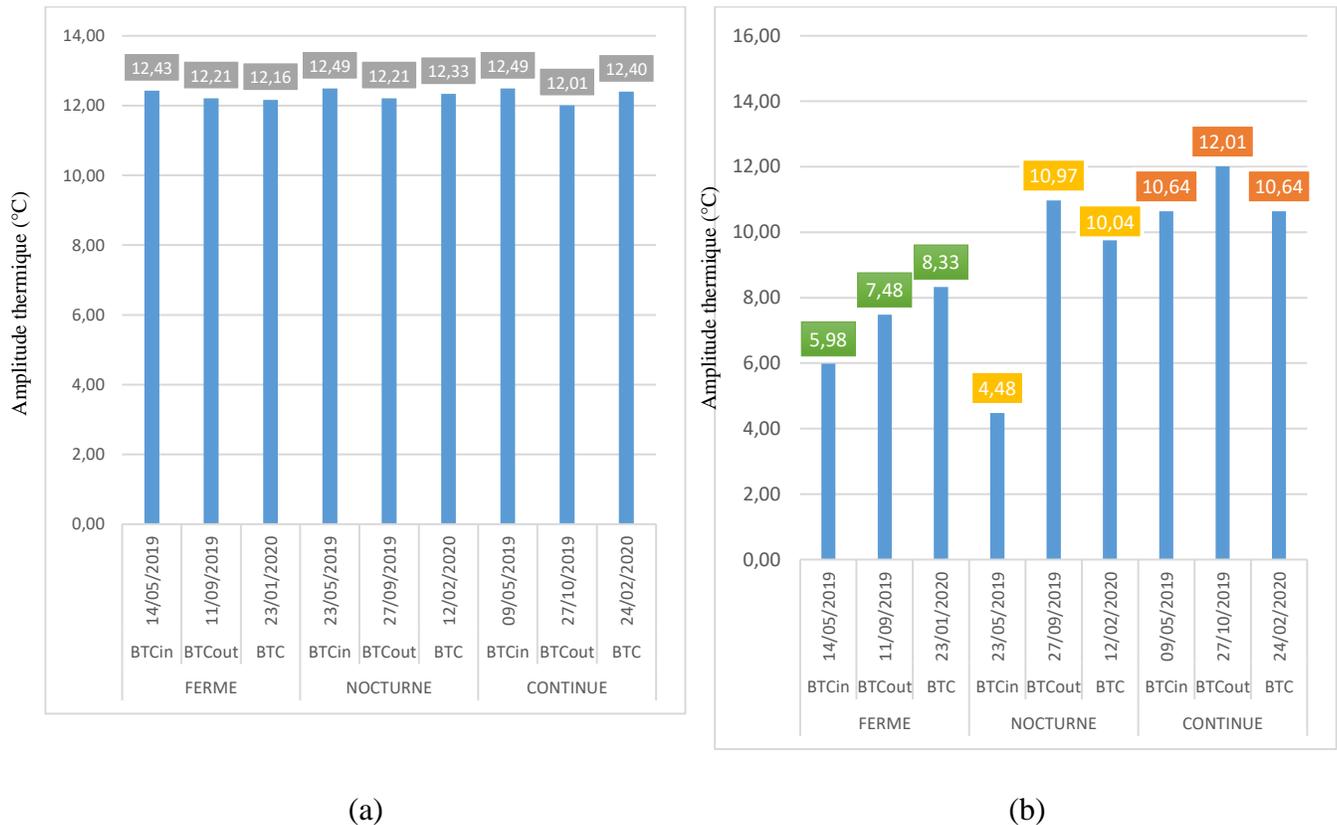


Figure 25: Impact des modes de ventilation sur le climat intérieur des configurations BTC, BTCin et BTCout : (a) l'amplitude thermique extérieure, (b) l'amplitude thermique intérieure

## V. DISCUSSIONS

### 1. Impact de la configuration des murs sur la température intérieure

Les faibles amplitudes thermiques intérieures des parois BTCin et BTCout (à la Figure 24) s'expliquent par la présence de la couche d'isolant. En effet, la paroi multicouche ainsi obtenues par l'ajout de la résistance thermique (la laine de verre) à la paroi en BTC constitue un frein au passage du flux de chaleur extérieur vers l'intérieur du bâtiment.

