



# ETUDE DE L'IMPACT DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION DES MURS SUR LE CONFORT THERMIQUE ET LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS A OUAGADOUGOU, BURKINA FASO

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

---

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

**NGASSAM TCHOUMI Jude (20220241)**

**Directeur de mémoire : Pr. Adamah MESSAN, Enseignant-Chercheur, Institut 2iE**

**Encadrant 2iE : Dr. Césaire HEMA, Enseignant-chercheur, Institut 2iE**

**Structure d'accueil : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD)**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr (MC) Abdou LAWANE GANA

Membres et correcteurs : Dr (MA) Philbert NSHIMIYIMANA  
Dr (MA) Decroly DJOUBISSIE DENOUEWE

**Promotion 2024/2025**

## DEDICACES

*A ma famille*  
*A toute ma famille*

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien et l'encadrement bienveillant de personnes hautement qualifiés au sein du Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD) de 2iE. Ma profonde reconnaissance à :

- L'institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Institut 2iE) pour non seulement le cadre, mais aussi les connaissances qui m'ont été transmises et dont le stage mené m'a donné l'occasion d'en faire application.
- Pr Adamah MESSAN, Directeur de la recherche et chef du LEMHaD pour son enseignement, son implication et les orientations fournies durant mon séjour sous sa direction.
- Dr Césaire HEMA, Chef de département Génie Civil et Enseignant-Chercheur à l'institut 2iE pour sa disponibilité, son écoute ainsi que ses remarques et suggestions détaillées.
- Dr Arnaud OUEDRAOGO, Enseignant-Chercheur à l'institut 2iE pour son encadrement et sa disponibilité.
- Dr Philbert NSHIMIYIMANA, Enseignant-Chercheur à l'institut 2iE pour ses orientations ainsi que ses conseils durant mes travaux.
- Dr Decroly DJOUBISSIE, Enseignant-Chercheur à l'institut 2iE pour son soutien et son appui aussi bien dans le cadre du stage qu'en dehors.

Je remercie également :

- Mes amis et aînés qui m'ont soutenu, adopté depuis mon arrivée au Burkina Faso et dont une page ne me suffirait pour les citer nommément.
- Mes camarades et amis au sein de 2iE pour tous les coups de main désintéressés.
- Les « toto » (affectueusement) du bureau des stagiaires du LEMHaD, pour tous les plats consommés sans payés (Cisse, Daryl, Bambaras, Amir, Adamou, Christian).

## RESUME

Dans un contexte global toujours plus consommateur en énergie et face à des difficultés avérées des pays d’Afrique en générale et d’Afrique subsaharienne en particulier à fournir une production suffisante à la consommation, il est plus qu’important de rationaliser les ressources disponibles. Responsable d’environ 35% de la consommation d’énergie dans le monde, le secteur de la construction peut y jouer un rôle certain. Notamment pour ce qui est du Burkina Faso, plus précisément de la ville de Ouagadougou, 44% de l’énergie produite est destinée à la climatisation. Afin de réduire la consommation énergétique du secteur immobilier, ce travail analyse expérimentalement l’influence du matériau des parois sur le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments dans le climat soudano-sahélien de Ouagadougou. Trois bâtiments pilotes identiques, ne différant que par la nature du matériau des parois (le parpaing, la brique de terre comprimée stabilisée au ciment (BTC ciment) et la brique de terre stabilisée au géopolymère (BTC géopolymère), ont été instrumentés pour mesurer simultanément la température intérieure et la consommation d’énergie liée au refroidissement. Les performances des matériaux, étudiées à travers leur capacité d’amortissement et de déphasage thermique, révèlent que le parpaing offre un meilleur amortissement vis-à-vis des températures élevées (de l’ordre de 0,02°C en saison froide et de l’ordre de 0,5°C en saison chaude). La BTC géopolymère, malgré de bonnes capacités thermiques, montre une tendance à la surchauffe, ce qui induit sa forte consommation énergétique en saison chaude (15,21% de plus par rapport au parpaing et 3,41% par rapport à la BTC ciment). La BTC ciment quant à elle offre une moindre performance énergétique par rapport au parpaing, malgré une capacité thermique pourtant plus élevée (251kJ.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> pour la BTC ciment et 218kJ.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> pour le parpaing). En somme cette étude met en évidence l’impact que peut avoir un type de matériau sur la consommation énergétique du bâtiment. Pour le cas étudié (Ouagadougou, Burkina Faso), elle démontre que le parpaing permet de réduire le coût financier annuel dû à la climatisation d’environ 3% en moyenne par m<sup>2</sup>, et elle pose une interrogation de l’adéquation des méthodes d’utilisations courantes du matériau terre (épaisseur des murs extérieures) dans le contexte Soudano-sahélien.

