



**IMPACT DES SYSTEMES DE PAROIS MULTICOUCHES MASSE ET  
RESISTANCE THERMIQUE A BASE DE BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE  
SUR LE CONFORT THERMIQUE DE L'HABITAT EN CLIMAT CHAUD**

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

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

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 03 Juillet 2019 par

**Bossobèdou Stéphane SANGAM (20160016)**

**Directeur de mémoire :** Dr. Adamah MESSAN, Maitre de conférences 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 stage :

Président : Dr BABAKAR LAYE

Membres et correcteurs : Mr Gnenakantanhan COULIBALY  
Mr Arnaud OUEDRAOGO

**Promotion [2018/2019]**

---

## DEDICACE

---

Je dédie ce mémoire de fin d'étude :

- A mon Dieu Tout-Puissant qui n'a cessé de m'accorder sa grâce et sa bénédiction ;
- A mon père qui a cru à ma bonne volonté en m'offrant cette formation de Master à 2iE ;
- A ma mère qui n'a cessé de me soutenir par ses prières et ses conseils ;
- A mes oncles qui n'ont cessé de m'encourager durant ma formation ;
- A mes frères et sœurs pour leurs prières à mon égard.

---

## CITATION

---

*« Il est utile de répéter que le rôle premier d'un bâtiment est d'assurer à ses occupants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La qualité architecturale participe, à notre avis, aux conditions de confort ou réciproquement, le confort offert par un bâtiment est l'un des aspects de son architecture »*

**Roulet Caude Alain**

---

## REMERCIEMENTS

---

Il est incontestable que ce manuscrit n'aurait pu voir le jour sans le soutien et l'accompagnement de nombreuses personnes, qui malgré leurs multiples occupations, n'ont ménagé aucun effort pour m'apporter leur appui.

Qu'il me soit permis de remercier particulièrement :

- La Direction Générale de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à travers son personnel, pour leur engagement dans la réussite de notre formation ;
- Mon directeur de mémoire, le responsable du LEMHaD, Professeur Adamah MESSAN.

Je souhaite lui exprimer ma profonde gratitude pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire et encadré tout au long de ce stage ;

- Mon encadreur Mr HEMA Cesaire qui m'a suivi tout au long de ce stage, Merci pour les nombreux conseils, de votre accueil chaleureux et de votre disponibilité ;
- Un grand merci à Mr Salifou KABORE pour son accueil au sein du laboratoire ;
- L'ensemble du corps enseignant du 2iE pour les connaissances transmises au cours de la formation du cycle de master ;
- Je remercie chaleureusement mes compagnons de laboratoire ;
- Ma famille pour son soutien autant moral que financier ;
- Mes camarades de promotion.

---

## RESUME

---

L'utilisation des matériaux classiques tel que le parpaing de ciment pour la construction des murs est le plus utilisé au Burkina Faso. Accessible en minorité à la population, le parpaing présente un certain nombre de désavantages en matière de confort thermique.

Dans le but de promouvoir le développement des habitats au Burkina Faso l'utilisation des matériaux locaux à base de terre tel que la Brique de Terre Comprimée (BTC) s'avère être une alternative envisageable pour l'amélioration du confort thermique de l'habitat en climat chaud. C'est dans cette lancée que s'inscrit ce projet de recherche mené par le Laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable de 2iE.

Pour atteindre l'objectif qui est d'améliorer le confort thermique, une étude expérimentale a été réalisée sur un bâtiment pilote en BTC situé dans l'enceinte de 2iE qui consiste à instrumenter dans un premier temps le bâtiment seul, ensuite dans un second temps à associer une résistance thermique (isolant) externe au bâtiment en BTC avec des capteurs pour mesurer la température interne et externe. Durant l'étude expérimentale effectuée avec l'ajout de la résistance thermique au BTC nous avons adopté trois stratégies dont le but est d'améliorer le confort thermique et la qualité de l'air afin de réduire le transfert de chaleur émis par les rayons solaires dans le bâtiment. Outre cette expérience nous avons aussi déterminer l'absorption solaire du parpaing et du BTC.

Les différents résultats obtenus de notre étude ont montré que l'utilisation d'un isolant en ajout à la paroi BTC réduit la température à l'intérieur d'un bâtiment. Egalement, nous avons remarqué que la stratégie de fermeture du local permet une amélioration du confort thermique. L'analyse du flux qui passe à travers nos différentes parois nous a permis également de remarquer que la paroi Nord fait passer moins de flux de chaleur dans notre bâtiment pilote. Par ailleurs les résultats obtenus de l'absorption solaire ont montré que les valeurs calculées sont assez proche des données de la littérature.

### **Mots clés :**

- Parpaing
- BTC
- Résistance thermique
- Confort thermique
- Absorption solaire

---

## ABSTRACT

---

The use of traditional materials such as cement block for wall construction is the most common in Burkina Faso. Accessible in minority to the population, the breeze block has a number of disadvantages in terms of thermal comfort.

In order to promote habitat development in Burkina Faso, the use of local earth-based materials such as compressed earth brick (BTC) is a possible alternative for improving the thermal comfort of the habitat in a warm climate. This research project led by 2iE's Eco-materials and Sustainable Housing Laboratory is part of this momentum.

To achieve the objective of improving thermal comfort, an experimental study was carried out on a BTC pilot building located in the 2iE enclosure, which consists in first instrumenting the building alone, then in a second step of associating an external thermal resistance (insulation) to the BTC building with sensors to measure the internal and external temperature. During the experimental study conducted with the addition of thermal resistance to the BTC, we adopted three strategies aimed at improving thermal comfort and air quality in order to reduce the heat transfer emitted by solar radiation in the building. In addition to this experience we also determined the solar absorption of the breeze block and BTC.

The various results obtained from our study showed that the use of insulation in addition to the BTC wall reduces the temperature inside a building. We also noticed that the strategy of closing the room allows for an improvement in thermal comfort. The analysis of the flow that passes through our different walls also allowed us to notice that the North wall allow less heat to pass through our pilot building. In addition, the results obtained from solar absorption showed that the calculated values are quite close to the data in the literature.

### **Keywords :**

- Cinder block
- BTC
- Thermal resistance
- Thermal comfort
- Solar absorption

---

## LISTES DES ABRÉVIATIONS

---

**2IE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

**ASHRAE** : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

**BTC** : Brique de Terre Comprimée

**EIER** : École d'Ingénieurs de l'Équipement Rural

**ISO** : Organisation Internationale de normalisation

**LEMHaD** : Laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable

**PMV** : Vote Moyen Prévisible

**PPD** : Pourcentage Prévu des insatisfaits

---

## SOMMAIRE

---

<b>DEDICACE</b>	<b>i</b>
<b>CITATION</b>	<b>ii</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>iii</b>
<b>RESUME</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>v</b>
<b>LISTES DES ABRÉVIATIONS</b>	<b>vi</b>
<b>SOMMAIRE</b>	<b>2</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>3</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>6</b>
<b>1 Etat de l'art des matériaux de construction et notion de confort thermique</b>	<b>7</b>
1.1 Les différentes techniques de construction en terre . . . . .	7
1.1.1 Parois en terre monolithique . . . . .	8
1.1.2 Parois en terre multicouches . . . . .	14
1.2 Les différentes méthodes d'isolation thermique dans le bâtiment . . . . .	16
1.2.1 Les isolants conventionnels . . . . .	17
1.2.2 Les isolants non conventionnels . . . . .	18
1.3 Enjeux pour le confort thermique . . . . .	21
1.3.1 Le confort thermique . . . . .	21
1.3.2 Enjeux thermique . . . . .	24

<b>2 Etude expérimentale</b>	<b>26</b>
2.1 Descriptif de l'expérimentation . . . . .	26
2.1.1 Bâtiment expérimental . . . . .	26
2.1.2 Environnement climatique . . . . .	27
2.1.3 Instrumentation . . . . .	30
2.2 Expression du flux de chaleur . . . . .	31
2.2.1 Notion de transfert de chaleur . . . . .	31
2.2.2 Détermination du flux intérieur . . . . .	32
<b>3 Résultats et discussions</b>	<b>34</b>
3.1 Comparaison entre le BTC et l'isolant extérieur + BTC . . . . .	34
3.2 Stratégies de l'isolant extérieur + BTC . . . . .	35
3.3 Flux entrant . . . . .	36
3.4 Absorptivité solaire . . . . .	37
<b>CONCLUSION</b>	<b>38</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>41</b>

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

1.1	caractéristique des isolants . . . . .	21
3.1	Gain de chaleur . . . . .	36
3.2	coefficient d'absorption . . . . .	37
3.3	Valeurs de la matrice de transfert . . . . .	48
3.4	Détermmination de I pour le calcul de l'absorptivité solaire du 17 Mai 2019 . . . . .	51
3.5	Valeurs de $\alpha$ par défaut pour les parois opaques . . . . .	52
3.6	Calcul de l'absorptivité . . . . .	52

---

## LISTE DES FIGURES

---

1.1	Les différents techniques de construction en terre par CRATERRE (Source : <a href="http://www.torchis-terrecreue.fr">http://www.torchis-terrecreue.fr</a> ) . . . . .	8
1.2	Technique de construction en adobes; (a) :Confection des murs en adobes dans les moules; (b) :Fondation d'un mur en adobe; (c) :Construction en adobe à Djene(Mali); (d) :Construction de bâtiments en adobes par la technique de la voûte nubienne(Burkina Faso). . . . .	9
1.3	Construction en Pisé; (a) :instrument de compression(pissoirs manuels et fouloir pneumatique); (b) :Habitat en pisé au Maroc; (c) : Technique de mise en œuvre du pisé à l'aide d'un pissoir manuel. . . . .	11
1.4	Maison en torchis . . . . .	12
1.5	Construction en Bauge; (a) :Mélange de terre crue et fibre végétales; (b) :Construction d'un mur en bauge; (c) : Mosquée en bauge à Bobo Dioulasso. . . . .	13
1.6	Construction en BTC; (a) :Confection d'une BTC avec une presse manuelle; (b) :Construction d'un mur en BTC; (c) :Ecole primaire de Gando réalisé en BTC (Burkina Faso). . . . .	14
1.7	Construction des murs en parois multicouches; (a) :construction d'un mur en adobéton; (b) :mur double en BTC + isolant intégré; (c) : mur double en pisé + isolant intégré. . . . .	16
1.8	(a) :Liste de quelques isolants conventionnels; (b) :Laine de verre (isolant conventionnels); (c) : Balle de paille (isolant non conventionnel); (d) : Panneau de réalisé à partir de Cotton recyclé (isolant non conventionnel). . . . .	20
1.9	PPD en fonction de PMV . . . . .	23
1.10	Correspondance PMV/sensation thermique d'après Fanger . . . . .	23
1.11	Diagramme de Givoni . . . . .	24
2.1	Vue en plan du bâtiment pilote . . . . .	27
2.2	Les composants du rayonnement solaire . . . . .	28

2.3	Températures mensuelles moyennes de Ouagadougou (jour et nuit) de 1945-2018 extrait de <a href="http://hikersbay.com/climate/burkinafaso/ouagadougou?lang=fr">http://hikersbay.com/climate/burkinafaso/ouagadougou?lang=fr</a> . . . . .	29
2.4	Instrumentation du bâtiment pilote (isolant extérieur + BTC intérieur) . . . . .	30
2.5	Les modes de transfert de chaleur dans un bâtiment ; (a) : Transfert de chaleur par conduction ; (b) : Transfert de chaleur par convection ; (c) : Transfert de chaleur par rayonnement . . . . .	32
3.1	Amplitude thermique extérieur et intérieur du BTC et de l'isolant extérieur + BTC . . . . .	34
3.2	Amplitude thermique extérieur et intérieur des différentes stratégies de ventilation de l'isolant extérieur + BTC . . . . .	35
3.3	Représentation graphique du flux intérieur . . . . .	36
3.4	Intérieur du bâtiment pilote avec des capteurs mesurant la température . . . . .	41
3.5	Thermopuces et HygroPuces sur porte-clés fixe avec un lecteur thermopuce . . . . .	41
3.6	Caractéristiques technique du thermopuce . . . . .	42
3.7	Caractéristiques technique de l'hydropuce . . . . .	43
3.8	Bâtiment pilote . . . . .	44
3.9	Station météo . . . . .	44
3.10	Stratégie de fermeture du local . . . . .	45
3.11	Stratégie de ventilation nocturne . . . . .	45
3.12	Stratégie de ventilation continue . . . . .	46
3.13	Flux intérieur de la paroi Nord . . . . .	48
3.14	Flux intérieur de la paroi Sud . . . . .	49
3.15	Flux intérieur de la paroi Ouest . . . . .	49
3.16	Flux intérieur de la paroi Est . . . . .	50

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Depuis la naissance de l'humanité, l'homme a toujours essayé de se protéger des aléas du climat (surchauffe d'été, les vents, les pluies...etc) afin de créer des conditions favorables pour sa vie. Dans la quête d'un abri, il était obligé de construire un habitat qui lui offre le confort durant toute l'année. De nos jours, l'un des buts principaux recherché dans la construction est la mise des occupants à l'abri des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de ses diverses activités.

Avec l'évolution des nouvelles techniques et le développement de nouveaux matériaux de construction qui contribuent à l'amélioration du confort thermique des usagers des bâtiments on constate que certains matériaux naturels encore mal connus peuvent entraîner une diminution des dépenses énergétiques des bâtiments par une meilleure qualité d'isolation et contribuer ainsi à la protection de l'environnement.

On estime actuellement qu'un tiers de la population mondiale habite dans les maisons en terre. L'architecture en terre crue est utilisée assez largement dans les régions sèches de la planète puisque c'est un matériau écologique qui présente d'énormes avantages socio-économiques.

La présente étude qui fait l'objet de recherche menée au sein du laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable (LEHMaD-2iE) sera consacrée à l'étude de l'amélioration du confort thermique dans le bâtiment par l'utilisation d'une résistance thermique associée au BTC (paroi multicouche). Le mémoire actuel porte sur l'étude de l'impact de l'isolant et de la masse thermique sur le ressenti thermique intérieur d'un bâtiment pilote. Il s'agira à partir d'une étude expérimentale consistant à disposer de façon appropriée des capteurs dans le bâtiment en question, de confirmer ou d'infirmer l'opportunité d'une résistance thermique dans un climat chaud à travers les résultats qui seront obtenus.

Outre, l'introduction générale, ce travail est structuré en 3 chapitres :

- Le premier chapitre présentera l'état de l'art des matériaux de construction et confort thermique ;
- Le second chapitre exposera l'étude expérimentale ;
- Le troisième chapitre présentera les résultats et discussions de l'étude expérimentale.

Enfin, la conclusion générale résume les principaux résultats pour terminer notre étude.

# CHAPITRE 1

---

## Etat de l'art des matériaux de construction et notion de confort thermique

---

Dans ce présent chapitre nous présenterons en premier lieu les différentes techniques de construction en terre, ensuite nous présenterons les différents isolants utilisés associés aux différentes techniques de constructions en terre et par finir nous présenterons les enjeux liés au confort thermique.

Pour mener à bien notre étude, nous avons consulté un grand nombre d'articles scientifiques, de manuscrits de thèse et de documents de références sur les différentes techniques de construction en terre et différents types d'isolants utilisés dans la construction.

### 1.1 Les différentes techniques de construction en terre

La **terre crue** ou **matériau terre** sont les termes utilisés pour désigner la terre, utilisée avec peu de transformations, en tant que matériau. Construire en terre crue de nos jours permet d'exploiter le matériau le plus proche, celui que l'on a sous les pieds, disponible à peu près partout dans le monde [1]. Grâce à une connaissance qui n'est qu'empirique, donc difficilement transmissible, on construit en terre depuis des millénaires.

Il existe différents modes et différentes technologies pour la mise en œuvre de la terre crue avec une infinité de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. Chacune de ces techniques est née de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de coutumes différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux disponibles. Il existe principalement douze techniques répertoriées et schématisées par H. Guillaud et H. Houben (1995) dans une « roue » des techniques de construction en terre. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC) mais il en existe de nombreuses autres. Chaque technique a ses spécificités et utilise une terre bien précise (Voir figure 1.1).