La position de l'isolant a un impact sur la réduction de ce flux de chaleur. Les meilleures performances thermiques sont obtenues avec la configuration BTCin. Cela s'explique par le faite

que dans la configuration BTCin, la laine de verre placée de l'extérieur, réduit le passage du flux de chaleur issu du rayonnement solaire. La forte inertie thermique de la couche BTC placée du côté intérieur est mise à profit : celle-ci stocke le flux de chaleur excédentaire qui se trouve à l'intérieur du bâtiment, réduisant ainsi l'amplitude de température observée de l'intérieur. On voit ainsi paraître l'effet de l'inertie du BTC sur le comportement thermique intérieur et l'effet d'isolant de la laine de verre vis-à-vis de la forte amplitude thermique extérieure. Par contre dans la configuration BTCout, la BTC stocke le flux extérieur pendant que le flux excédentaire se trouvant à l'intérieur se voit renfermé par la laine de verre. Cet excédent n'ayant pas été absorbé crée cette différence d'amplitude thermique intérieure entre la configuration BTCin et BTCout d'où un faible facteur d'amortissement dans la configuration BTCin par rapport à la configuration BTCout. Pour ce qui est de la configuration BTC, seules les propriétés thermiques de la BTC sont mises à l'épreuve en l'occurrence son inertie thermique : ce qui explique cette réduction observée dans cette configuration et approuve par ailleurs ses performances thermiques.

## 2. Stratégie de ventilation des configurations BTC, BTCin et BTCout

L'impact du refroidissement passif pour l'amélioration du confort intérieur, a été mis en œuvre par l'étude des stratégies de ventilation (fermé, nocturne et continue) illustrée à la Figure 25. Les résultats montrent que, les trois stratégies de ventilation passive du bâtiment ont participé à la réduction de l'amplitude thermique extérieure dans l'enceinte du bâtiment quelle que soit la position de l'isolant thermique (la laine de verre). Cependant la stratégie de la ventilation du local fermé a été celle qui a présenté une bonne réduction du flux de chaleur extérieure. Cela est dû au fait que, le bâtiment étant fermé, crée un système isolé empêchant le flux extérieur majoritairement chaud de pénétrer dans le bâtiment ; Seulement une petite quantité de ce flux est observée à l'intérieur du bâtiment principalement due à la présence de ponts thermiques : le flux de chaleur est directement reçu par l'enveloppe extérieure du bâtiment, qui est exposée au rayonnement solaire, atténuant ainsi de l'intérieure la forte amplitude thermique observée extérieure.

Contrairement à la stratégie du local fermé, la ventilation continue laisse le flux d'air chaud entrer dans le bâtiment par les ouvertures. On assiste a priori à la création d'un micro climat intérieur

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
 MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
 VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

presque semblable à celui de l'extérieur : ce qui explique cette faible variation d'amplitude thermique entre l'intérieur et l'extérieur. Quant à la ventilation nocturne, elle met à profit les températures nocturnes extérieure qui sont généralement basses en soirée. L'air ventilé naturellement à travers les ouvertures, dissipe la chaleur libérée vers le puit de chaleur extérieure de plus basse température et aussi augmente les pertes de chaleur par convection des éléments de masse. Cette dissipation par convection de chaleur de l'élément masse est plus prononcé selon l'emplacement de la masse thermique des parois multicouche : ce qui traduit cette forte régression de la température dans la configuration CEBin. Il en ressort par ailleurs que les meilleures réponses thermiques ont été obtenu avec la configuration CEBin, suivi de la configuration CEBout et CEB.

En somme, la conception des parois a une influence considérable sur le comportement énergétique du bâtiment. En d'autres termes, les propriétés des matériaux et la façon dont ils sont agencés définissent l'ambiance thermique qu'il aura dans l'enceinte du bâtiment. De plus le mode de refroidissement passif est à privilégier afin de réduire au maximum les amplitudes thermiques intérieures. A cet effet, il ressort de cette étude, la *figure 26* qui résumé l'efficacité de la configuration des parois des murs selon le mode de ventilation naturelle adoptée.

		Ventilation Passive		
		Fermé	Continue	Nocturne
Configuration des Murs	CEB	+	+	++
	CEBin	+++	+	+++
	CEBout	++	+	++

Figure 26: L'efficacité de la configuration des parois des murs selon le mode de ventilation adoptée

- + Acceptable
- ++ Moyenne
- +++ Bonne

## CONCLUSION GENERALE

---

Dans la démarche visant à l'amélioration du confort dans les climats chauds, il est primordial de valoriser les méthodes de construction ancestrale à base de Terre. Elles nous renseignent sur les solutions permettant d'établir un microclimat confortable pour les usagers, en utilisant des ressources locales (la terre). Elles sont le fruit d'un développement réalisé sur plusieurs générations et basé sur l'expérience et la correction des erreurs passées. Ceci dit, dans l'objectif d'améliorer le climat intérieur des bâtiments en climat chaud par le biais de la conception des murs, 3 types de parois ont fait l'objet d'une étude expérimentale. Il s'est agi d'évaluer la performance thermique de (i) la paroi simple en BTC, (ii) de celle composée d'une couche BTC à l'extérieure et de l'isolant à l'intérieur ( $BTC_{out}$ ) et (iii) de celle composée d'une couche BTC à l'intérieur et de l'isolant à l'extérieure ( $BTC_{in}$ ). Pour améliorer d'avantage ce microclimat intérieur, des stratégies de ventilation ont été également étudié notamment la ventilation continue, nocturne et le local fermé.