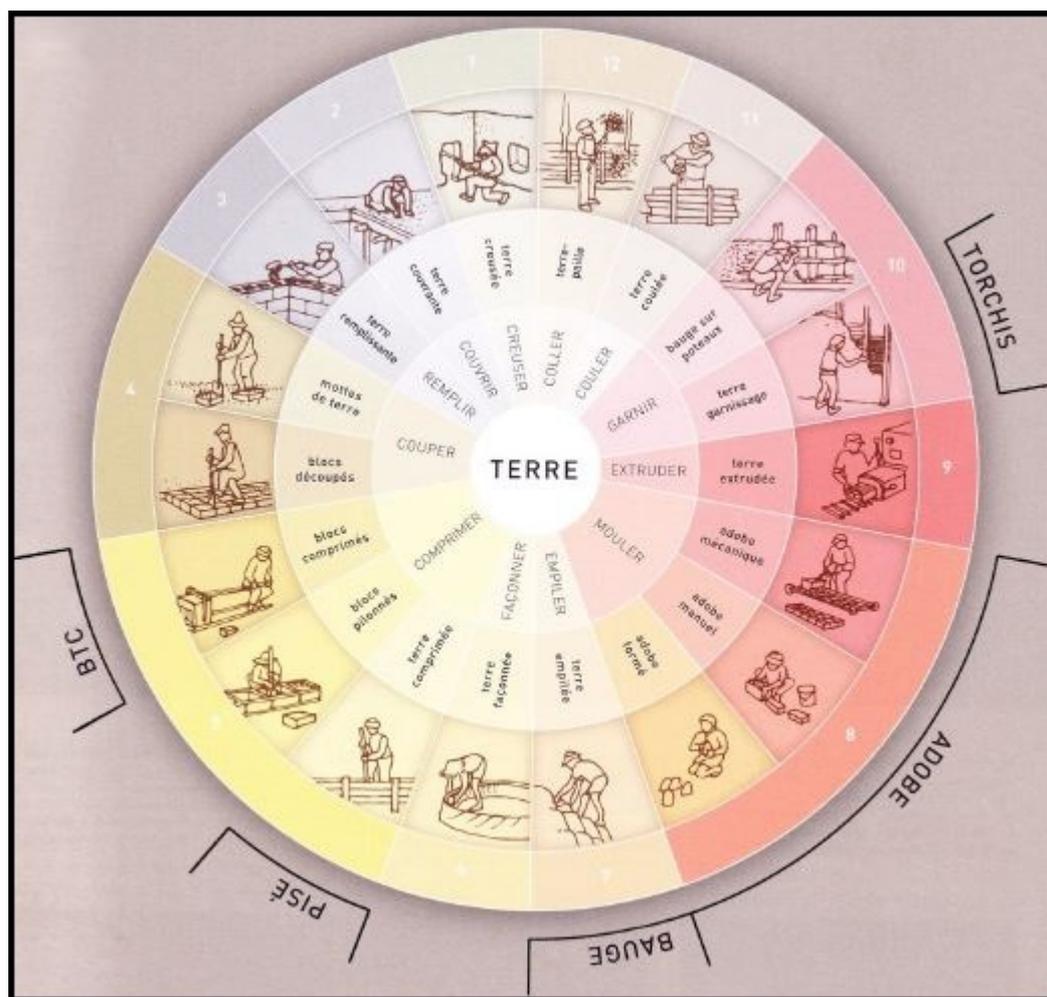


FIGURE 1.1 – Les différents techniques de construction en terre par CRATERRE (Source : <http://www.torchis-terrecreue.fr>)

## 1.1.1 Parois en terre monolithique

### 1.1.1.1 L'Adobe (Sable + argile + paille)

Les adobes, également appelés banco en Afrique, sont « des briques de terre crue, façonnées à la main ou moulées à l'état plastique, puis séchées à l'air libre » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 42). L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile et d'une quantité du paillé hachée ou d'autre fibre. La terre utilisée pour la fabrication des adobes est de granulométrie relativement fine et ne doit contenir ni cailloux, ni graviers et non plus être trop argileuse compte tenu des petites dimensions des moules afin d'éviter les fissurations au séchage. Pour minimiser ces dernières, on peut également y rajouter du sable ou des fibres végétales.

La confection des murs en adobes est faite en général à l'aide d'une moule rectangulaire qui est posé sur un sol préalablement déblayé sur lequel on étale une couche fine de sable afin d'éviter une absorption rapide d'eau par les sols très argileux qui permettra de diminuer les risques de fissures et le collage des briques au sol. Ensuite, on remplit le moule avec le mélange de terre plastique qu'on tapote en surface afin de chasser les trous d'air. La surface supérieure de la

brique est bien lissée à la main et le moule est alors retiré d'un coup sec. Les briques ainsi faites sont laissées à sécher au soleil pendant une bonne semaine. Après séchage les briques d'adobe sont maçonnées à l'aide d'un mortier de terre de même nature que celle utilisée pour les blocs sur un soubassement (pierres, brique de terre cuite) [2].

On peut construire l'entièreté d'une construction avec seulement des adobes grâce aux techniques des arcs, voûtes et coupoles. C'est le cas des constructions en voutes à base d'adobes que l'on trouve au Sénégal et dans quelques pays du sahel comme le Burkina Faso (Voir figure1.2). Les dimensions des murs en adobes varient en fonction des moules. Grâce à leur épaisseur, à leur masse et à la bonne résistance à la compression du matériau terre, les murs en adobes constituent une excellente structure porteuse. L'utilisation de l'adobe en construction présente un avantage en confort thermique avec un coefficient de conductivité thermique qui est de l'ordre de 0,2; 0,5 et 1 W/m. ° C pour des masses volumiques respectives de 700, 1300 et 1900 Kg/m<sup>3</sup> [3].

- **Les avantages de l'adobe**

- Matière première localement disponible et facilement accessible ;
- Equipement de production peu couteux ;
- Capacité de régulariser l'humidité de l'air ;
- Bonne contribution au confort thermique.

- **Les inconvénients de l'adobe**

- Consomme beaucoup d'eau ;
- Temps de séchage en fonction du climat ;
- Faible résistance à l'eau.

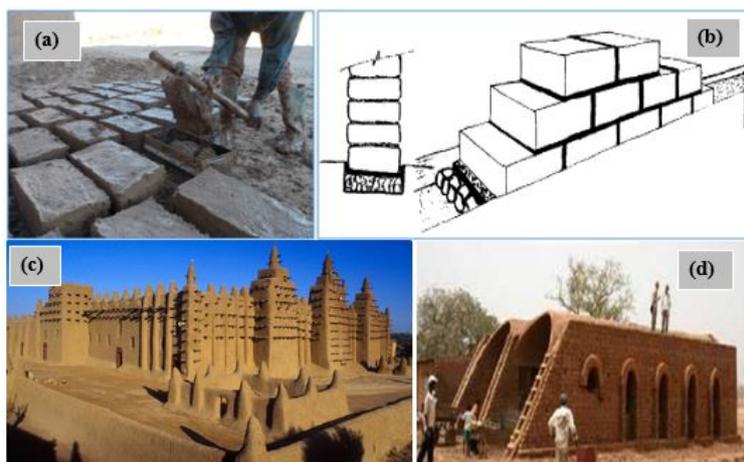


FIGURE 1.2 – Technique de construction en adobes; (a) :Confection des murs en adobes dans les moules; (b) :Fondation d'un mur en adobe; (c) :Construction en adobe à Djene(Mali); (d) :Construction de bâtiments en adobes par la technique de la voûte nubienne(Burkina Faso).

### 1.1.1.2 1.1.1.2. Le Pisé

La technique de la terre comprimée, plus généralement appelée technique du pisé, est apparue pour la première fois à Carthage en Tunisie. Elle s'est alors répandue autour du bassin

méditerranéen et au Maghreb avant d'atteindre l'Europe au VII<sup>e</sup> siècle. Elle consiste à construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages. La terre utilisée est généralement extraite directement du site de construction. Il faudra vérifier qu'elle ne contient pas trop d'argile, provoquant des fissures au séchage. La terre à pisé peut contenir aussi bien des cailloux et des graviers que des particules plus fines. De par l'utilisation de coffrages et la granulométrie de la terre utilisée, cette technique de construction est celle qui se rapproche le plus de la technique du béton. « Béton d'argile » ou « béton de terre » sont des appellations largement utilisées pour parler du pisé. La terre extraite est placée dans des coffrages, également appelés **banches** (voir figure 1.3). Un côté de la banche est constitué de planches de bois sec renforcées par des chevrons et mesure moins d'un mètre de hauteur. Les deux grands côtés sont placés parallèlement avec comme espacement l'épaisseur du mur souhaitée. Pour la première étape, deux autres côtés mesurant cette épaisseur désirée sont fixés aux extrémités des grands côtés. Aux étapes suivantes, un seul petit côté sera conservé, la terre de l'étape précédente servant à fermer le dernier côté. Pour la dernière étape refermant le périmètre de la construction, les deux petits côtés seront supprimés, la banche étant fermée par de la terre aux deux extrémités. Les deux grands côtés sont tenus à distance par des traverses, appelées les « clés » du coffrage. Celles-ci sont très solides afin de résister à la poussée horizontale de la terre. Les coffrages sont remplis de terre par fines couches d'une quinzaine de centimètres. Une fois la couche de terre étalée dans le coffrage, on procède au compactage de la terre. Celui-ci qui lui donnera la cohésion nécessaire. De ce fait, il doit être réalisé de façon soignée à l'aide du « pissoir ». Cet instrument, servant à comprimer la terre par chocs, est constitué d'un manche solide au bout duquel est fixée une grosse masse qui peut être en bois ou en métal. Aujourd'hui, il existe également aussi des fouloirs pneumatiques qui permettent d'atteindre jusqu'à 700 impacts par minute [1].

- **Les avantages du pisé**

- Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau ;
- Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents ;
- Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur et permet un confort d'été indéniable ;
- Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité de stocker la chaleur et de la restituer par rayonnement ;
- Bonne isolation phonique et qualité acoustique.

- **Les inconvénients du pisé**

- Travaux d'entretien annuels ;
- Forte conductivité thermique élevée du pisé constituant une source d'inconfort hygrothermiques ;
- Mauvais isolant pour les rebords de fenêtre.

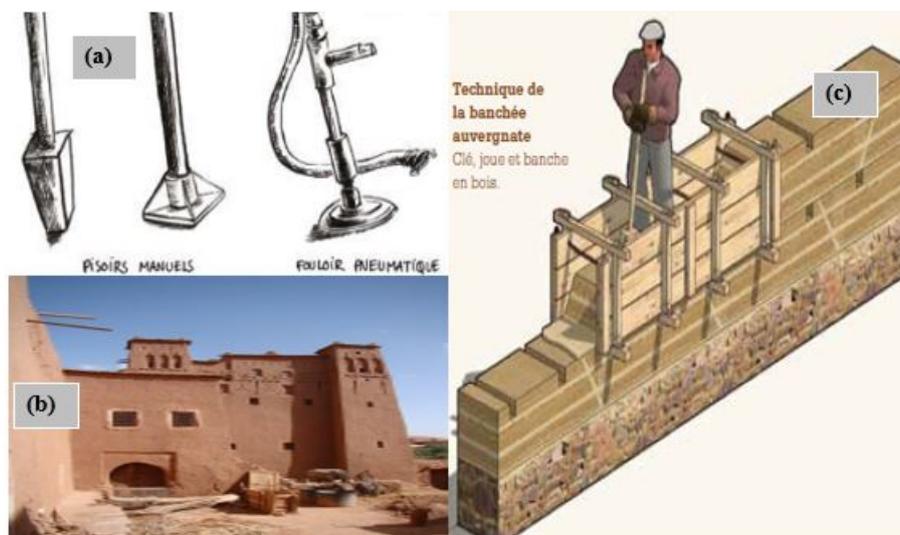


FIGURE 1.3 – Construction en Pisé ; (a) :instrument de compression(pissoirs manuels et fouloir pneumatique) ; (b) :Habitat en pisé au Maroc ; (c) : Technique de mise en œuvre du pisé à l'aide d'un pissoir manuel.

### 1.1.1.3 1.1.1.3. Le Torchis (Eau + argile + fibres naturelles)

Le torchis est l'une des plus anciennes techniques de construction. Apparu vers la fin du 10<sup>e</sup> millénaire au Proche-Orient, il a été perfectionné par les cultures néolithiques du Danube avant de s'étendre aux régions boisées de l'Europe continentale. Il s'est aussi développé dans les zones tropicales humides d'Afrique et d'Amérique du Sud. Quelques sites classés au patrimoine mondiale ont été réalisés en torchis c'est le cas des tombeaux des rois du Buganda en Ouganda. Traditionnellement, le torchis est un mélange d'eau, d'argile et de fibres naturelles (paille, foin, crin de chevaux ...ect). On distingue essentiellement deux grands types de mélange tel que le **torchis lourd** et le **torchis allégé**.

**Le torchis lourd** est un mélange fait avec beaucoup de terre et un peu de paille formant une armature. De conductivité thermique de 1,05 W/m. ° C, il privilégie l'inertie et l'accumulation thermique (chaleur l'hiver et fraîcheur l'été) par contre **le torchis allégé** est un mélange fait avec beaucoup de paille et un peu de terre. De conductivité thermique comprise entre 0,12 à 0,15 W/m. ° C, il privilégie l'isolation et est plus isolant que le torchis traditionnel car il renferme beaucoup d'air statique.

La technique du torchis est mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en lattis de bois fixée (Voir figure 1.4) entre des poteaux, appelés colombes. La structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter, tandis que la terre constitue un excellent matériau de garnissage, facile à poser. Les terres utilisées pour cette technique sont de préférence fines, argileuses et collantes et contiennent peu de sable. De ce fait, elles fissurent facilement au séchage. C'est pourquoi on y ajoute des fibres végétales (généralement de la paille). Ces dernières améliorent les propriétés d'isolation thermique du matériau. On malaxe la terre-paille avec de l'eau jusqu'à obtenir une consistance plastique. Ce mélange est alors appliqué sur le lattis jusqu'à le remplir complètement puis on laisse sécher l'ensemble. Une fois

sec, on enduit généralement les murs avec de la terre stabilisée ou non. La technique de la terre de garnissage n'est pas des plus appréciées car elle est considérée comme peu durable. Pourtant, lorsqu'elle est mise en œuvre correctement (c'est-à-dire en la protégeant des intempéries, des remontées capillaires et des rongeurs et termites), elle est extrêmement durable et très résistante aux séismes. Cette technique est également peu coûteuse. Des entreprises spécialisées l'ont bien compris et ont fait évoluer la technique. Ces évolutions contemporaines ont par exemple mené à un amincissement des structures en bois tout en augmentant l'épaisseur du mur, cela en faveur d'une teneur en paille plus importante. La terre utilisée pour lier les fibres, appelée barbotine, est argileuse et liquide. Le coffrage en bois est amovible et le mélange terre-paille y est légèrement compacté jusqu'à obtenir une surface plane qui sera enduite [1].

- **Les avantages du torchis**

- Bonne inertie thermique ;
- Protège le bois des structures en absorbant et en ventilant l'éventuelle humidité permettant de prolonger la durée de vie des habitations ;
- Financièrement plus économe que les autres types de terre crue ;
- Bonne isolation thermique et phonique.

- **Les inconvénients du torchis**

- Forte utilisation des tonnes de terre pour une petite construction ;
- Les normes de construction pas encore été établies.



FIGURE 1.4 – Maison en torchis

#### 1.1.1.4 1.1.1.4. La Bauge (Eau + argile + fibres végétales)

La bauge est la technique employant de la terre crue qui nécessite le moins d'outillage, ni coffrage, ni moule, seulement un outil tranchant afin de « lisser » les parois obtenues. C'est aussi la moins connue mais comme le pisé, cela permet de construire des murs monolithiques (d'un seul tenant) grâce à des levées successives, moins régulières que pour le pisé. On obtient alors des murs à forte épaisseur (de 50 cm à 1 mètre) apportant également beaucoup d'inertie.

Traditionnellement, la mise en œuvre de la bauge se fait de la manière suivante : on commence

par mélanger la terre avec les fibres végétales (figure 1.5) éventuelles et de l'eau jusqu'à atteindre un état plastique. Il faut ensuite façonner des boules de terre à la main. Celles-ci sont lancées au maçon qui les rattrape et les empile sur le mur avec une certaine énergie afin qu'elles constituent un mur monolithique très épais (40 à 50 cm en général mais pouvant aller jusqu'à environ 200 cm d'épaisseur). Les deux faces du mur encore frais sont ensuite battues avec un bâton selon un angle de 45° afin de fermer les fissures. On enlève finalement les dernières irrégularités du mur à l'aide d'un outil tranchant (une bêche par exemple) qui vient tailler le mur. Cette technique demande un certain temps pour la mise en œuvre : la terre plastique risquant de s'affaisser sous son propre poids, il faut procéder en plusieurs couches et attendre que chaque couche sèche avant de pouvoir mettre en œuvre la couche suivante [1].