À l'issu de cette étude nous pouvons dire que le choix du matériau constituants les parois du bâtiment, la configuration de l'isolant thermique et aussi le mode de ventilation adopté impacte significativement sur le microclimat intérieur des bâtiments. Les résultats de ces travaux de recherche menés montrent que : (i) *la masse thermique (BTC) est une opportunité de stocker la surchauffe pendant la journée ; (ii) l'associer à un isolant thermique ( laine de verre) réduit considérablement l'amplitude thermique extérieure dans l'enceinte du bâtiment et la configuration CEBin est à privilégier ; (iii) parmi les méthodes de refroidissement passive étudiés (ventilation Nocturne, Continue et local Fermé) , celui de la stratégie du local Fermé réduit considérablement le flux de chaleur extérieure, s'ensuit la stratégie de la ventilation nocturne et continue. Ce qui est bien conforme à l'étude menée par simulation de l'auteur (Hema, et al., 2020).*

Cependant étant dans un pays tropical chaud, la ventilation nocturne sera fortement recommandée afin de crée un renouvellement d'air frais durant la soirée pour maintenir une ambiance intérieur saine, évacuer correctement la vapeur d'eau générée par les occupants et aussi éviter les problèmes d'odeurs. La ventilation continue sera fortement déconseillée en journée, et surtout pendant les moments de pics (Mars, Avril et Mai).

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

En somme, nous affirmons que la conception des murs dans les bâtiments à ventilation naturelle construits en Brique de Terre Comprimée (BTC) contribue à la minimisation de l'inconfort thermique en climat tropical sec.

Comme recommandation, nous suggérons pour de prochaine étude de faire une isolation parfaite de la toiture et du faux plafond afin de faire une analyse pertinente du comportement du mur. de faire une analyse numérique par ( simulation ) et une expérimentation d'autres types de configuration de parois: notamment celle visant à faire varier l'épaisseur du mur en BTC et en mettant en œuvre configuration sandwich ( celle visant à mettre la BTC entre deux résistance thermique)

---

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- Abdesselam** Une nouvelle Approche de la conception climatique des batiments. Liaison Energies Francophones N°42 [Rapport]. - 1999.
- Aimé YAO Franck** Exploration du potentiel hygroscopique des briques de terre comprimée (BTC) pour l'amélioration du confort [Rapport]. - 2019.
- Ajibola K** Ventilation of spaces in a warm-humid climate-case study of some housing types [Livre]. - 1997.
- Alain Liebard et ANDRE** Architecture et urbanisme bioclimatique [Livre]. - 1996.
- ASHRAE** . - 2004.
- Bareau H.** Améliorez le confort de votre maison, l'isolation thermique Habitat individuel [Livre]. - 2008.
- Bekkouche S M A et Benouaz T** Influence de l'isolation thermique interieure et exterieure d'un batiment en pierre situee à Ghardaïa [Rapport]. - 2009.
- Boffoue M O, Kouakou C H et Kouadio K C** Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée. - 2015.
- Chabane Chaouche Koceila et CHIOUB Lyliya** Amélioration du confort thermique par la résolution des ponts thermiques dans l'habitat individuel. Cas d'une maison à Bouira [Rapport]. - 2017.
- Chahwane Layal** Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique [Rapport]. - 2011.
- Champire Florian** Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction [Livre]. - 2018.
- Coach Helma** Chapitre 4: Bioclimatisme in vernacular architecture."Renewable and Sustainable Energy Reviews 2 " [Rapport]. - 1998.
- Costa Roberto** Architecture in black Africa Between development and tradition [Livre]. - 1989.
- Dewulf Michel** Le torchis, mode d'emploi [Livre]. - 2015.
- Fanger P.O. [et al.]** Comfort limits for asymmetric thermal radiation [Livre]. - 1985.
- Gagge A.P., Stolwijk J.A.J et Hardy J.D** Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures [Livre]. - 1967.