La bauge encore appelée technique de la terre façonnée est une technique fortement développée de manière traditionnelle au Burkina Faso chez les Tata Sombas [2].

- **Les avantages de la bauge**

- Bon apport d'inertie ;
- Faible cout des matériaux ;
- Bonne capacité de régulation hygro-thermique( la bauge peut absorber environ 3% de son poids en eau ) ;
- Bonne contribution au confort thermique et très bonne isolation phonique.

- **Les inconvénients de la bauge**

- Besoin de main d'œuvre importante pour le montage d'un mur ou d'un bâtiment complet ;
- Temps de séchage à respecter entre chaque levée ;
- Nécessité d'être protégé des remontées d'humidité.



FIGURE 1.5 – Construction en Bauge; (a) :Mélange de terre crue et fibre végétales; (b) :Construction d'un mur en bauge; (c) : Mosquée en bauge à Bobo Dioulasso.

### 1.1.1.5 1.1.1.5. La Brique de terre Comprimée

La brique de terre comprimée, souvent dénommées BTC, sont de la terre tamisée très légèrement humide fortement compressée à l'aide d'une presse qui peut être : manuelles ou motorisées, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique. Les briques une fois pressées, sont stockées et mise à sécher en phase humide sous bâche durant une à trois semaines [4].

Cette technique de BTC ou blocs de terre comprimée (figure 1.6) est l'une des techniques les plus utilisées par Francis Kéré (architecte Burkinabé) dans la plupart de ses réalisations architecturales à Gando car elle permet la revalorisation de la construction en terre qui constitue le symbole d'une modernité constructive [5].

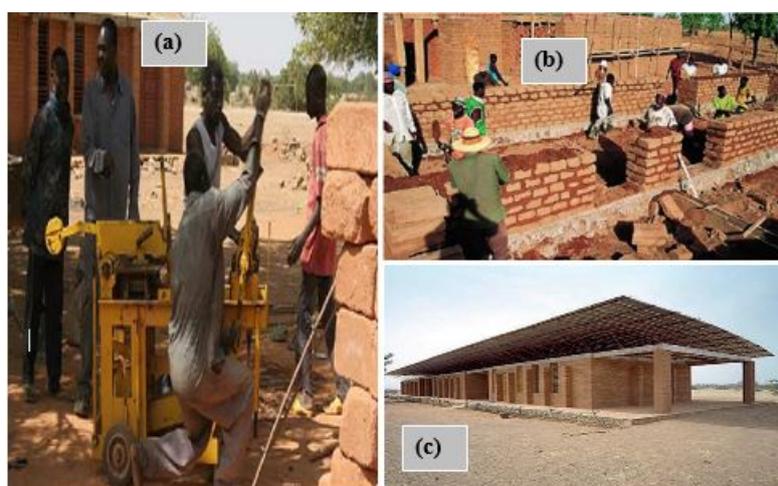


FIGURE 1.6 – Construction en BTC ; (a) :Confection d'une BTC avec une presse manuelle ; (b) :Construction d'un mur en BTC ; (c) :Ecole primaire de Gando réalisé en BTC (Burkina Faso).

## 1.1.2 Parois en terre multicouches

### 1.1.2.1 adobéton

Précédemment défini l'adobe est l'une des techniques de construction en terre crue. Construit pour la plupart du temps en paroi monolithique elle peut aussi être réalisée en paroi multicouche. L'adobe associé au béton communément appelé **adobéton** est l'une des techniques qui a fait l'objet d'étude expérimentale d'une maisonnette au Burkina Faso construite au sein de l'EIER (Ecole Inter-Etat d'Ingénieur de l'Equipement Rural) par le département de Génie Civil [6].

#### • Les avantages de l'adobéton

- Bonne régularité de la performance mécanique des blocs d'adobe ;
- Excellente durabilité a la pluie ;
- Excellent confort d'habitation ;
- Mise en œuvre de moindre cout.

#### • Les inconvénients de l'adobéton

- Construction pour les architectures simples ;
- Nécessité d'apprentissage.

### 1.1.2.2 Le pisé plus isolant

Le pisé, technique particulière utilisée pour monter les murs monolithique en utilisant les méthodes traditionnelles a connu une évolution du point de vue de son système constructif. La construction en terre de nos jours n'est pas essentiellement constitués des murs porteurs en pisé. Cependant, les techniques constructives ont permis le mixage du pisé en association avec des ossatures bois ou des techniques de maçonnerie plus classiques. Au-delà de ses qualités esthétiques ce sont souvent ses caractéristiques thermiques qui sont recherchées. L'amélioration du confort thermique des murs en pisé sont solutionnées par de nombreux technique formant ainsi une paroi multicouche. Ainsi, l'isolation du mur en pisé peut être soit : collé directement au mur sous la forme d'un enduit épais fibré (chaux, chanvre, paille) ou intégré dans un mur double en pisé [7].

- **Les avantages du pisé plus isolant (intérieure et extérieure)**

- facilité de mise en œuvre, car l'isolant repose sur le sol existant ;
- Préserve la beauté du pisé en façade ;
- La ventilation des murs extérieurs est optimale ;
- Élimine les ponts thermiques ;
- Préserve les qualités d'inertie des murs en pisé.

- **Les inconvénients du pisé plus isolant(intérieure et extérieure)**

- Ôte les bénéfices de l'inertie thermique des murs périphériques ;
- Peut bloquer la respiration du mur ou entraîner des problèmes d'humidité cachée si des techniques ou matériaux mal adaptés sont employés ;
- Nécessite souvent la mise en œuvre d'un support de fixation (structure ou fondation) ;
- Requier un échafaudage.

### 1.1.2.3 La Brique de Terre Comprimée plus isolant

Utilisée comme matériau porteur ou de remplissage la brique de terre comprimée est souvent associée à des isolants en vue de limiter l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur assurant ainsi un confort thermique dans les habitations.

Avec l'évolution des modes constructifs on assiste à plusieurs méthodes d'isolation dans la construction. En Belgique par exemple, dans les constructions neuves l'isolant est pratiquement toujours placé du côté extérieur par rapport au mur porteur. Le choix de ce système de mur isolé par l'extérieur avec une finition légère se fait parfois pour des raisons esthétiques. En rénovation par contre les murs sont souvent isolés par l'intérieur pour préserver l'apparence du mur (briques ou pierre, ornements particuliers,...etc) ou pour des raisons urbanistiques (alignement des façades) [8].

Il existe essentiellement trois procédés d'isolation thermiques des BTC :

- Par remplissage de la lame d'air dans le cas d'un mur creux ;
- Par l'extérieur ;
- Par l'intérieur.

- **Les avantages du BTC plus isolant (intérieure et extérieure)**

- Améliore l'aspect extérieur en cas de revêtement abimé ;

- Supprime les risques de pont thermique locaux ;
- Masse thermique et finitions intérieurs préservées ;
- Réalisation sans échafaudages.

- **Les inconvénients du BTC plus l'isolant(intérieure et extérieure)**

- Nécessite l'appel d'une entreprise spécialiste ;
- Risque de condensation superficielle et de formation de moisissures ;
- Diminution de l'inertie thermique : risque de surchauffe.

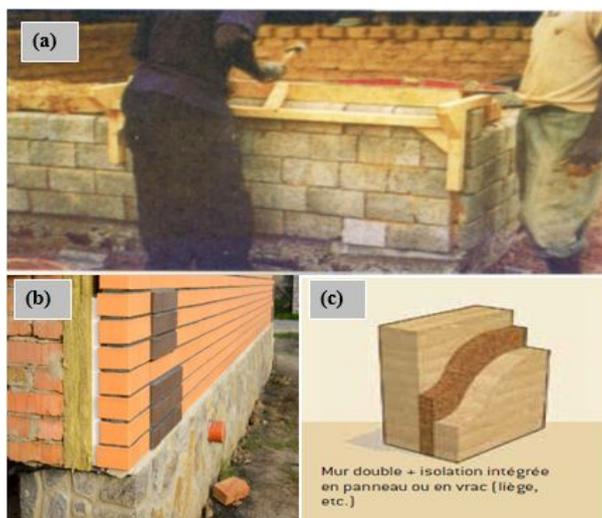


FIGURE 1.7 – Construction des murs en parois multicouches ; (a) :construction d'un mur en adobéton ; (b) :mur double en BTC + isolant intégré ; (c) : mur double en pisé + isolant intégré.

## 1.2 Les différents méthodes d'isolation thermique dans le bâtiment

**L'isolation** est un procédé visant à limiter ou empêcher les transferts de chaleur entre un milieu froid et un milieu chaud. Il est essentiel pour maintenir une température de confort à l'intérieur des locaux.

**Les isolants thermiques**, en général sont caractérisés par leur résistance thermique et/ou leur conductivité (U-value). Un produit est cependant qualifié d'isolant lorsqu'il a une conductivité thermique qui est dépendant de la densité, de la porosité, de la teneur en humidité et du type de matériau (voir tableau 1.2.2). Un matériau est généralement considéré comme un isolant thermique si sa conductivité est inférieure à  $0,07 \text{ W/m.K}$  [9].

Il existe plusieurs type d'isolants tel que la laine de verre, le polystyrène (EPS), le polystyrène extrudé(XPS) qui, associés à des matériaux tel que les BTC, les parpaings assure l'isolation thermique des bâtiments en empêchant le transfert de chaleur par conduction et par convection. On distingue principalement trois typologies pour la mise en place des isolants : **l'ITE** (l'isolation thermique par l'extérieur qui consiste à poser un manteau isolant extérieur sur le bâtiment dans son ensemble), **l'ITI** (l'isolation thermique par l'intérieur consiste à poser un isolant contre les murs intérieurs), **l'ITR** (l'isolation thermique répartie réalisé avec des structures porteuses

isolantes comme des parpaings, des monomurs,...etc).

Les matériaux d'isolation peuvent être classés en deux grands groupes essentiels à savoir : **les isolants conventionnels et les isolants non conventionnels**

## 1.2.1 Les isolants conventionnels

### 1.2.1.1 Matériaux biosourcés

Ce sont des matériaux constitués principalement de fibres végétales ou animales. Dans le bâtiment, les matériaux biosourcés les plus utilisés sont le bois, la paille, le liège, la laine de mouton, etc.

- **Les isolants d'origine végétales**

- **Le liège expansé**

Le liège pur expansé est issu de l'arbre chêne-liège. Le liège est résistant à la compression et indéformable. Le liège est également un très bon isolant phonique. Les plaques de liège expansé se posent et se découpent facilement. Le liège est utilisé sous différentes formes : en vrac, en panneaux ou bien encore en éléments composites préfabriqués [10].

- **Le bois**

Le bois est une matière naturelle renouvelable idéale pour la conception des isolants pour plusieurs raisons. Il est pratique, économique et écologique. Comme isolant, le bois se présente également sous différentes formes : laine de bois (panneau semi-rigide, en vrac...), panneau de fibres de bois rigides ou encore des fibraglos (fibres de bois avec enrobage de plâtre et ciment). Les déchets des scieries sont la matière première du panneau de bois. Les fibres sont pressées et séchées pour donner des produits à fibres tendres ou dures. La fabrication se fait naturellement, sans produit ajouté. Ces panneaux peuvent être posés pour la toiture, les murs (le plus souvent comme isolant complémentaire), les cloisons intérieures et pour l'isolation acoustique et thermique des planchers [10].

- **Les isolants d'origine animales**

- **La laine de mouton**

La laine de mouton a des qualités d'isolation thermique et de régulation naturelle liées à la constitution de ses fibres. Les produits de tonte sont d'abord lavés au savon et à la soude pour éliminer les impuretés et surtout le suint. Ensuite la laine reçoit un traitement insecticide et un traitement contre le feu, à base de sel de bore.

### 1.2.1.2 Matériaux synthétiques

Issus de ressources pétrochimiques, donc non renouvelables et fortement émetteurs de gaz à effet de serre. Ils sont particulièrement utilisés pour le traitement des zones fortement soumises à l'humidité (soubassement, sous-dalle...etc).

- **Les isolants synthétiques**

- **Le polystyrène (expansé et extrudé)**

Ces isolants sont produits par l'industrie du pétrole, le plus souvent à partir d'un ou de plusieurs

dérivés du processus de raffinage. Le polystyrène expansé est obtenu par polymérisation des billes de styrène qui en sont issues avec de l'eau et du gaz pentane. Le polystyrène extrudé est obtenu après polymérisation du styrène par extrusion sous pression d'une pâte de fusion grâce à un gaz lourd [11].

### 1.2.1.3 Matériaux minéraux

- **Les isolants minéraux**

Les isolants minéraux sont fabriqués à partir des matières naturelles inorganiques. Ils regroupent : le verre cellulaire, la laine de verre, la laine de roche (basalte en particulier), la vermiculite, l'argile expansé.

Elles présentent de bonne performance thermique, très résistant au feu, ils sont stables et solides, ils sont couramment utilisés dans tous les domaines de la construction ; et peuvent être fabriqués sous différentes formes (matelas ou panneaux). La laine de roche et la laine de verre sont les isolants minéraux les plus communément utilisés.

- **La laine de roche**

La laine de roche est obtenue à partir de la fusion de roche volcanique (basalte) de fondant et de coke industrielle. Une pâte est alors obtenue, fibrée et encollée par des liants chimiques (résine phénoliques) avant d'être stabilisé par chauffage en étuve [11].

- **La laine de verre**

La laine de verre est composée de la silice (sable), du verre de récupération (ou calcaire) transformé par fusion, fibrage, et polymérisation [11].

## 1.2.2 Les isolants non conventionnels

- **Les isolants naturels**

- **Tige de coton**

Le coton est la culture non agricole la plus répandue utilisée principalement pour la production textile. Une étude réalisée par X. Zhou et al ont permis de tester la performance thermique de la tige de coton, un résidu de la production de coton. Les panneaux de particules ont été obtenues en transformant les tiges en fibres sans utiliser de liant chimique. La conductivité thermique de l'échantillon testé est comprise entre 0,0585 et 0,0815 W/m.K ce qui a permis de déduire que plus le matériau est dense, plus l'isolation thermique est basse [12].

- **Fibre de palmier à huile**

Le palmier est un végétal de la famille botanique des arécacés, largement cultivée pour ses fruits et ses graines riches en huile à usage alimentaire et industriel. C'est aussi une plante dont les fibres sont utilisées pour l'isolation des bâtiments. Plusieurs recherches ont été menées pour recycler les résidus d'huile palmier, une culture cultivée dans 11 millions d'hectares dans le monde entier (Afrique de l'Ouest, Asie du Sud-Est et Amérique du Sud). L'effet de la densité sur la conductivité thermique d'un échantillon à base de fibre de palmier à huile a été étudié en 2012 par Manohar. La valeur de conductivité thermique la plus basse était de 0,055 W/m.K pour une masse volumique de 100 kg/m<sup>3</sup> [12].

### - **Balle de paille**

La paille est un sous-produit de la culture de céréales qui est disponible en grande quantité et à bas prix dans un grand nombre de pays. La paille a été l'un des premiers matériaux utilisés dans les bâtiments écologiques et de nombreux bâtiments ont été construits selon cette technique dans le monde entier. Habituellement, la paille utilisée pour les applications de construction provient de la culture du blé. Plusieurs travaux de recherche évaluent les effets de l'utilisation de ballots de paille comme isolant thermique dans les bâtiments. Goodhew et ses collaborateurs ont procédé à une caractérisation thermique du matériau en mesurant une conductivité thermique de  $0,067 \text{ W/m.K}$ , une diffusivité de  $18,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  et une capacité calorifique spécifique de  $600 \text{ J/kg.K}$  pour un échantillon dense de  $60 \text{ kg/m}^3$ . Des valeurs de conductivité thermique inférieures ont été mesurées et analysées pour des échantillons similaires par l'Université d'Aalborg au Danemark. Cette dernière étude a également révélé que les échantillons obtenus avec les tiges de paille perpendiculaires au flux de chaleur avaient de meilleures propriétés d'isolation thermique [12].

#### • **Les isolants recyclés**

##### - **Mousse de verre recyclée**

Plusieurs études ont prouvé que les déchets de verre pouvaient être utilisés avec succès recyclé pour la réalisation de matériaux d'isolation thermique et acoustique utilisant des procédés de moussage. Ayadi et al ont réalisé un matériau dense de  $450 \text{ kg/m}^3$  caractérisé par une très faible conductivité thermique,  $0,031 \text{ W/m.K}$ . L'échantillon testé était un matériau en sandwich dans lequel la mousse a été placée entre deux couches de fibres de verre [12].