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

- Geetha N B et Velraj R** Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage [Livre]. - 2012.
- Givoni Baruch** Comfort, climate analysis and building design guidelines [Livre]. - 1992.
- Guillaud H et Houben H** Traité de la Construction en terre ( Craterre) [Livre]. - 2006.
- Hamid A et Sadi A** Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'une Maison Solaire Passive Destinée pour les Régions Sud de l'Algérie [Rapport]. - 1998.
- Hema Césaire [et al.]** Impact of the design of walls made of compressed earth blocks on the thermal comfort of housing in hot climat [Livre]. - 2020.
- Houben Hugo et BOUBEKEUR S.** Blocs de terre comprimée et normes [Livre]. - 2014.
- Huovila P. [et al.]** Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers. United Nations Environment Programme [Rapport]. - 2007.
- Janda Kathryn B et John F Busch** Worldwide status of energy standards for buildings [Livre]. - 1994.
- Jannot Y et Djako T** Economie d'nergie et confort thermique dans l'habitat en zone [Rapport]. - 1993.
- Jean Desmons** Aide-mémoire génie climatique [Rapport]. - 2009.
- Jean et Faurastier** Domotique et confort un état des lieux [Rapport]. - 1962.
- KEN PARSONS** Human thermal environment [Livre]. - 2003.
- Kisanga Aida U** The challenge faced by the building materials industries in the developing countries in the 1990s : with special reference to Tanzania [Livre]. - 1990.
- Kitio Vincent** Les leviers d'actions et les initiatives en cours sur le continent africain [Revue]. - 2015. - p. 20.
- Leduc G [et al.]** Human radiative exchanges in a complex enclosure determination of active surfaces [Livre].
- Madi Kaboré** Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en afrique sub-saharienne [Livre]. - 2015.
- MEUKAN** Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments. - 2004.
- Millogo Y et Morel J C Y.** Millogo, J.-C. Morel, Microstructural characterization and mechanical

properties of cement stabilised adobes. - 2012.

**Moriaty Patrick** The case for traditional housing in tropical Africa [Livre]. - 1979.

**Moujalled Bassam** Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés [Livre]. - 2007.

**Munaretto Fabio** Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments [Livre]. - 2014.

**Nicol J F et Humphreys M A** Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings [Livre]. - 2002.

**Nshimiyimanan Philbert** Physico-Mechanical and Hygro-Thermal Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders. - 2020.

**Olgav V** Design with climate [Livre]. - 1963.

**on human settlement United Nations Commission** Building materials for housing : Report of the executive director, United Nations Commission on Human Settlements [Rapport]. - 1993.

**Ouagadougou LOCOMAT** Matériaux de construction : Quelles alternatives face à la dévaluation?. - 1994.

**Ouedraogo Emmanuel** Détermination des données climatiques de bases et caractérisation des blocs de terre comprimée pour l'étude du confort thermique dans le bâtiment en climat tropical sec. - 2015.

**P13-901 XP** Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions – Spécifications – Méthodes d'essais – Conditions de réception. - 2001.

**Paulus Jehanne** CONSTRUCTION EN TERRE CRUE: Dispositions qualitatives, constructives et architecturales-Application à un cas pratique:Ouagadougou [Livre]. - 2014-2015.

**Pittet D. et Kotak T.** Environmental impact of building technologies, a comparative study in Kutch District [Rapport]. - 2009.

**P'KLA Abalo** Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : Application aux maçonneries "BTC-Mortier terre. - 2002.

Rénover et construire en pisé [Livre]. - Sébastien Moriset et arnaud Misse.

**Saidi [et al.]** Etude numérique du comportement thermique de brique de terre stabilisée [Rapport]. - 2016.

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

**Sore Seick Omar** Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. - 2018.

**Sorgho Brahma** Brahma SORGHO, Caractérisation et valorisation de quelques argiles du Burkina Faso : application au traitement des eaux et aux géomatériaux de construction. - 2013.

**U.Wyss** La construction en " matériaux locaux": état d'un secteur à potentiel multiple [Rapport]. - 2005.

## ANNEXES

---

### ANNEXE 1 : Vérification de l'impact de la sensibilité de 0.5°C pour température et de 50 W/m<sup>2</sup> pour la radiation

---

Après avoir déterminé les jours où la sensibilité était respectivement pour la température et de l'humidité de 0.5°C et de 50W/m<sup>2</sup>, l'analyse de l'impact de cette sensibilité sur la température interne de la maison sera effectuée. Pour cela nous avons utilisé le logiciel *Wufi plus* , afin de simuler la température dans l'enceinte de notre bâtiment. Le bâtiment a été modélisé conformément aux dimensions réelles et aux différentes propriétés des matériaux utilisés pour la construction. Avant la stimulation nous avons émis certaines hypothèses, à savoir :

- Le bâtiment pilote est en évolution libre c'est-à-dire sans systèmes de ventilation mécanique ;
- Il n'y a pas d'apports énergétiques internes dans les différentes zones thermiques ;
- Les portes et les fenêtres du bâtiment sont toujours fermées.

Comme valeur d'entrée, les données de la température extérieure et la radiation thermique qui respectaient nos hypothèses de base ont été utilisé. Sur ces données, la loi de répartition moyenne a été utilisée pour les 0.5°C sur températures d'entrée et les 50w/m<sup>2</sup> sur les radiations thermiques à un pas de temps de 1h. Après répartition, ces données ont été utilisé par le simulateur Wufi Plus, pour générer numériquement les températures intérieures.