##### - **Plastiques recyclés**

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est l'un des matériaux plastiques les plus produits, utilisés notamment dans l'industrie de l'emballage et de la fabrication de bouteilles. Des recherches effectuées ont permis d'utiliser les bouteilles de Polyéthylène téréphtalate (75%) associé à des thermocollants vierge (25%) pour produire des panneaux isolants innovants. Le panneau obtenu était caractérisé par une faible conductivité thermique de  $0,0355 \text{ W/m.K}$ , en considérant un matériau dense de  $30 \text{ kg/m}^3$  [12].

##### - **Fibre textile**

La fabrication de produits textiles génère une grande quantité de déchets, communément mis en décharge ou utilisés pour la récupération d'énergie. Valverde et al ont réalisé des études sur un matériau à base de déchets de l'industrie du textile synthétique, constitué de polyester et de polyuréthane. La conductivité thermique des échantillons testés était comprise entre  $0,041$  et  $0,053 \text{ W/m.K}$  [12].



FIGURE 1.8 – (a) :Liste de quelques isolants conventionnels ; (b) :Laine de verre (isolant conventionnels) ; (c) : Balle de paille (isolant non conventionnel) ; (d) : Panneau de réalisé à partir de Cotton recyclé (isolant non conventionnel).

Isolant	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)	Chaleur spécifique	Densité(Kg/m <sup>3</sup> )
<b><i>ISOLANTS CONVENTIONNELS</i></b>			
<b><i>Matériaux biosourcés</i></b>			
<i>Isolants d'origine végétale</i>			
Liège expansé	0,037	1670	120
Fibre de bois	0,036 à 0,042	2100	50 à 170
<i>Isolants d'origine animale</i>			
Laine de mouton	0,035 à 0,042	1000 à 1800	13 à 35
<b><i>Matériaux synthétiques</i></b>			
<i>Isolants synthétiques</i>			
Polystyrène extrudé (XPS)	0,035	1300 à 1500	25 à 45
<b><i>Matériaux minéraux</i></b>			
<i>Isolants minéraux</i>			
Laine de verre	0,04	840 à 1000	10
Laine de roche	0,039	840 à 1000	25 à 59
<b><i>ISOLANTS NON CONVENTIONNELS</i></b>			
<i>Isolants naturels</i>			
Fibre de palmier à huile	0,055	—	100
<i>Isolants recyclés</i>			
Polyéthylène téréphtalate (PET)	0,035	—	30

TABLE 1.1 – caractéristique des isolants

## 1.3 Enjeux pour le confort thermique

### 1.3.1 Le confort thermique

#### 1.3.1.0.1 1.3.1.1 Notion de confort thermique

La notion de confort thermique est le plus souvent appliquée à l'être humain, bien qu'elle puisse s'appliquer à tout être vivant. En effet, la vie et spécialement l'activité métabolique assurant les fonctions vitales n'est possible que dans une certaine plage de température, qui varie d'une espèce à l'autre. Il existe cependant des conditions d'ambiance optimales qui seront ressenties par l'individu comme celle d'un état de confort thermique. Sur un plan physique,

le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance. Il dépend de la sensibilité, de l'habillement, du métabolisme et de l'activité physique de chaque individu, d'une part, mais aussi de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air, et de l'humidité, d'autre part. Au-delà d'un certain niveau de déséquilibre, l'individu va ressentir de l'inconfort, notamment parce qu'il va devoir réagir pour réduire ce déséquilibre. Tout être vivant dégage de la chaleur, cependant certains sont capables de réguler leur température corporelle par des moyens physiologiques, les homéothermes (cas de l'être humain) et d'autres non (les hétérothermes ou poïkilothermes) [13]. Les premiers disposent donc d'une meilleure capacité de survie (capacité d'adaptation) alors que les seconds peuvent difficilement s'adapter.

Le corps d'un individu va chercher à rétablir l'équilibre par différentes réactions demandant un certain effort : des réactions comportementales et des réactions physiologiques.

- La thermorégulation comportementale comprend le changement de posture, d'activité, de vêtement, etc.
- La thermorégulation physiologique, accessible uniquement aux êtres homéothermes, comprend notamment frissons, transpiration, vasodilatation, vasoconstriction, etc.

### 1.3.1.0.2 1.3.1.2 Caractérisation du confort thermique

Le concept de confort thermique est très complexe et diverse. Il est lié à une multitude d'attente portant sur le bien être corporel. Selon Givoni (1981), le confort thermique est la condition pour laquelle les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale. Pour Buratti et Ricciardi (2009), le confort est un état d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique.

Plusieurs normes sur le confort thermique s'appuient sur deux approches pour exprimer les sensations thermiques d'un individu dans un habitat. Il s'agit de :

- **L'approche analytique** : elle traite du 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, Stolwijk, and Hardy (1967) ; Gagge (1981) aux Etats 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. Les travaux de Fanger et al (1985) sur les ambiances thermiques ont abouti à la mise en place de la norme **ISO 7730** qui ont permis de déterminer l'indice PMV qui prévoit le vote moyen de sensation thermique d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique de **l'ASHRAE** (figure 1.10).

Pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique, il a lié le PMV à un autre indice, le PPD, qui prévoit le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée [14].

$$PMV = [0,0303exp(-0,036M) + 0,028]L \quad (1.1)$$

$$PPD = 100 - 95exp[-(0,03354PMV_4 + 0,2179PMV^2)] \quad (1.2)$$

L = l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue ;

PMV = vote moyen prévisible sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE ;

PPD = pourcentage prévu des insatisfaits.

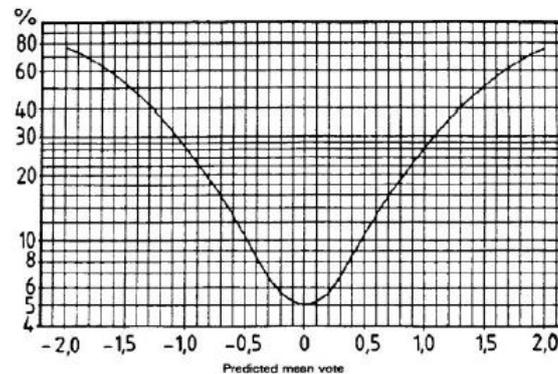


FIGURE 1.9 – PPD en fonction de PMV

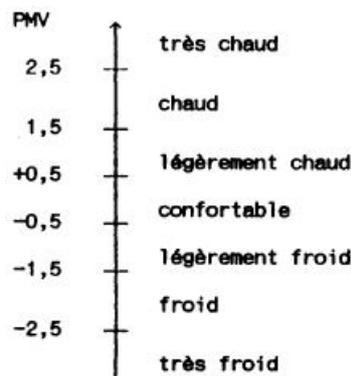


FIGURE 1.10 – Correspondance PMV/sensation thermique d'après Fanger

- **L'approche adaptative** : elle 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, qui ont permis de mener de réflexions afin de l'inclure dans les normes actuelles qui ne sont, pour l'instant, que basées sur les méthodes de l'approche analytique.

La méthode adaptative développée dans **standard ASHRAE 55, 200** 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  $T_o$ .

$$T_c = 0,31T_o + 17,8 \quad (1.3)$$

$T_c$  : la température de confort ;

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

La caractérisation de la notion de confort thermique de l'individu s'appuie également sur quelques diagrammes à savoir :

- **Les diagrammes bioclimatiques** : ils permettent de choisir les grandes options architecturales à partir des exigences du confort thermique et des profils du climat ;

- **Le diagramme d'Olgay** : il se base sur un diagramme bioclimatique mettant en évidence la zone du confort humain en relation avec la température d'extérieur, l'humidité, la température radiante moyenne, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la perte de chaleur par évaporation ;
- **Le diagramme de Givoni** se base sur les études concernant le métabolisme et des diverses voies d'échanges thermiques entre le corps et l'environnement (voir figure 1.11).

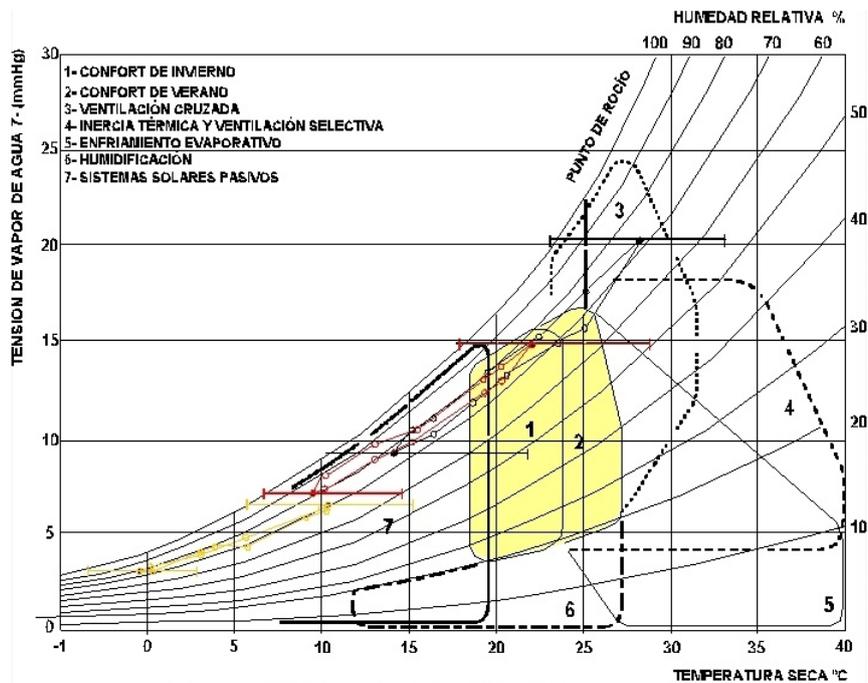


FIGURE 1.11 – Diagramme de Givoni

### 1.3.2 Enjeux thermique

Le confort thermique précédemment défini correspond à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance. On aperçoit de plus en plus de nos jours l'utilisation des isolants qui associés à des matériaux apportent des solutions aux diverses préoccupations des individus en matière de confort thermique.

Des études diverses menés par plusieurs scientifiques ont montré que l'isolant et la masse thermique ont des effets sur les caractéristiques thermiques plus importants qu'on ne le pense généralement. Il existe en effet des effets communs entre l'isolation et la masse thermique, ainsi qu'une grande interaction entre eux en ce qui concerne leur quantité et leur emplacement relatif dans la structure du bâtiment. Ainsi, Zaki et Hassan ont déterminé la performance thermique d'un mur à deux couches avec changement périodique de la température extérieure et du rayonnement solaire en tenant compte des effets des matériaux de construction, de l'orientation et de la position relative de la couche isolante. Il a été démontré que le flux thermique moyen n'est pas affecté par la position relative des couches.

Gregory et al ont par ailleurs étudié l'impact de la masse thermique sur la performance des constructions résidentielles australiennes en utilisant l'outil commercial AccuRate qui est

basé sur la méthode de réponse en fréquence. Ils ont constaté que la masse thermique avait un impact considérable sur le comportement thermique des modules étudiés, en particulier dans ceux où la masse se trouvait dans une enveloppe protectrice d'isolation. Dans la même perspective Zhou et al ont développé un modèle simple de bilan thermique pour estimer l'impact de la masse thermique externe et interne sur la température de l'air intérieur des bâtiments ventilés naturellement. Différents murs ont été comparés et ont constaté que l'utilisation d'un mur lourd avec isolation extérieure avait la plus faible amplitude de température de l'air intérieur. Les effets de la masse thermique et de l'isolation thermique doivent être considérés simultanément car, dans des conditions dynamiques, leurs effets sont interactifs. Le type, l'épaisseur et l'emplacement de la masse thermique et des couches d'isolation sont des paramètres cruciaux qui affectent le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment. C'est dans cette logique que Eben Saleh a effectué une analyse énergétique de l'ensemble du bâtiment, basée sur la méthode du facteur de réponse thermique, pour étudier l'effet du matériau isolant, de l'épaisseur et de la disposition sur la performance thermique des bâtiments dans un climat chaud et sec. Les résultats ont montré que l'on obtenait de meilleures performances en plaçant l'isolant sur le côté extérieur de l'enveloppe du bâtiment. Dans une étude récente, Taleb et Sharples ont évalué la consommation d'énergie d'un complexe d'appartements dans les conditions climatiques de Djeddah, en Arabie Saoudite. Ils ont utilisé DesignBuilder, un logiciel de simulation énergétique de bâtiment basé sur EnergyPlus. Il a été estimé qu'en améliorant l'isolation thermique, en utilisant des vitrages plus efficaces et en installant des dispositifs d'ombrage extérieurs, on pourrait réduire la consommation d'énergie de plus de 30%. En résumé, on peut conclure que l'on s'intéresse de plus en plus à la détermination de l'emplacement optimal des couches d'isolation et de masse thermique dans les murs des bâtiments.

## CHAPITRE 2

---

### Etude expérimentale

---

L'objectif de notre mémoire est de recueillir et de traiter les données mesurées à partir des capteurs (de température, d'humidité, de radiation solaire) installés. Au sein de ce chapitre nous exposerons le descriptif de notre bâtiment expérimental, l'environnement climatique, l'instrumentation réalisé sur le dit bâtiment et par la fin la méthode de calcul utilisé pour la détermination du flux intérieur.

## 2.1 Descriptif de l'expérimentation

### 2.1.1 Bâtiment expérimental

Les études ont été menées sur un bâtiment pilote dans l'enceinte de 2IE a Kamboisé. Le bâtiment servant d'expérimentation est une pièce de superficie  $10 \text{ m}^2$  ayant une forme rectangulaire (voir figure 2.1). L'entrée principale du bâtiment est orientée  $328^\circ$  Nord. Le mur du bâti est construit avec des briques de terre comprimées. Le toit en double pente est en tôle d'acier galvanisé avec comble. Les fenêtres sont aux nombre de deux et vitrés de dimensions  $1,20 \times 1,00 \text{ m}$ .

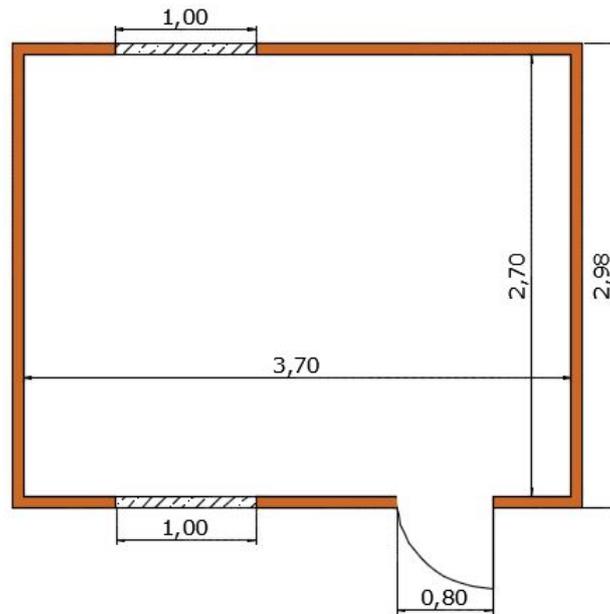


FIGURE 2.1 – Vue en plan du bâtiment pilote

## 2.1.2 Environnement climatique

### 2.1.2.1 2.1.2.1 Station météorologique

Les données météorologiques qui ont été mesurées dans le présent projet sont issues de la station météo sur le site de l'Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Les données qui ont été cependant recueillis durant l'expérimentation sont celle de l'ensoleillement. L'ensoleillement, aussi appelé insolation, est la mesure du rayonnement solaire que reçoit une surface au cours d'une période donnée, s'exprimant en mégajoules par mètre carré ( $Mj/m^2$ ) ou en watts-heures par mètre carré ( $Wh/m^2$ ). On distingue différents types de rayonnement solaire (figure 2.2) à savoir :

- Le **rayonnement direct**  $I_d$  est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications ;
- Le **rayonnement diffus**  $I_b$  est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère ;
- Le **rayonnement réfléchi**  $I_r$  est à prendre compte seulement dans le cas d'une surface inclinée. Il est proportionnel au rayonnement global ;
- Le **rayonnement global**  $I_G$  qui est la somme du rayonnement direct et du diffus lorsque la surface est horizontale. Pour une surface ayant une inclinaison  $\beta$  par rapport à l'horizontale et un angle azimutal  $\gamma$  le rayonnement global est la somme du diffus, du direct et du réfléchi [15].

$$I_G = I_b + I_d \quad (2.1)$$

$$I_G = I_b + I_d + I_r \quad (2.2)$$

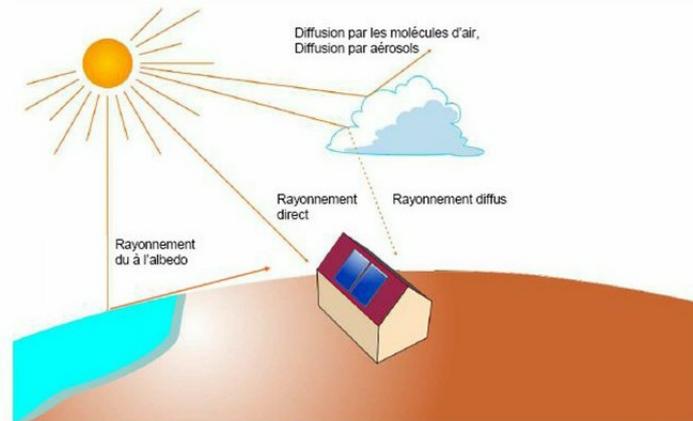


FIGURE 2.2 – Les composants du rayonnement solaire

### 2.1.2.2 2.1.2.1 Absorption solaire

L'absorption solaire est le phénomène naturel grâce auquel la matière capture les photons du rayonnement solaire et les transforme en chaleur. Le coefficient d'absorption d'une surface est la capacité de cette surface à absorber l'énergie radiante incidente, exprimée par un nombre compris entre 0 et 1. La détermination de l'absorptivité solaire dans ce présent projet a été mesurée via un capteur placé sur la façade Est de deux matériaux : la BTC et le parpaing. La formule 2.3 permet de calculer l'absorptivité solaire ou le coefficient d'absorption

$$\alpha = he \cdot \frac{\theta_{e,eq} - \theta_{a,e}}{I} \quad (2.3)$$

$\Theta_{e, eq}$  = température équivalente (K)

$\Theta_{a, e}$  = température de l'air (K)

$he$  = coefficient de convection ( $W/m^2.K$ )

$I$  = rayonnement solaire ( $W/m^2$ )

### 2.1.2.3 2.1.2.3 Les principaux paramètres climatiques

Le climat est l'ensemble des conditions météorologiques moyennes qui règnent sur une région donnée durant une longue période ; il est l'une des principales données de la morphologie des systèmes architecturaux et urbains. A cet effet il est reconnu qu'une bonne connaissance des phénomènes climatologiques, ses variables, ainsi que leur utilisation de manière judicieuse, pourraient être d'un grand apport aux conditions de confort en générale, et particulièrement le confort des espaces intérieurs[16].

On peut distinguer un ensemble d'éléments, et de facteurs climatiques :

- Facteurs énergétiques : rayonnement, lumière, et température.
- Facteur hydrologique : précipitations, et hygrométrie.
- Facteurs mécaniques : vents, et enneigements.

Les principaux éléments climatiques à considérer dans la conception d'un bâtiment en particulier, et qui influent sur le confort humain sont :

- **Le rayonnement solaire** : Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est exprimé en  $W/m^2$ .
- **La température** : La température est une mesure numérique d'une chaleur, sa détermination se fait par détection de rayonnement thermique ou par le comportement de la masse d'un matériau thermométrique. Elle est exprimée en Degré Celsius, en Kelvin ou en Fahrenheit.
- **L'humidité** : L'humidité est la vapeur d'eau contenue dans l'air. Elle est exprimée en pourcentage.
- **Le vent** : Le vent désigne le mouvement horizontal de l'air. Sa mesure comprend deux paramètres : la direction et la vitesse. Il est exprimé en Km/h ou m/s.

#### 2.1.2.4 2.1.2.4 Le climat du Burkina Faso

Le Burkina Faso est un pays enclavé d'une superficie de 274 200 km<sup>2</sup> situé au Cœur de l'Afrique de l'Ouest. Du fait de sa position géographique son climat est de type soudano sahélien caractérisé par une saison pluvieuse et une saison sèche. Il est essentiellement traversé par 3 zones climatiques qui sont : la zone sahélienne au nord, la zone nord soudanienne au centre, la zone sud soudanienne au sud. Pays entièrement continental, le Burkina Faso se trouve à la lisière du Sahara et prédisposé à une forte variabilité diurne et inter-annuelles des éléments climatiques. Les paramètres tel que le rayonnement, l'insolation, la température, l'humidité relative, la pluviométrie, le vent caractérisent ce climat. La température est l'un des paramètres qui impact le plus sur le confort des usagers de l'habitat avec une forte variabilité spatio temporelle dont la moyenne est comprise en général entre 28 °C et 42 °C durant les mois de Mars et Avril [17]. Ci-dessous, la figure 2.3 résume les données des températures mensuelles moyennes dans la ville de Ouagadougou de 1945 à 2018.

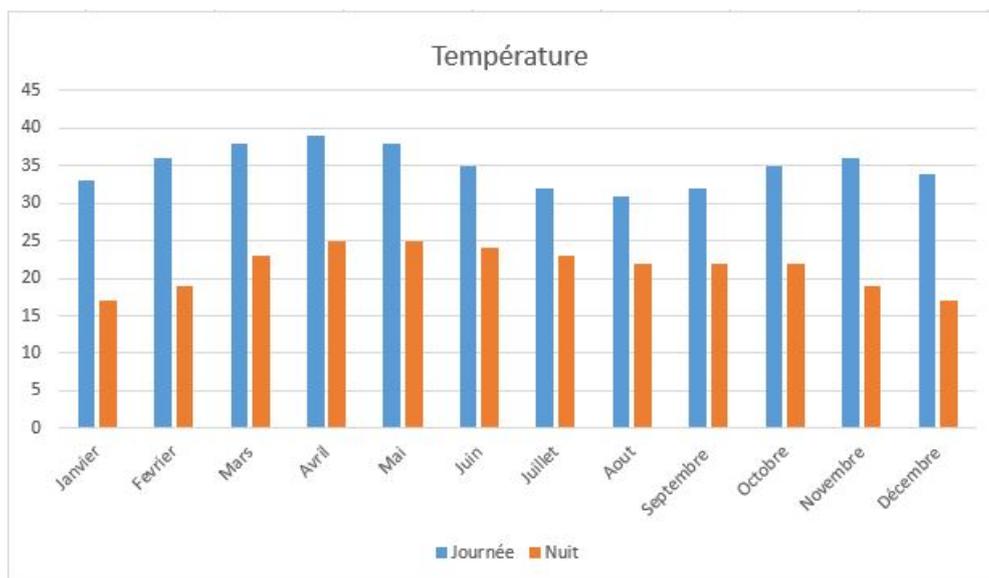


FIGURE 2.3 – Températures mensuelles moyennes de Ouagadougou (jour et nuit) de 1945-2018 extrait de <http://hikersbay.com/climate/burkinafaso/ouagadougou?lang=fr>

### 2.1.3 Instrumentation

Le bâtiment expérimenté dans le présent projet est un local BTC. Dans le but de mesurer les températures dudit bâtiment nous avons en premier lieu décidé d'instrumenter le local BTC avec des capteurs, ensuite nous avons instrumenter également avec ces mêmes capteurs ce même local en ajoutant à la paroi BTC un isolant extérieur en laine de verre protégé par du contreplaqué (voir figure 2.4).

Pour instrumenter notre bâtiment pilote nous avons eu à placer en premier lieu les capteurs de températures encore appelés thermopuces à une hauteur de 1 m 05 au-dessus du sol sur chaque face des murs extérieurs comme intérieurs par des morceaux de laine de verre dont l'ensemble a été relié par du ruban adhésif pour les deux systèmes instrumentés ainsi que sur les panneaux en contreplaqué servant de protection de notre isolant ; ensuite nous avons placés 2 hydropuces pour les mesures d'humidité , dont un hydropuce à l'intérieur du local accroché à une potence et l'autre à l'extérieur dans une petite cage en bois. Les capteurs que nous avons utilisés sont de type "TG" pour les mesures de températures et "TH" pour les mesures d'humidité avec une mémoire permettant le stockage de données. La récolte des données a été effectué via le logiciel de contrôle des mesures « **Warito II** ».

Durant la période de notre expérimentation nous avons soumis le bâtiment instrumenté avec de l'isolant à trois stratégies pendant une semaine chacune. Il s'agit de : la fermeture totale du local en premier lieu, ensuite nous avons expérimenté la ventilation nocturne (qui consiste à l'ouverture et fermeture des fenêtres) et par la fin nous avons terminé par la ventilation continue (qui consiste à l'ouverture continue des fenêtres).

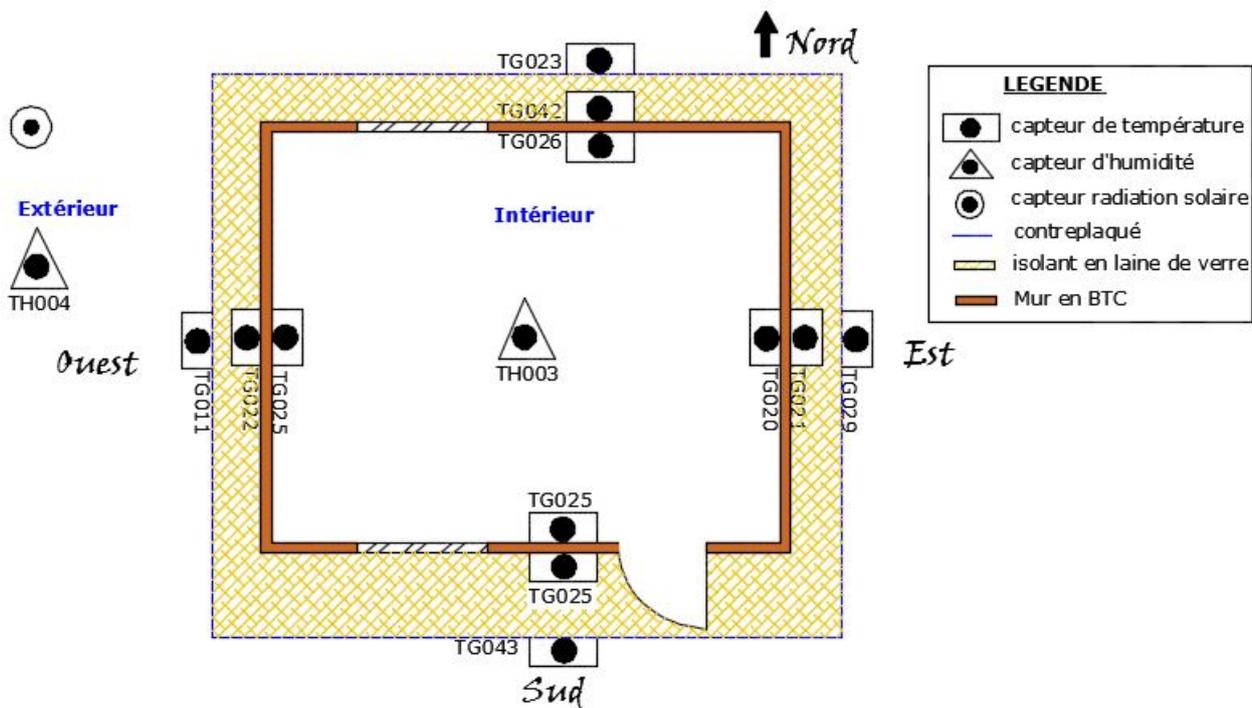


FIGURE 2.4 – Instrumentation du bâtiment pilote (isolant extérieur + BTC intérieur)

## 2.2 Expression du flux de chaleur

### 2.2.1 Notion de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur encore appelé transfert thermique est défini comme de l'énergie thermique en transit entre deux systèmes dû à une différence de température. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Il existe essentiellement trois modes de transmission de la chaleur : conduction, convection et rayonnement (voir figure 2.5).

#### 2.2.1.1 2.2.2.1 La conduction

La conduction est la transmission d'énergie de proche en proche dans la partie solide d'un matériau. La chaleur se propage avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques (résistances thermiques) et la géométrie du matériau [18].

La chaleur qui passe à travers un mur d'épaisseur  $e$ , de surface  $S$  et de conductivité  $\lambda$  est défini par la formule suivante en régime permanent :

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \left( \frac{\Delta T}{e} \right) \quad (2.4)$$

$Q$  est la quantité de chaleur qui passe dans le mur en watts

$S$  est la surface du solide traversée par la chaleur en  $m^2$

$\lambda$  est appelé coefficient de conductivité thermique du solide en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

#### 2.2.2.2 La convection

La convection est un mécanisme de transfert de chaleur propre aux fluides (gaz ou liquide). Au contact d'un élément chaud le fluide, de l'air par exemple, se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact duquel il perd sa chaleur créant ainsi un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les 2 éléments [18].

La quantité de chaleur  $Q$  est défini comme suit :

$$Q = h \cdot S \cdot (T1 - T2) \quad (2.5)$$

$Q$  est la quantité de chaleur échangée entre le mur et le fluide en watts

$S$  est la surface du mur sur laquelle la convection a lieu en  $m^2$

$h$  est appelé coefficient de convection thermique en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

#### 2.2.2.3 Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur d'un élément à un autre par onde électromagnétique sans contact direct. Ce type de transfert ne nécessite pas de support matériel il peut se produire même dans le vide [18].

La chaleur rayonnée est définie par la formule suivante :

$$Q = \epsilon \cdot S \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.6)$$

Q est la quantité de chaleur rayonnée en watts

S est la surface qui rayonne en m<sup>2</sup>

$\epsilon$  est le coefficient d'émission appelé aussi émissivité compris entre 0 et 1

$\sigma$  est appelé constante de Stephan Boltzman ( $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ )

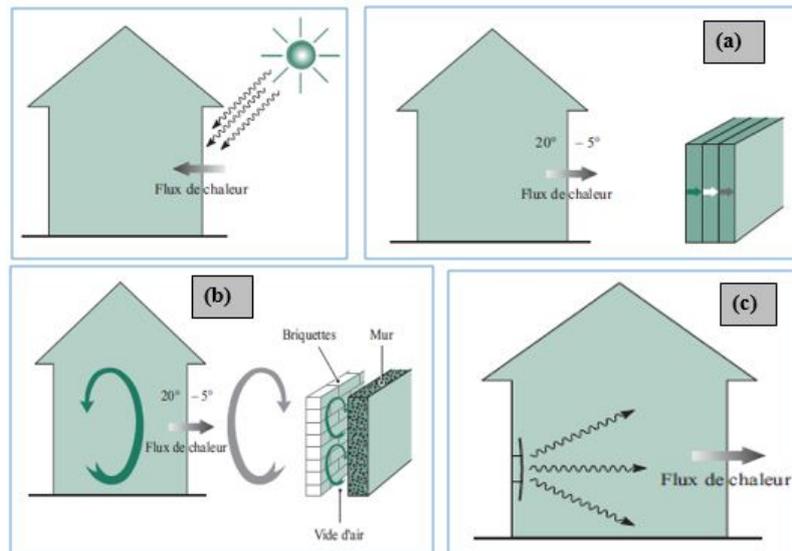


FIGURE 2.5 – Les modes de transfert de chaleur dans un bâtiment; (a) : Transfert de chaleur par conduction; (b) : Transfert de chaleur par convection; (c) : Transfert de chaleur par rayonnement

## 2.2.2 Détermination du flux intérieur

Dans le but d'atteindre notre objectif qui est de recueillir et de traiter les données mesurées de notre bâtiment pilote nous avons eu à calculer le flux intérieur de nos différents parois (façades) à partir des mesures enregistrés par nos capteurs qui nous à permis de représenter le graphe de l'évolution du flux intérieur en fonction de la variation de température pour l'isolant extérieur + BTC intérieur. Pour calculer le flux à l'intérieur de notre bâtiment pilote nous avons utilisé la formule de l'équation 2.7 constitué d'inconnues  $Z_{11}$  et  $Z_{12}$  appelés **matrices de transfert de chaleur** suivant la norme ISO 13786 [19].

Le flux de chaleur qui passe à travers notre paroi est défini en régime transitoire par la formule suivante :

$$Q_{int} = \frac{T_{S1} - Z_{11} \cdot T_{S2}}{Z_{12}} \quad (2.7)$$

$T_{S1}$  et  $T_{S2}$  sont respectivement la température de surface intérieur et la température de surface extérieur.