RADIATION (W/m <sup>2</sup> )		
Globale	Direct	Diffus
50	40	10
50	30	20
50	20	30
50	10	40
50	0	50

Tableau 9: stratégie de répartition des radiations thermiques

#### Résultat et

#### Discussion

Les résultats des températures simulés numériquement par le logiciel Wufi Plus nous a permis

---

---

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---

d'obtenir les températures intérieures dans le bâtiment. Avec ces résultats, le tracé des courbes (voir Figure 26) traduisant l'évolution de la température intérieure pendant une durée de 24h a été effectué. Ceux-ci afin de voir l'impact de la sensibilité de  $0.5^{\circ}\text{C}$  pour la température et de  $50\text{ W/m}^2$  pour la radiation sur le micro-climat intérieur. Le graphique de la Figure 26, indique une superposition de toutes les températures intérieures. En effet ce graphique, met en évidence la variation de l'impact de la sensibilité de  $0.5^{\circ}\text{C}$  pour la température et de  $50\text{ W/m}^2$  pour la radiation sur la température intérieure en considérant les stratégies définies plus haut. L'impact maximal de la sensibilité de  $0.5^{\circ}\text{C}$  pour la température et de  $50\text{ W/m}^2$  pour la radiation est d'ordre de  $0.06^{\circ}\text{C}$ . : ceux-ci impacte très faiblement la température intérieure donc négligeable.

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
**MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A**  
**VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE**

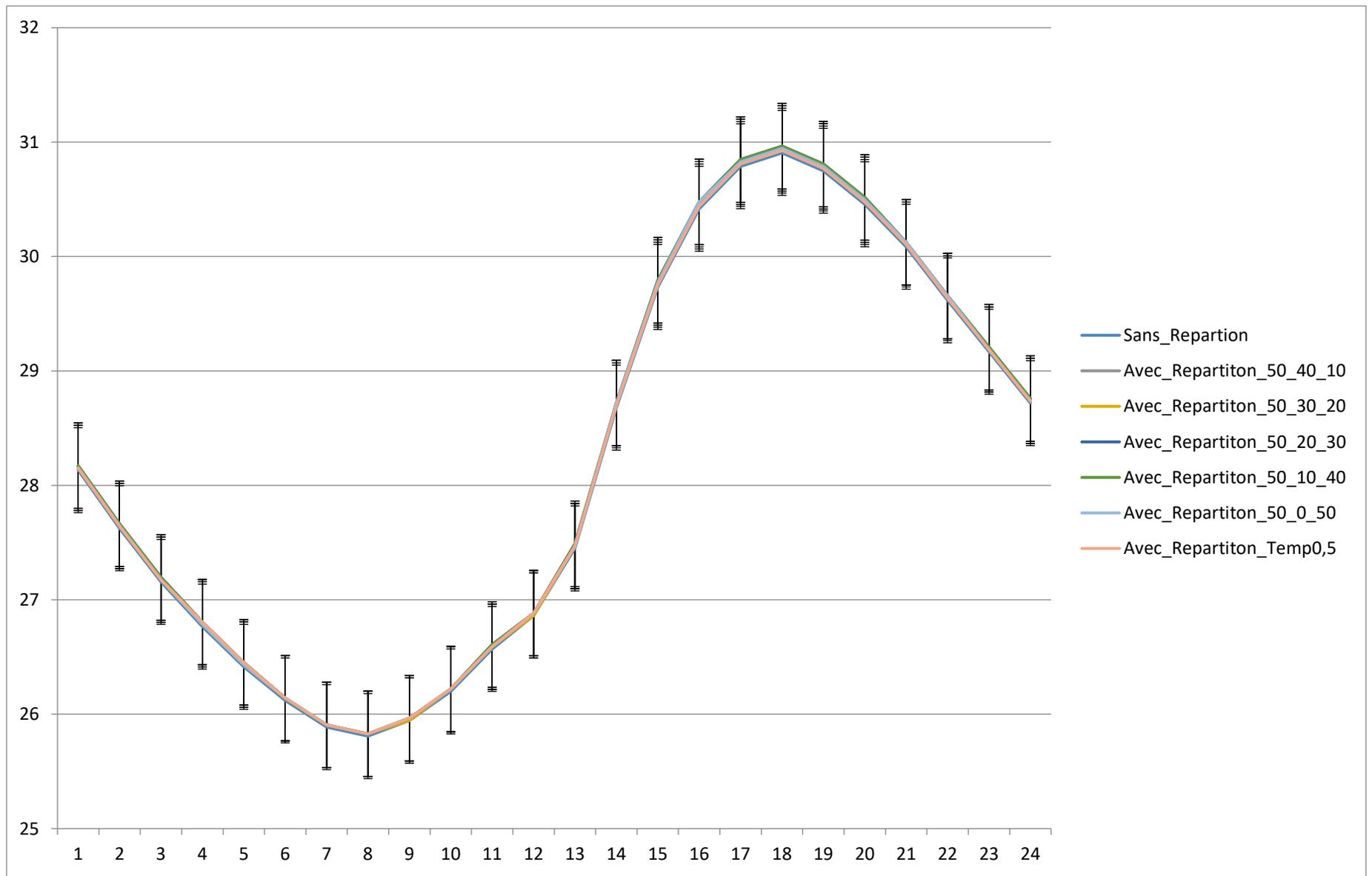


Figure 27: évolution de la température intérieure après simulation

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
**MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A**  
**VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE**