$Z_{11}$  et  $Z_{12}$  sont les matrices de transfert de chaleur.

L'expression de la matrice de transfert de notre paroi BTC est défini comme suit par la norme ISO 13786 :

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{s.int} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_{s.ext} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A = D = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \quad (2.8)$$

$$B = \frac{-\delta}{2\lambda} \cdot [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j(\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi))] \quad (2.9)$$

$$C = \frac{\lambda}{\delta} \cdot [\sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j(\cosh(\xi) \sin(\xi) + \sinh(\xi) \cos(\xi))] \quad (2.10)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\pi \cdot \rho \cdot c}} \quad (2.11)$$

T : est la période en s;  $\lambda$  : est la conductivité du matériau en W/m.K;  $\rho$  : est la densité du matériau en Kg/m<sup>3</sup>; c : est la chaleur spécifique en J/Kg.K

$$\xi = \sqrt{\frac{e}{\delta}} \quad (2.12)$$

avec e l'épaisseur du matériau en m.

$$\begin{pmatrix} 1 & R_{s.int} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

est la matrice du BTC.

$$\begin{pmatrix} 1 & R_{s.int} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & R_{s.ext} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

sont les matrices élémentaires.

## CHAPITRE 3

---

### Résultats et discussions

---

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de l'expérimentation de notre bâtiment pilote et de l'absorptivité solaire ainsi que leurs analyses et interprétations.

### 3.1 Comparaison entre le BTC et l'isolant extérieur + BTC

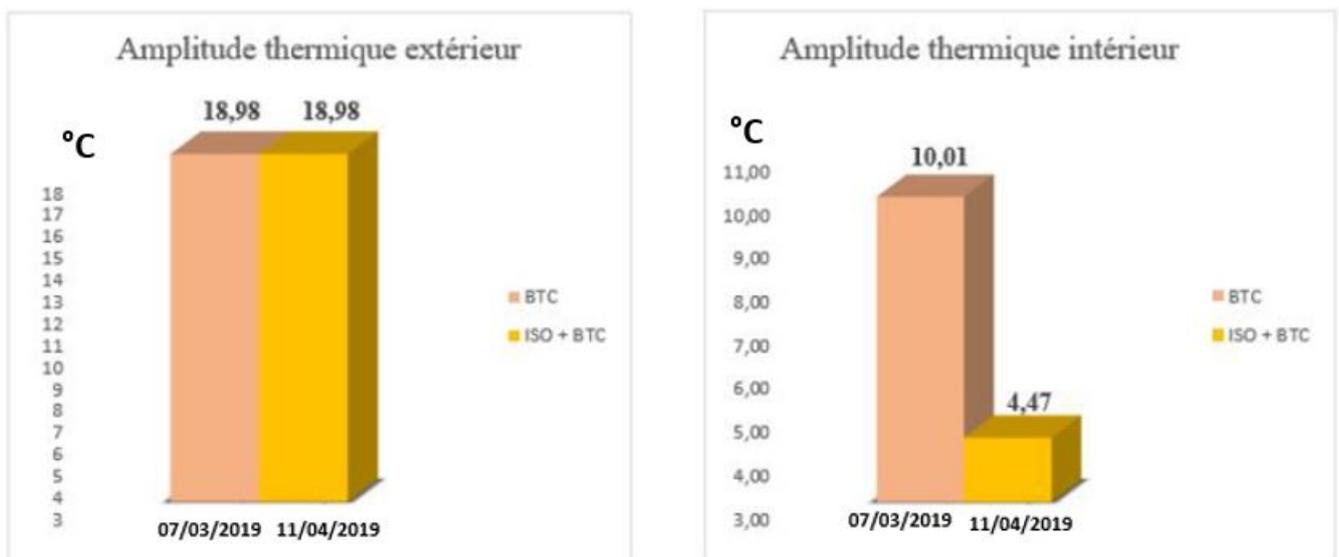


FIGURE 3.1 – Amplitude thermique extérieur et intérieur du BTC et de l'isolant extérieur + BTC

Les amplitudes thermiques (différence entre les températures maximales et minimales) de la masse thermique (BTC simple) et de l'isolant associé à la masse thermique (isolant extérieur

+ BTC) sont présentées à la figure 3.1.

Les résultats obtenues nous montrent une diminution de température à l'intérieur quelle que soit l'amplitude à l'extérieur. En effet nous remarquons une baisse de température plus prononcée à l'intérieur (environ 6 °C) lorsqu'on associe l'isolant à la paroi BTC. Cet écart observé est dû à la résistance thermique de l'isolant qui atténue le flux de chaleur issu du rayonnement solaire de pénétrer le bâtiment. La forte inertie des parois est donc l'aspect à rechercher afin de créer un plus grand déphasage thermique entre l'extérieur et l'intérieur.

En conclusion des résultats obtenues, on peut dire que l'ajout de l'isolant à une paroi réduit considérablement la température à l'intérieur d'un bâtiment et contribue à l'amélioration du confort thermique.

### 3.2 Stratégies de l'isolant extérieur + BTC

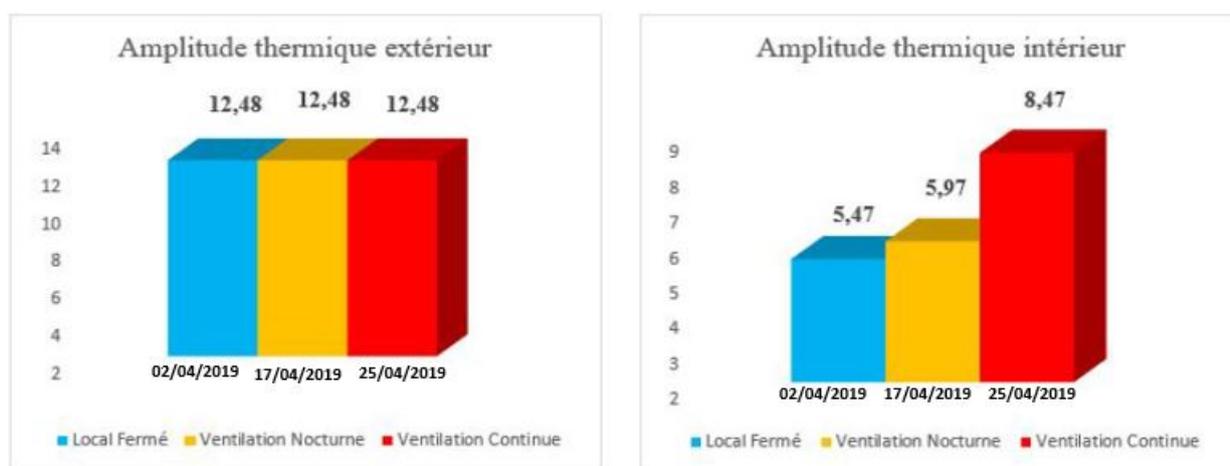


FIGURE 3.2 – Amplitude thermique extérieure et intérieure des différentes stratégies de ventilation de l'isolant extérieur + BTC

La figure 3.2 ci-dessus présente les amplitudes thermiques de l'air extérieur et intérieur des différentes stratégies de l'ajout de l'isolant au BTC. Les résultats obtenues nous montrent une diminution de température à l'intérieur quelle que soit l'amplitude à l'extérieur. Nous remarquons une différence d'amplitude thermique à l'intérieur entre les trois stratégies utilisées. La température de la stratégie de fermeture total du local est en effet plus faible que la stratégie de la ventilation nocturne à l'intérieur avec un écart de 0,5 °C par contre pour la stratégie de la ventilation continue nous observons une hausse de température qui peut s'expliquer par la température extérieure qui est élevée à tout moment pendant cette période de l'année. La stratégie de ventilation continue n'est pas adéquate et est à éviter pendant les moments de pics (Mars, Avril, Mai) au profit de la ventilation artificielle pour une meilleure atteinte du confort. En conclusion on peut dire que la stratégie de fermeture du local est idéale à la contribution de l'amélioration du confort thermique dans le bâtiment.

### 3.3 Flux entrant

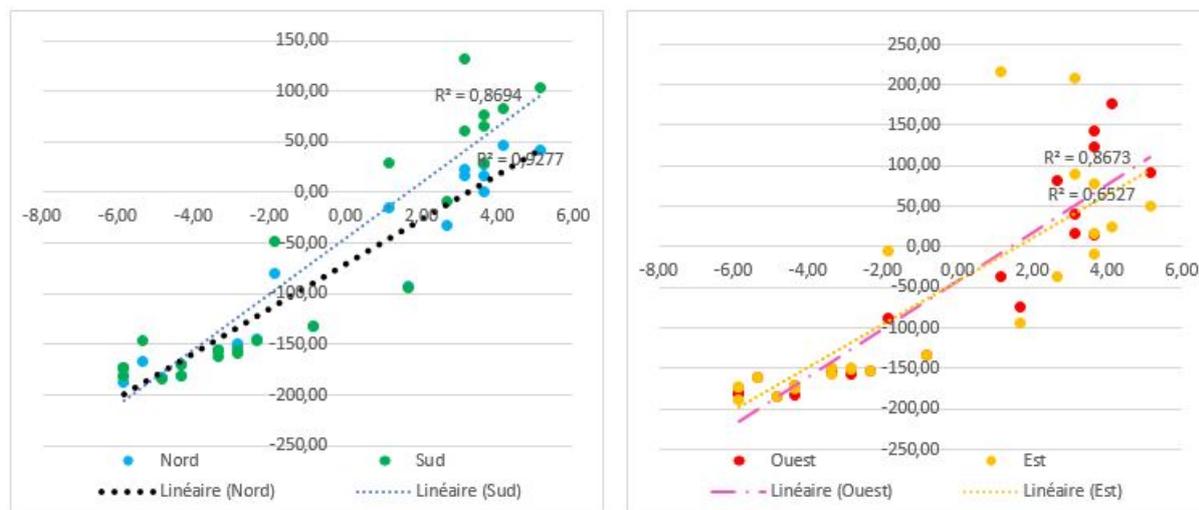


FIGURE 3.3 – Représentation graphique du flux intérieur

Paroi	Gain de chaleur
Nord	172,49 w
Sud	580,09 w
Ouest	684,85 w
Est	684,06 w

TABLE 3.1 – Gain de chaleur

La figure 3.3 et le tableau 3.1 présente les flux de chaleur et gain de chaleur d'une journée des différents parois (façades) de notre bâtiment pilote.

La droite de régression entre les variables flux et température montre pour les parois Sud, Ouest et Nord une bonne corrélation entre elles (les droites de régression sont en effet proches de l'origine et les points du nuage sont également bien répartis aux alentours des droites) en témoigne les coefficients de corrélation respectifs de 0,93 ; 0,86 et 0,87 pour les parois Nord, Sud et Ouest. Le flux évolue en effet en fonction du temps c'est-à-dire qu'il évolue en fonction des températures connues pour être à des valeurs données à des heures données. Pour ce qui est de la paroi Est, elle montre une corrélation plus faible (0,65) par rapport aux autres ; les points du nuage sont en effet assez-mal répartis autour de la droite de régression, confirmant ainsi le statut atypique de cette paroi par rapport aux autres.

En effet, les valeurs positives et négatives indiquent respectivement l'entrée de flux et les pertes de chaleur dans les différentes parois. D'après le graphe nous remarquons que les faces les plus exposés (ayant plus de gains de chaleur) sont les faces Est, Ouest et Sud qui est remarqué par des nombres élevés de flux positives. Egalement nous remarquons sur le tableau 3.1 que le maximum des gains journalier est enregistré au niveau des faces Sud, Est et Ouest (plus grands

valeurs de flux positives) par contre au niveau de la paroi Nord on enregistre un minimum de gain (plus faibles valeurs de flux positives). Ces gains peuvent s'expliquer respectivement par l'apport de rayon incident direct sur les parois Est, Ouest, Sud et de rayons diffus sur la paroi Nord.

Par ailleurs les déperditions sur le graphe sont plus remarquées du côté Est et Sud mais beaucoup plus accentué sur la paroi Sud.

En conclusion des résultats que nous avons obtenu nous pouvons dire que la paroi Nord est la paroi qui fait passer moins de flux de chaleur.

### 3.4 Absorptivité solaire

Matériaux	Température équivalente (K)	Température de l'air (K)	Coefficient de convection ( $W/m^2.K$ )	Rayonnement ( $W/m^2.K$ )	Absorption
BTC	323,79	310,64	12	197,94	<b>0,64</b>
Parpaing	322,29	310,64	12	197,94	<b>0,52</b>

TABLE 3.2 – coefficient d'absorption

Le tableau ci-dessus nous montre les résultats du calcul du coefficient d'absorption de deux matériaux (BTC et parpaing) .

Le coefficient d'absorption obtenu dans ce tableau est calculé à partir de l'équation 2.3 est fonction essentiellement de quatre paramètres : la température de surface, la température de l'air, le rayonnement et le coefficient de convection. En considérant un temps de déphasage du BTC et du parpaing nous avons obtenu par calcul un coefficient d'absorption qui est égale à 0,64 pour le BTC et 0,52 pour le parpaing. Ces coefficients sont en conformité à ceux de la littérature.

En effet, dans la littérature le coefficient d'absorption solaire est lié à la couleur du matériau et est de 0,6 par défaut pour les couleurs tel que le gris clair et le rouge sombre que sont nos matériaux.

En conclusion des résultats obtenues nous pouvons dire que les valeurs d'absorption calculés sont quasiment proche de la littérature.

---

## CONCLUSION

---

Ce travail avait pour objectif l'étude de l'impact d'une résistance thermique associée au BTC pour l'amélioration du confort thermique d'un bâtiment pilote situé dans l'enceinte de 2IE dont le climat est chaud.

Une première partie de notre étude a consisté à identifier les différents matériaux locaux pour construire ainsi que de potentiels isolants en ajout à une paroi pour améliorer la performance thermique d'un bâtiment.

Une seconde partie a été consacrée à l'étude expérimentale du bâtiment pilote pour l'évaluation du comportement thermique qui a consisté en un suivi de mesures de température du bâtiment par le biais des capteurs. Trois stratégies ont été effectuées à savoir : la fermeture totale du local, la ventilation nocturne et la ventilation continue. L'objectif de ces stratégies était d'améliorer la température de l'air à l'intérieur du bâtiment.

Outre l'étude expérimentale nous avons déterminé le flux de chaleur à l'intérieur du bâtiment ainsi que l'absorption solaire du BTC et du parpaing. De cette étude, nous retenons que l'utilisation d'un isolant en ajout à une paroi BTC réduit la température interne de notre bâtiment. Aussi, le suivi expérimental des trois stratégies effectuées ont permis de constater que la stratégie de fermeture du local est la meilleure stratégie permettant l'amélioration la température de l'air intérieur. D'autres part, l'analyse du graphe du flux en fonction de la différence de température et du tableau de gain de chaleur nous ont permis de conclure que la paroi Nord fait passer moins de flux par rapport aux autres parois. Par ailleurs la détermination de l'absorptivité qui est de 0,64 pour le BTC et 0,52 pour le parpaing sont proches de la littérature. Ainsi, comme perspectives, les possibilités suivantes pourraient être nécessaires pour compléter ce travail :

- Identifier les impacts des positions des couches (isolant et masse thermique) sur le climat intérieur en instrumentant le bâtiment pilote par l'isolation des murs par l'intérieur ;
- Mettre en évidence la stratégie de fermeture du local et la ventilation nocturne pour améliorer la qualité de l'air intérieur du bâtiment pilote.

---

## Bibliographie

---

- [1] L Courard. Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en Ingénieur Civil Architecte par Jehanne PAULUS. page 227.
- [2] Basile Kéré. Architecture et cultures constructives du Burkina Faso, May 1995.
- [3] Pierre DELOT. Les adobes, January 2015.
- [4] Hachem CHAIB. Contribution à l'étude des propriétés thermo mécaniques des briques en terre confectionnée par des fibres végétale locale. (Cas de la ville de Ouargla).Thèse en vue de l'obtention du Doctorat.page 142, January 2017.
- [5] Kéré Francis. Recherche architecturale introduit comme questionnement climatique en Afrique.Mémoire de Master.page 47, January 2013.
- [6] Michel Martin. L'ADOBETON UNE TECHNOLOGIE APPROPRIÉE POUR UN HABITAT ECONOMIQUE AMELIORE. page 11.
- [7] Jacky Jeannet and Patrice Doat. Rénover et construire en pisé. page 24.
- [8] Cellule de recherche Architecture et Climat. Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines, July 2010.
- [9] Modeste Kameni Nematchoua, Chrysostôme R.R. Raminosa, Ramaroson Mamiharijaona, Tchinda René, José A. Orosa, Watis Elvis, and Pierre Meukam. Study of the economical and optimum thermal insulation thickness for buildings in a wet and hot tropical climate : Case of Cameroon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50 :1192–1202, October 2015.
- [10] ADIL DU LOIRET. Guide isolation thermique.page 19.
- [11] Mustapha DIDA. Contribution à l'étude de l'effet d'isolation thermique sur la consommation énergétique des bâtiments.Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Master en Génie Energétique.page 88, June 2016.