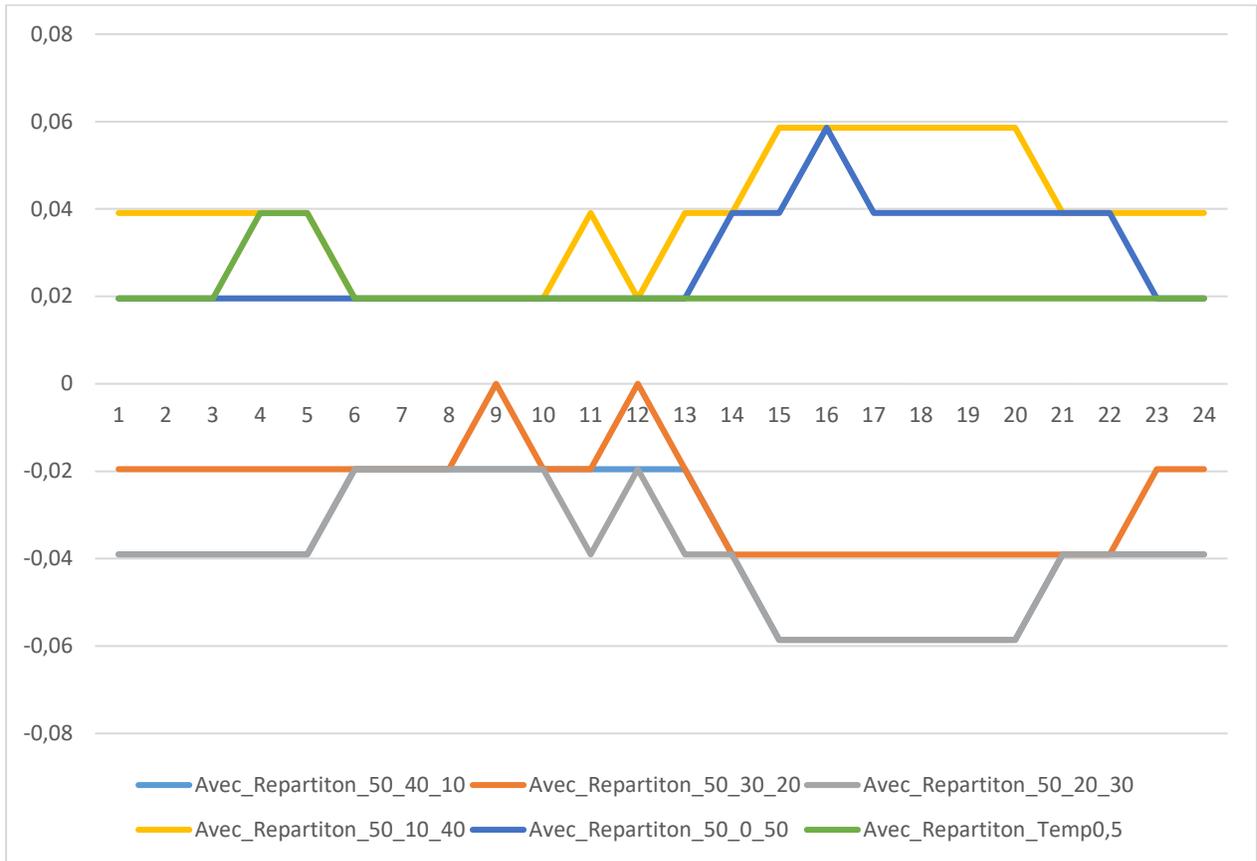


Figure 28: Analyse de la sensibilité des températures intérieures sans répartition et celle avec répartition de 0,5°C et de 50W/m<sup>2</sup>

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
**MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A**  
**VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE**