- [12] Francesco Asdrubali. A review of unconventional sustainable building insulation materials. page 17, 2015.
- [13] A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, and J.D. Hardy. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 1(1) :1–20, June 1967.
- [14] Madi Kaboré. Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne. page 193.
- [15] Samira Mouhous-Chaouchi. Mémoire de Magister. page 82.
- [16] Abdessalam MEKHERMECHE. Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes.Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Master en Génie Civil.page 131.
- [17] Ministère de l'environnement et du cadre de vie. Programme d'action nationale d'adaptation a la variabilité et aux changements climatiques au Burkina Faso. page 84.
- [18] Saint-Gobain. Introduction a la thermique du batiment.
- [19] Par Emmanuel Ouedraogo. Docteur de l'Université de Ouagadougou. page 192.

---

## ANNEXES

---

### ANNEXE 1 : Image des capteurs du bâtiment pilote



FIGURE 3.4 – Intérieur du bâtiment pilote avec des capteurs mesurant la température



FIGURE 3.5 – Thermopuces et HygroPuces sur porte-clés fixe avec un lecteur thermopuce

## ANNEXE 2 : Caractéristiques des capteurs

<b>waranet</b>		<b>CONSTAT DE VERIFICATION</b>				
		N°: 2013 10	00000031AFD321 - TG043			
Instrument vérifié :	Thermo Puce	Fabriq. :	Waranet Solutions			
Modèle :	DS1921G	N° série :	00000031AFD321 - TG043			
Matériel associé :		N° série :				
		Compteur de mesures :	2916			
Identification client :	2IE					
Date de vérification :	02/10/2013	Prochaine vérif. conseillée :	02/10/2014			
<b>Corrections appliquées :</b>		Pente :	Sans objet			
		Origine :	Sans objet			
Environnement Température ambiante : 22 ± 5 °C / Humidité relative : 50 ± 10 %HR						
<b>Etalons utilisés</b>		Modèle	N° série			
Thermomètre Id. 1	P650	65 005 060 544				
Sonde T°	PT100	05038				
		<b>Raccordement des étalons</b>				
		Numéro	Date			
		LNE/P105998-1	05/04/2013			
<b>Bains Utilisés</b>		Lauda RM6	Julabo HC			
		NesLab RTE 140				
<b>Résultats du contrôle</b>						
Température de Vérification en °C	Profondeur Immersion	Mesure moyenne	Ecart Constaté	Incertitude Vérif. U (1)	Incertitude Instrum. U (2)	Critères d'acceptation
0.09	100 mm	0.07	-0.02	0.04	0.36	0.36
30.12	100 mm	30.09	-0.03	0.04	0.36	0.36
70.08	100 mm	70.09	0.01	0.04	0.36	0.36
Point de Vérification en % HR	Mesure moyenne	Ecart Constaté	Incertitude Vérif. U (1)	Incertitude Instrum. U (2)	Critères d'acceptation	
<b>Valeurs d'ajustage Température</b>				<b>Valeurs d'ajustage Humidité</b>		
Références Température en °C	Mesures Brutes	Références Humidité en % HR	Mesures Brutes			
-0.93	-1.00					
31.09	31.00					
71.08	71.50					
<p>(1) : Incertitude élargie de la chaîne de vérification pour k = 2.                  (2) : Incertitude élargie de l'instrument de mesure vérifié pour k = 2.</p> <p>Les unités de mesure sont exprimées en °C et en % HR                  Les valeurs moyennes sont obtenues par minimum 10 lectures consécutives espacées au moins de 1 minute.                  La chaîne complète de mesure, Sonde + Transmetteur radio ou Datalogger + logiciel est mise en œuvre.                  Ecart Constaté = Moyenne (lectures) – Moyenne (T° ou HR% de vérification).                  Procédures utilisées : Température / V6 Humidité / V5                  Leurs contenus peuvent vous être communiqués sur demande.</p>						
<b>Cet appareil est</b>		CONFORME	X			
		NON-CONFORME				
		NECESSITE UN AJUSTAGE				
<p>Les procédures et les calculs d'incertitudes répondent aux exigences des normes EN 13005 et ISO 17025.                  Ce document est délivré sous la responsabilité de WaraNet Solutions SAS.</p> <p><b>Ce constat comprend 1 page, il ne peut être reproduit que dans sa totalité.</b></p>						
Opérateur : Julien		Signature :				
Responsable : Jean-Pierre Bascou						
Constat de vérification Température / Humidité NF X 07-011 <b>Waranet-Solutions SAS</b> 13, bd Roquelaure 32000 AUCH France						
édité le : 03/10/2013 Tel 33 (0)5 62 60 05 93 info@waranet.fr N°Intra FR 90 517 641 593		13 bd Roquelaure 32000 AUCH (France) Tel : +33 (0)5 62 60 05 93 Siret : 517 641 593 00028				
Page 1 / 1						

FIGURE 3.6 – Caractéristiques technique du thermopuce

waranet		CONSTAT DE VERIFICATION					
		N°: 2013 10 000002184E141 - TH007					
Instrument vérifié :	Thermo Puce	Fabriq. :	Waranet Solutions				
Modèle :	DS1923	N° série :	000002184E141 - TH007				
Matériel associé :		N° série :					
		Compteur de mesures : 12259					
Identification client :	2IE						
Date de vérification :	02/10/2013	Prochaine vérif. conseillée :	02/10/2014				
Corrections appliquées :		Pente :	Sans objet				
		Origine :	Sans objet				
Environnement Température ambiante : 22 ± 5 °C / Humidité relative : 50 ± 10 %HR							
Etalons utilisés							
Modèle	N° série	Raccordement des étalons					
Thermomètre Id. 1	P650	65 005 060 544	Numéro				
Sonde T°	PT100	05038	Date				
			LNE/P105998-1 05/04/2013				
Hygromètre Id.5			BELAC 1304-153 26/04/2013				
Bains Utilisés							
Rotronic HC2	60250021 / sonde HC2						
Lauda RM6	Julabo HC	NesLab RTE 140					
<b>Résultats du contrôle</b>							
Température de Vérification en °C	Profondeur Immersion	Mesure moyenne	Ecart Constaté	Incertitude Vérif. U (1)	Incertitude Instrum. U (2)	Critères d'acceptation	
0.09	100 mm	0.15	0.06	0.04	0.12	0.12	
30.12	100 mm	30.12	0.00	0.04	0.12	0.12	
70.08	100 mm	70.08	0.00	0.04	0.12	0.12	
Point de Vérification en % HR	Mesure moyenne	Ecart Constaté	Incertitude Vérif. U (1)	Incertitude Instrum. U (2)	Critères d'acceptation		
3.00	3.10	0.10	0.3	2	2		
35.50	35.50	0.00	0.6	2	2		
73.40	73.30	-0.10	1.1	2	2		
99.70	99.70	0.00	1.4	2	2		
<b>Valeurs d'ajustage Température</b>				<b>Valeurs d'ajustage Humidité</b>			
Références Température en °C	Mesures Brutes	Références Humidité en % HR	Mesures Brutes				
-0.93	-0.74	5.20	6.00				
31.09	31.26	34.60	38.00				
71.08	71.15	73.40	75.50				
		99.50	98.50				
<p>(1) : Incertitude élargie de la chaîne de vérification pour k = 2.                  (2) : Incertitude élargie de l'instrument de mesure vérifié pour k = 2.</p> <p>Les unités de mesure sont exprimées en °C et en % HR                  Les valeurs moyennes sont obtenues par minimum 10 lectures consécutives espacées au moins de 1 minute.                  La chaîne complète de mesure, Sonde + Transmetteur radio ou Datalogger + logiciel est mise en œuvre.                  Ecart Constaté = Moyenne (lectures) – Moyenne (T° ou HR% de vérification).                  Procédures utilisées : Température / V6 Humidité / V5                  Leurs contenus peuvent vous être communiqués sur demande.</p>							
<b>Cet appareil est</b>		CONFORME		X			
		NON-CONFORME					
		NECESSITE UN AJUSTAGE					
<p>Les procédures et les calculs d'incertitudes répondent aux exigences des normes EN 13005 et ISO 17025.                  Ce document est délivré sous la responsabilité de WaraNet Solutions SAS.</p> <p><b>Ce constat comprend 1 page, il ne peut être reproduit que dans sa totalité.</b></p>							
Opérateur : Julien		Responsable : Jean-Pierre Bascou		Signature :			
édité le : 03/10/2013		Tel 33 (0)5 62 60 05 93		info@waranet.fr			
13 bd Roquelaure 32000 AUCH France		Siret : 517 644 593 00028		Page 1 / 1			

FIGURE 3.7 – Caractéristiques technique de l'hydropuce

### ANNEXE 3 : Image du bâtiment pilote et de la station météo



FIGURE 3.8 – Bâtiment pilote



FIGURE 3.9 – Station météo

## ANNEXE 4 : Données des mesures des différents stratégies d'amélioration du confort

	07/04/2019	08/04/2019	09/04/2019	10/04/2019	11/04/2019	07/04/2019	08/04/2019	09/04/2019	10/04/2019	11/04/2019
Heure	Temperature extérieure					Temperature intérieure				
00 h 00	35,00	32,00	31,50	31,50	27,00	35,34	33,35	34,84	34,84	34,84
01 h 00	34,00	31,00	31,00	30,50	26,50	34,34	32,85	34,34	34,84	34,34
2 h 00	33,00	30,50	30,00	29,00	27,50	33,85	32,35	34,34	34,34	33,85
3 h 00	32,50	30,00	30,50	29,50	28,00	33,35	31,85	33,85	34,34	33,85
4 h 00	32,00	30,00	30,00	29,50	24,00	32,85	30,86	33,85	33,85	33,35
5 h 00	31,00	29,50	29,50	28,50	24,50	32,35	30,86	33,35	33,85	32,85
6 h 00	29,00	29,00	28,50	28,00	23,51	32,85	30,86	33,35	33,35	32,85
7 h 00	30,50	29,50	29,50	29,50	26,00	34,34	32,85	33,35	33,35	32,35
8 h 00	33,50	30,50	32,00	33,00	33,50	34,84	33,35	33,85	33,85	33,35
9 h 00	35,50	33,00	35,00	36,00	36,00	35,34	33,85	34,34	34,34	34,34
10 h 00	37,49	35,00	37,49	37,99	37,49	35,84	34,34	34,84	35,34	34,84
11 h 00	37,99	37,49	38,49	39,99	39,49	36,33	35,34	35,34	35,84	35,34
12 h 00	39,49	38,99	40,49	40,99	41,49	36,83	35,84	35,84	35,84	35,34
13 h 00	40,49	39,99	40,99	41,49	41,49	37,33	35,84	36,33	36,83	35,84
14 h 00	40,49	40,99	42,49	42,49	42,49	37,33	36,33	36,83	36,83	36,33
15 h 00	41,49	39,99	40,99	42,49	41,99	37,83	36,33	36,83	37,33	36,83
16 h 00	40,49	40,49	40,99	42,49	41,99	37,83	36,33	36,83	37,33	36,83
17 h 00	39,99	39,49	39,99	41,49	39,99	37,33	36,33	36,83	37,33	36,83
18 h 00	38,49	37,99	38,99	39,49	38,49	37,33	35,84	36,83	36,83	36,33
19 h 00	36,99	35,50	36,99	34,00	34,00	36,83	35,84	36,33	36,33	35,84
20 h 00	35,00	35,00	35,00	33,00	32,50	35,84	35,34	35,84	35,84	35,84
21 h 00	34,00	34,00	33,50	34,50	30,50	35,34	35,34	35,84	35,84	35,34
22 h 00	33,50	32,50	31,50	33,00	29,00	34,84	35,34	35,34	35,84	34,84
23 h 00	33,00	32,50	32,50	29,00	29,00	33,85	34,84	35,34	35,34	34,84

FIGURE 3.10 – Stratégie de fermeture du local

	16/04/2019	17/04/2019	18/04/2019	19/04/2019	20/04/2019	16/04/2019	17/04/2019	18/04/2019	19/04/2019	20/04/2019
Heure	Temperature extérieure					Temperature intérieure				
00 h 00	32,50	29,00	32,50	32,00	33,00	33,35	32,35	33,85	33,35	34,34
01 h 00	30,00	29,00	31,00	30,50	34,00	32,85	32,35	33,35	33,35	33,85
2 h 00	30,00	30,00	30,50	33,00	33,50	32,35	32,35	33,35	33,35	33,85
3 h 00	30,50	29,00	30,00	31,50	32,50	31,85	31,85	32,85	32,85	32,35
4 h 00	30,00	30,50	30,50	31,50	28,50	32,35	31,85	32,35	32,35	30,86
5 h 00	30,00	31,50	30,00	31,50	23,51	31,85	31,36	32,35	31,85	27,86
6 h 00	31,50	31,00	32,00	31,00	27,00	31,85	31,36	32,35	31,36	27,36
7 h 00	32,00	31,50	32,00	32,00	28,50	32,35	31,36	31,85	31,36	29,36
8 h 00	36,00	32,50	33,50	33,00	31,00	34,34	33,35	34,34	34,34	32,85
9 h 00	37,99	34,00	35,50	35,00	32,50	34,84	34,34	35,34	34,84	33,85
10 h 00	39,99	36,00	37,99	36,00	34,00	35,34	34,84	35,84	35,34	34,34
11 h 00	41,49	37,49	39,49	36,99	35,00	35,84	35,34	36,33	36,33	34,84
12 h 00	41,99	39,99	41,99	38,49	36,50	36,33	36,33	36,83	36,83	35,34
13 h 00	43,48	40,49	42,98	39,49	37,49	36,83	36,33	37,33	36,83	35,84
14 h 00	43,48	41,49	42,49	40,99	39,49	36,83	36,83	37,83	37,33	35,84
15 h 00	42,98	40,49	42,49	40,49	39,49	37,33	37,33	37,83	37,33	36,33
16 h 00	42,49	41,49	42,49	40,49	38,99	37,33	37,33	37,83	37,33	36,33
17 h 00	40,99	40,49	41,49	39,99	37,49	37,33	37,33	37,83	37,33	36,33
18 h 00	39,49	38,99	39,99	38,49	36,50	37,83	37,33	38,32	37,33	35,84
19 h 00	36,99	37,49	36,99	36,50	35,00	36,83	36,83	37,33	36,83	34,84
20 h 00	33,50	36,00	36,00	36,00	35,00	35,34	36,33	36,33	36,33	34,84
21 h 00	31,50	34,00	33,50	34,50	34,00	34,34	35,34	35,84	35,84	33,85
22 h 00	30,50	32,50	32,50	35,00	31,00	33,35	34,84	34,84	35,34	32,35
23 h 00	30,00	33,00	31,50	34,00	30,50	33,35	34,84	34,34	34,34	31,85

FIGURE 3.11 – Stratégie de ventilation nocturne

	24/04/2019	25/04/2019	26/04/2019	27/04/2019	28/04/2019	24/04/2019	25/04/2019	26/04/2019	27/04/2019	28/04/2019
Heure	Température extérieur					Température intérieur				
00 h 00	25,50	31,00	33,00	32,50	30,00	26,9	31,4	33,8	33,8	31,9
01 h 00	25,50	31,00	32,00	34,00	31,50	27,4	30,9	32,9	34,3	32,4
2 h 00	25,50	30,50	31,50	33,50	32,00	26,9	30,9	32,4	33,8	32,9
3 h 00	25,50	30,00	31,50	33,00	30,50	27,4	30,4	32,9	33,3	31,9
4 h 00	25,50	29,00	30,50	32,50	29,50	26,9	30,4	32,4	32,9	31,4
5 h 00	25,50	28,50	29,50	31,50	29,00	27,4	29,4	31,9	31,9	31,4
6 h 00	25,50	28,50	30,50	31,00	29,00	26,9	28,9	31,4	31,4	30,4
7 h 00	26,50	29,50	31,50	32,00	30,50	26,9	29,4	31,9	31,9	31,4
8 h 00	27,50	32,00	34,50	33,50	32,50	27,4	31,4	33,3	32,4	32,4
9 h 00	29,00	34,00	36,99	35,00	34,00	27,9	32,4	34,8	33,3	33,3
10 h 00	31,50	36,00	38,49	36,99	36,00	29,4	33,3	35,8	34,8	34,3
11 h 00	32,50	38,49	39,99	37,99	37,49	30,4	34,3	36,3	36,3	35,8
12 h 00	34,00	38,99	41,49	38,99	38,99	31,4	35,3	37,8	37,3	36,3
13 h 00	35,00	39,99	42,98	40,49	39,99	32,4	36,3	38,8	38,3	37,3
14 h 00	36,50	40,99	43,48	41,49	40,99	33,3	36,8	39,3	38,3	38,3
15 h 00	36,50	40,99	43,48	42,49	41,49	33,8	37,3	39,8	38,8	38,8
16 h 00	36,50	39,99	42,98	40,99	41,49	33,8	37,3	39,8	38,8	38,3
17 h 00	36,00	39,49	41,49	40,49	40,49	33,8	36,8	39,3	38,8	38,8
18 h 00	34,50	37,99	39,99	39,99	39,49	32,9	36,3	38,3	37,8	38,3
19 h 00	33,00	36,99	36,99	37,49	37,99	32,9	35,8	37,3	37,3	37,3
20 h 00	33,50	36,99	34,00	37,49	36,50	32,9	35,8	35,8	37,3	36,3
21 h 00	32,50	35,00	34,00	31,50	35,50	32,4	34,8	35,3	32,4	35,8
22 h 00	32,00	33,00	32,00	28,00	35,00	31,9	34,3	34,8	31,4	35,3
23 h 00	31,50	33,50	31,50	29,50	34,50	31,9	33,8	34,3	30,9	34,8

FIGURE 3.12 – Stratégie de ventilation continue

## ANNEXE 5 : Détermination du flux intérieur

### - Résolution de la matrice de transfert

La formule de calcul du flux intérieur en régime transitoire est la suivante :

$$Q_{int} = \frac{T_{S1} - Z_{11} \cdot T_{S2}}{Z_{12}} \quad (3.1)$$

$T_{S1}$  et  $T_{S2}$  sont respectivement la température de surface intérieur et la température de surface extérieur.

$Z_{11}$  et  $Z_{12}$  sont les matrices de transfert de chaleur.

L'expression de la matrice de transfert de notre paroi BTC est défini comme suit par la norme ISO 13786 :

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{s.int} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_{s.ext} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A = D = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \quad (3.2)$$

$$B = \frac{-\delta}{2\lambda} \cdot [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j(\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi))] \quad (3.3)$$

$$C = \frac{\lambda}{\delta} \cdot [\sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j(\cosh(\xi) \sin(\xi) + \sinh(\xi) \cos(\xi))] \quad (3.4)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\pi \cdot \rho \cdot c}} \quad (3.5)$$

$T$  : est la période en s;  $\lambda$  : est la conductivité du matériau en W/m.K;  $\rho$  : est la densité du matériau en Kg/m<sup>3</sup>;  $c$  : est la chaleur spécifique en J/Kg.K

$$T = 86400 \text{ s}; \lambda = 1 \text{ W/m.K}; \rho = 1921,6 \text{ Kg/m}^3; c = 1002,5 \text{ J/Kg.K}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{e}{\delta}} \quad (3.6)$$

avec  $e$  l'épaisseur du matériau en m. Ici  $e = 0,14 \text{ m}$

$$\begin{pmatrix} 1 & R_{s.int} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

est la matrice du BTC.

$$\begin{pmatrix} 1 & R_{s.int} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & R_{s.ext} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

sont les matrices élémentaires.

$$A=D= 0,687 + 1,344i; B= -0,131 - 0,063i; C= 8,895 - 18,384i$$

$Z_{11} = A + R_{\text{sext}} * C$	$Z_{12} = (A + R_{\text{sext}} * C) * R_{\text{sint}} + B + R_{\text{sext}} * D$	$Z_{21} = C$	$Z_{22} = C * R_{\text{sint}} + D$
1,20	0,076	20,42	2,11

TABLE 3.3 – Valeurs de la matrice de transfert

- Données du flux intérieur

	TS2	TS1	Text	Tint	Delta	Q2
00:00:00	34,55	30,14	31,00	33,85	-2,85	-148,89
01:00:00	34,55	29,64	30,50	33,85	-3,35	-155,47
02:00:00	34,55	29,64	30,50	33,85	-3,35	-155,47
03:00:00	34,55	27,64	29,00	33,35	-4,35	-181,81
04:00:00	34,05	27,14	27,50	33,35	-5,85	-180,59
05:00:00	34,05	26,64	27,00	32,85	-5,85	-187,18
06:00:00	33,56	27,14	27,00	32,85	-5,85	-172,80
07:00:00	33,56	27,64	27,50	32,85	-5,35	-166,22
08:00:00	33,56	34,14	31,50	33,35	-1,85	-80,66
09:00:00	33,56	39,14	35,00	33,85	1,15	-14,87
10:00:00	34,05	42,14	37,49	34,34	3,15	16,81
11:00:00	34,05	42,14	38,49	34,84	3,65	16,81
12:00:00	34,55	43,14	38,99	35,84	3,16	22,17
13:00:00	34,55	44,64	40,99	35,84	5,15	41,91
14:00:00	35,04	45,64	40,49	36,33	4,16	47,27
15:00:00	35,04	44,14	39,99	36,33	3,66	27,53
16:00:00	35,53	42,64	39,99	36,33	3,66	0,00
17:00:00	35,53	40,14	38,99	36,33	2,66	-32,89
18:00:00	35,53	35,64	37,49	35,84	1,66	-92,11
19:00:00	35,53	32,64	34,50	35,34	-0,84	-131,58
20:00:00	35,53	31,64	33,00	35,34	-2,34	-144,74
21:00:00	35,53	31,14	32,00	34,84	-2,84	-151,32
22:00:00	35,04	29,14	30,50	34,84	-4,34	-169,85
23:00:00	35,04	28,14	29,50	34,34	-4,84	-183,02

FIGURE 3.13 – Flux intérieur de la paroi Nord

	TS2	TS1	Text	Tint	Delta	Q2
00:00:00	34,55	29,59	31,00	33,85	-2,85	-156,25
01:00:00	34,55	29,09	30,50	33,85	-3,35	-162,84
02:00:00	34,06	29,09	30,50	33,85	-3,35	-155,02
03:00:00	34,06	27,09	29,00	33,35	-4,35	-181,36
04:00:00	34,06	27,09	27,50	33,35	-5,85	-181,36
05:00:00	33,56	27,09	27,00	32,85	-5,85	-173,54
06:00:00	33,56	27,09	27,00	32,85	-5,85	-173,54
07:00:00	33,07	28,59	27,50	32,85	-5,35	-145,98
08:00:00	33,07	36,03	31,50	33,35	-1,85	-48,11
09:00:00	33,56	42,45	35,00	33,85	1,15	28,53
10:00:00	33,56	44,91	37,49	34,34	3,15	61,01
11:00:00	34,06	45,90	38,49	34,84	3,65	66,19
12:00:00	34,06	50,84	38,99	35,84	3,16	131,15
13:00:00	34,55	49,36	40,99	35,84	5,15	103,85
14:00:00	35,05	48,37	40,49	36,33	4,16	83,05
15:00:00	35,05	47,88	39,99	36,33	3,66	76,55
16:00:00	35,54	44,91	39,99	36,33	3,66	29,76
17:00:00	35,54	41,95	38,99	36,33	2,66	-9,22
18:00:00	35,54	35,53	37,49	35,84	1,66	-93,67
19:00:00	35,54	32,57	34,50	35,34	-0,84	-132,64
20:00:00	35,54	31,58	33,00	35,34	-2,34	-145,63
21:00:00	35,54	30,59	32,00	34,84	-2,84	-158,71
22:00:00	35,05	29,09	30,50	34,84	-4,34	-170,65
23:00:00	35,05	28,09	29,50	34,34	-4,84	-183,82

FIGURE 3.14 – Flux intérieur de la paroi Sud

	TS2	TS1	Text	Tint	Delta	Q2
00:00:00	35,04	30,12	31,00	33,85	-2,85	-156,90
01:00:00	34,55	29,62	30,50	33,85	-3,35	-155,79
02:00:00	34,55	29,62	30,50	33,85	-3,35	-155,79
03:00:00	34,55	27,58	29,00	33,35	-4,35	-182,54
04:00:00	34,05	27,07	27,50	33,35	-5,85	-181,43
05:00:00	34,05	27,07	27,00	32,85	-5,85	-181,43
06:00:00	34,05	27,07	27,00	32,85	-5,85	-181,43
07:00:00	33,56	28,09	27,50	32,85	-5,35	-160,26
08:00:00	33,56	33,62	31,50	33,35	-1,85	-87,50
09:00:00	34,05	38,08	35,00	33,85	1,15	-36,56
10:00:00	34,05	42,05	37,49	34,34	3,15	15,66
11:00:00	34,55	42,55	38,49	34,84	3,65	14,39
12:00:00	34,55	44,53	38,99	35,84	3,16	40,50
13:00:00	35,04	49,00	40,99	35,84	5,15	91,44
14:00:00	35,04	55,45	40,49	36,33	4,16	176,29
15:00:00	35,53	51,97	39,99	36,33	3,66	122,81
16:00:00	35,53	53,46	39,99	36,33	3,66	142,39
17:00:00	36,03	49,49	38,99	36,33	2,66	82,38
18:00:00	36,03	37,59	37,49	35,84	1,66	-74,26
19:00:00	36,03	33,12	34,50	35,34	-0,84	-133,00
20:00:00	36,03	31,64	33,00	35,34	-2,34	-152,58
21:00:00	35,53	31,14	32,00	34,84	-2,84	-151,32
22:00:00	35,53	29,62	30,50	34,84	-4,34	-171,38
23:00:00	35,53	28,60	29,50	34,34	-4,84	-184,75

FIGURE 3.15 – Flux intérieur de la paroi Ouest

	TS2	TS1	Text	Tint	Delta	Q2
00:00:00	34,59	30,09	30,9965407	33,8456583	-2,85	-150,23
01:00:00	34,59	29,59	30,50	33,85	-3,35	-156,81
02:00:00	34,09	29,59	30,50	33,85	-3,35	-148,92
03:00:00	34,09	27,59	29,00	33,35	-4,35	-175,25
04:00:00	34,09	26,59	27,50	33,35	-5,85	-188,42
05:00:00	33,59	27,09	27,00	32,85	-5,85	-173,94
06:00:00	33,59	27,09	27,00	32,85	-5,85	-173,94
07:00:00	33,59	28,09	27,50	32,85	-5,35	-160,78
08:00:00	33,59	39,98	31,50	33,35	-1,85	-4,35
09:00:00	33,59	56,76	35,00	33,85	1,15	216,52
10:00:00	34,09	56,76	37,49	34,34	3,15	208,62
11:00:00	34,09	46,89	38,49	34,84	3,65	78,70
12:00:00	34,59	48,37	38,99	35,84	3,16	90,30
13:00:00	35,09	45,90	40,99	35,84	5,15	49,93
14:00:00	35,09	43,93	40,49	36,33	4,16	23,94
15:00:00	35,59	43,93	39,99	36,33	3,66	16,05
16:00:00	35,59	41,95	39,99	36,33	3,66	-9,94
17:00:00	35,59	39,98	38,99	36,33	2,66	-35,92
18:00:00	35,59	35,53	37,49	35,84	1,66	-94,39
19:00:00	35,59	32,57	34,50	35,34	-0,84	-133,36
20:00:00	35,59	31,09	33,00	35,34	-2,34	-152,85
21:00:00	35,09	30,59	32,00	34,84	-2,84	-151,54
22:00:00	35,09	29,09	30,50	34,84	-4,34	-171,29
23:00:00	35,09	28,09	29,50	34,34	-4,84	-184,46

FIGURE 3.16 – Flux intérieur de la paroi Est

Les parties coloriées en bleu sont les gains de flux. Ainsi pour les différents parois le gain de flux est de : Nord= 172,49 w ;Sud= 580,09 w ; Ouest=684,85 w ; Est= 684,06 w.

## ANNEXE 6 : Détermination du rayonnement I pour le calcul de l'absorption

Pour le calcul de I qui arrive sur la paroi nous avons pris en compte les données suivants : les données de la station (le rayonnement global, le rayonnement direct et diffus), la latitude, l'azimut, la déclinaison, l'heure, le nombre de jour à partir duquel on veut déterminer le rayonnement partant du 1er Janvier. ect

Voici en résumé un tableau récapitulatif du calcul

Heure	Jour	Radiation globale	Radiation direct	Déclinaison	Azimut a	Angle d'incidence face Est	Rayonnement absorbé par la paroi
8	137	215,68	72,67	19,13	34,77	0,79	191,15

TABLE 3.4 – Détermmination de I pour le calcul de l'absorptivité solaire du 17 Mai 2019

### Données

Le rayonnement global et diffus sont mesurés par la station météo

La laltitude du lieu est mesurée a partir du GPS

### Formule

$$\mathbf{AZIMUT (AZI)} = \arcsin[(\cos DEC * \sin HRA) / \cos ALT]$$

$$\mathbf{DECLINAISON(DEC)} = 0,33281 - 22,984 * \cos N + \sin N - 0,3499 * \cos(2 * N) + 0,03205 * \sin(2 * N) - 0,1398 * \cos(3 * N) + 0,07187 * \sin(3 * N)$$

avec  $N = 0,9836 * NDY$  (NDY étant le nombre de jour total à partir du 1er Janvier (qui est égale à 137 jours dans notre cas))

$$\mathbf{ALTITUDE (ALT)} = \arcsin(\sin DEC * \sin LAT + \cos DEC * \cos LAT * \cos HRA)$$

avec  $HRA = 15 * (\text{hour} - 12)$

$$\mathbf{ANGLE D'INCIDENCE (INC)} = \arcsin(\cos ALT * \cos(ALT - 90))$$

$$\mathbf{I_{direct}} = I_{global} \cos a * \cos h \quad \text{avec } h \text{ la hauteur du soleil ( } h = 90 - DEC - \text{Latitude)}$$

$$\mathbf{I_{absorbé}} = I_{direct} * \cos(INC) + I_{diffus}$$

Le déphasage de temps est calculé grâce à la formule suivante :

$$D = 1,38 * ((\rho * C) / \lambda)^2 * e$$

$\lambda$  : est la conductivité du matériau en W/m.K ;  $\rho$  : est la densité du matériau en Kg/m<sup>3</sup> ; c :

est la chaleur spécifique en J/Kg.K ; e : est l'épaisseur en m.

$e = 0,14 \text{ m}$  ;  $\lambda = 1 \text{ W/m.K}$  ;  $\rho = 1921,6 \text{ Kg/m}^3$  ;  $c = 1002,5 \text{ J/Kg.K}$

$e = 0,20 \text{ m}$  ;  $\lambda = 0,952 \text{ W/m.K}$  ;  $\rho = 1185 \text{ Kg/m}^3$  ;  $c = 1080 \text{ J/Kg.K}$

D égale à 16 min pour le parpaing et 18,86 min. Ainsi comme déphasage nous avons considéré l'heure à l'instant où la paroi reçoit le rayonnement pour le calcul de I.

Connaissant le I que reçoit la paroi on calcul l'absorption solaire à partir de la formule de l'équation 2.3

Catégorie	Couleurs	Valeurs de $\alpha_{\text{par}}$ défaut
Clair	Blanc, jaune, orange, rouge clair	<b>0,4</b>
Moyen	Rouge sombre, vert clair, bleu clair, gris clair	<b>0,6</b>
Sombre	Brun, Vert sombre, vert clair, bleu vif, gris moyen	<b>0,8</b>
Noir	Noir, brun sombre, bleu sombre, gris sombre	<b>1</b>

TABLE 3.5 – Valeurs de  $\alpha_{\text{par}}$  défaut pour les parois opaques

Heure	Matériaux	Température équivalente	Température de l'air	Coefficient de convection	I paroi	Absorption solaire
8	BTC	317,79	307,14	12	197,94	<b>0,64</b>
8	Parpaing	315,79	307,14	12	197,94	<b>0,52</b>

TABLE 3.6 – Calcul de l'absorptivité