RESULTATS DES TEMPERATURES INTERIEURES APRES SIMULATION							
HEURES	Sans_Rep artition	Avec_Repar titon_50_40 _10	Avec_Repar titon_50_30 _20	Avec_Repar titon_50_20 _30	Avec_Repar titon_50_10 _40	Avec_Repar titon_50_0 _50	Avec_Repar titon_Temp 0,5
00:00:00	28,13	28,17	28,15	28,17	28,17	28,15	28,15
01:00:00	27,63	27,66	27,64	27,66	27,66	27,64	27,64
02:00:00	27,16	27,20	27,18	27,20	27,20	27,18	27,18
03:00:00	26,77	26,80	26,79	26,80	26,80	26,79	26,80
04:00:00	26,41	26,45	26,43	26,45	26,45	26,43	26,45
05:00:00	26,12	26,14	26,14	26,14	26,14	26,14	26,14
06:00:00	25,89	25,91	25,91	25,91	25,91	25,91	25,91
07:00:00	25,81	25,83	25,83	25,83	25,83	25,83	25,83
08:00:00	25,95	25,96	25,95	25,96	25,96	25,96	25,96
09:00:00	26,20	26,22	26,22	26,22	26,22	26,22	26,22
10:00:00	26,57	26,59	26,59	26,61	26,61	26,59	26,59
11:00:00	26,86	26,88	26,86	26,88	26,88	26,88	26,88
12:00:00	27,45	27,47	27,47	27,49	27,49	27,47	27,47
13:00:00	28,68	28,72	28,72	28,72	28,72	28,72	28,70
14:00:00	29,73	29,79	29,77	29,79	29,79	29,77	29,75
15:00:00	30,42	30,48	30,46	30,48	30,48	30,48	30,44
16:00:00	30,79	30,85	30,83	30,85	30,85	30,83	30,81
17:00:00	30,91	30,96	30,95	30,96	30,96	30,95	30,93
18:00:00	30,75	30,81	30,79	30,81	30,81	30,79	30,77
19:00:00	30,46	30,52	30,50	30,52	30,52	30,50	30,48
20:00:00	30,09	30,13	30,13	30,13	30,13	30,13	30,11
21:00:00	29,62	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,64
22:00:00	29,17	29,21	29,19	29,21	29,21	29,19	29,19
23:00:00	28,72	28,76	28,74	28,76	28,76	28,74	28,74

Tableau 10: Résultats des températures intérieures après simulation par wufi plus

**CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :**  
**MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A**  
**VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE**

SENSIBILITE DE LA TEMPERATURE INTERIEURE OBTENUES						
HEURES	Avec_Reparti ton_50_40_1 0	Avec_Reparti ton_50_30_2 0	Avec_Reparti ton_50_20_3 0	Avec_Reparti ton_50_10_4 0	Avec_Repart iton_50_0_5 0	Avec_Repart iton_Temp0, 5
00:00:00	-0,039	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,020
01:00:00	-0,039	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,020
02:00:00	-0,039	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,020
03:00:00	-0,039	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,039
04:00:00	-0,039	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,039
05:00:00	-0,020	-0,020	-0,020	0,020	0,020	0,020
06:00:00	-0,020	-0,020	-0,020	0,020	0,020	0,020
07:00:00	-0,020	-0,020	-0,020	0,020	0,020	0,020
08:00:00	-0,020	0,000	-0,020	0,020	0,020	0,020
09:00:00	-0,020	-0,020	-0,020	0,020	0,020	0,020
10:00:00	-0,020	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,020
11:00:00	-0,020	0,000	-0,020	0,020	0,020	0,020
12:00:00	-0,020	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,020
13:00:00	-0,039	-0,039	-0,039	0,039	0,039	0,020
14:00:00	-0,059	-0,039	-0,059	0,059	0,039	0,020
15:00:00	-0,059	-0,039	-0,059	0,059	0,059	0,020
16:00:00	-0,059	-0,039	-0,059	0,059	0,039	0,020
17:00:00	-0,059	-0,039	-0,059	0,059	0,039	0,020
18:00:00	-0,059	-0,039	-0,059	0,059	0,039	0,020
19:00:00	-0,059	-0,039	-0,059	0,059	0,039	0,020
20:00:00	-0,039	-0,039	-0,039	0,039	0,039	0,020
21:00:00	-0,039	-0,039	-0,039	0,039	0,039	0,020
22:00:00	-0,039	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,020
23:00:00	-0,039	-0,020	-0,039	0,039	0,020	0,020

*Tableau 11: sensibilité de la température intérieure obtenues*

CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

ANNEXE 2 : LA FICHE TECHNIQUE DES THERMO-PUCES



TRACABILITE ET METROLOGIE  
TRACEABILITY METROLOGY

Ce certificat comprend : 4 page(s) et 0 annexe(s)  
*This certificate includes:*  
Édité le : 06/11/2018  
*Issued on:*

Siège social  
3 Rue Pierre Brossolette  
32000 AUCH  
Tél. +33 5 62 60 05 93  
Fax. +33 5 62 63 46 10

**CERTIFICAT D'ETALONNAGE**  
*CALIBRATION CERTIFICATE*

N° CE 2018 11 6 TG046 0000003A7E1521

Laboratoire d'étalonnage : **Waranet Solutions**  
*Calibration laboratory:*

Déjà à : **ZIE**  
*Issued for:* L'INSTITUT ZIE LEMHAD  
Rue de la Science  
01 BP594 Ouagadougou 01  
Burkina Faso

Date(s) d'étalonnage : **02/11/2018**  
*Calibration date(s):*

**Instrument Étaloné :**  
*Calibrated Instrument:*

Désignation : **Thermopuce**  
*Designation:*

Identification Client : **TG046**  
*Customer designation:*

Modèle : **TG**  
*Type:*

Constructeur : **Waranet Solutions**  
*Manufacturer:*

Numéro de série : **0000003A7E1521**  
*Serial number:*

Logiciel : **Warito II v6.0.2**  
*Software:*

RESPONSABLE DE L'ETALONNAGE  
RESPONSIBLE FOR THE CALIBRATION  
**Elise MARRAS**

La reproduction de ce certificat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral.  
*The reproduction of this certificate is only allowed under integral photographic facsimile form.*

Tous les résultats du présent document se rapportent uniquement à l'objet soumis à l'essai ou à l'étalonnage.  
*All results of this document refer only to the object under test or calibration.*

Ce certificat est conforme aux recommandations de la norme NF EN ISO/CEI 17025.  
*This document complies to the recommendations of the NF EN ISO/CEI 17025 standard.*

---

---

CONCEPTION DES MURS EN CLIMAT CHAUD ET SEC :  
MINIMISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS A  
VENTILATION NATURELLE CONSTRUITS EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE

---

---



**CERTIFICAT D'ETALONNAGE**  
*CALIBRATION CERTIFICATE*

**N° CE 2018 11 6 TG046 000003A7E1521**

**Condition d'étalonnage :**

*Calibration condition:*

**Lieu d'étalonnage :** Laboratoire de Métrologie WARANET SOLUTIONS  
*Calibration location:* ZA Hippodrome  
3 rue Pierre Brossolette  
32000 AUCH  
France

**Date(s) d'étalonnage :** 02/11/2018  
*Calibration date(s):*

**Condition ambiantes :** 23°C ± 5°C  
*Ambient conditions:*

**Caractéristiques de la chaîne de mesure étalonnée :**

*Features of the measuring chain submitted to a calibration:*

<b>Désignation :</b>	Thermopuce	<b>Identification Client :</b>	TG046
<i>Designation:</i>		<i>Customer designation:</i>	
<b>Modèle :</b>	TG	<b>Constructeur :</b>	Waranet Solutions
<i>Type:</i>		<i>Manufacturer:</i>	
<b>Numéro de série :</b>	000003A7E1521	<b>Logiciel :</b>	Warito II v6.0.2
<i>Serial number:</i>		<i>Software:</i>	
<b>Plage de fonctionnement :</b>	[-40 ; +85] °C	<b>Résolution :</b>	0.5 °C
<i>Operative range:</i>		<i>Resolution:</i>	
<b>Période d'acquisition :</b>	1 min	<b>Longueur sonde :</b>	6 mm
<i>Acquisition time:</i>		<i>Probe length:</i>	
<b>Diamètre sonde :</b>	17.5 mm		
<i>Probe diameter:</i>			

**Objet de l'étalonnage :**

*Calibration purpose:*

L'étalonnage a pour but de déterminer la correction à appliquer à la lecture de la chaîne de mesure, en différentes valeurs du paramètre physique étalonné.

*The calibration aims at determining the correction to be applied to the value provided by the measuring chain, at different values of the physical parameter calibrated.*

**Procédure d'étalonnage :**

*Calibration procedure:*

L'étalonnage de la chaîne de mesure est réalisé par comparaison à un étalon de référence (Voir page 3 : Etalon de référence). L'étalonnage est effectué dans des milieux d'étalonnage, fluide et/ou aérien, en fonction de l'instrument étalonné (Voir page 3 : Milieux d'étalonnage).

*The calibration of the measuring chain is carried out by comparison to a reference standard (See page 3 : Reference standard). The calibration is realized inside medium reference, in fluid and/or in air, depending on the calibrated instrument (See page 3 : Medium reference).*

**Nom de la procédure :** PR2-PR-05 - Manipulation d'étalonnage

*Name of the procedure:*

Tous les instruments à sonde externe sont placés dans les conditions atmosphériques du laboratoire, au moins 1h avant l'étalonnage.

*All instruments with external probe are placed in the laboratory ambient conditions, at least 1h before calibration operations.*

Toutes les données, des étalons utilisés et de l'instrument étalonné, sont conservées dans un fichier unique, dans le dossier client dédié, au sein du laboratoire.

*All the values, from reference standard and the calibrated instrument, are saved in a single file, in your customer folder in the laboratory.*