### Mots Clés :

- 
- 1 - Amortissement thermique,**
  - 2 - Brique de terre comprimée,**
  - 3 - Consommation énergétique,**
  - 4 - Confort thermique.**

## ABSTRACT

In an increasingly energy-intensive global context, and given the proven difficulties of African countries in general, and sub-Saharan Africa in particular, in providing sufficient production to meet consumption, it is more important than ever to rationalize available resources. Responsible for around 35% of global energy consumption, the construction sector has a definite role to play in this regard. In Burkina Faso, and more specifically in the city of Ouagadougou, 44% of the energy produced is used for air conditioning. In order to reduce energy consumption in the real estate sector, this study experimentally analyzes the influence of wall materials on thermal comfort and energy consumption in buildings in the Sudano-Sahelian climate of Ouagadougou. Three identical pilot buildings, differing only in the type of wall material (concrete block, cement-stabilized compressed earth brick (BTC cement) and geopolymer-stabilized earth brick (BTC geopolymer)), were instrumented to simultaneously measure indoor temperature and energy consumption related to cooling. The performance of the materials, studied in terms of their thermal damping and phase shift capacity, reveals that concrete blocks offer better damping against high temperatures (around 0.02°C in cold weather and around 0.5°C in hot weather). Geopolymer BTC, despite its good thermal properties, tends to overheat, which leads to high energy consumption in the hot season (15.21% more than concrete blocks and 3.41% more than cement BTC). Cement-based BTC offers lower energy performance than concrete blocks, despite having a higher thermal capacity (251 kJ.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> for cement-based BTC and 218 kJ.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> for concrete blocks). In summary, this study highlights the impact that a type of material can have on a building's energy consumption. For the case study (Ouagadougou, Burkina Faso), it shows that concrete blocks reduce the annual financial cost of air conditioning by an average of around 3% per m<sup>2</sup>, and it questions the suitability of current methods of using earth materials (thickness of exterior walls) in the Sudano-Sahelian context.

### Mots Clés :

- 
- 1 – Thermal damping,**
  - 2 – Compressed Earth Blocks,**
  - 3 - Energy consumption,**
  - 4 – Thermal comfort.**

## LISTE DES ABREVIATIONS

**BTC** : Brique de terre comprimé

**BTC ciment** : Brique de terre comprimé stabilisée au ciment

**BTC Géopolymère** : Brique de terre comprimé stabilisée au Géopolymère

**IQR** : Interquartile range (Ecart interquartile)

**Parpaing** : Blocs de mortier creux

# SOMMAIRE

Dédicaces .....	i
Remerciements .....	ii
Resume .....	iii
Abstract .....	iv
Liste des abréviations .....	v
Sommaire .....	vi
Liste des tableaux .....	vii
Liste des figures .....	viii
<b><i>I. Introduction</i></b> .....	<b>10</b>
<b><i>II. Etat de l'art</i></b> .....	<b>12</b>
1. Contexte et disponibilité en matériaux locaux .....	12
2. Impact des parois sur le confort thermique .....	13
3. Impact des parois sur la consommation énergétique .....	14
4. Synthèse partielle .....	15
<b><i>III. Matériels &amp; Méthodes</i></b> .....	<b>16</b>
1. Matériels .....	16
2. Méthodologie .....	19
<b><i>IV. Résultats &amp; Discussion</i></b> .....	<b>25</b>
1. Analyse de la performance thermique des parois .....	25
2. Analyse de l'ambiance thermique intérieure .....	30
3. Conception et exploitation du modèle numérique .....	45
4. Estimation de la dépense financière .....	51
5. Synthèse globale & Discussion .....	52
<b><i>V. Conclusion &amp; Perspectives</i></b> .....	<b>56</b>
<b><i>VI. Bibliographie</i></b> .....	<b>58</b>
<b><i>VII. Annexes</i></b> .....	<b>61</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Propriétés thermiques des matériaux / parois de l'enveloppe .....	20
Tableau 2: Scénario d'occupation du local - Usage de bureau (Moussa <i>et al.</i> , 2019).....	20
Tableau 3: Scénario d'occupation du local - Usage résidentiel (Moussa <i>et al.</i> , 2019).....	21
Tableau 4: Synthèse des scénarios réalisés sur les bâtiments pilotes.....	21
Tableau 5 : Critères de validation du modèle numérique (Ouédraogo <i>et al.</i> , 2024) .....	22
Tableau 6: Données de bas de l'estimation financière.....	24
Tableau 7: Distribution statistique des valeurs relevés durant la saison froide.....	33
Tableau 8: Distribution statistique des valeurs relevés durant la saison chaude.....	39
Tableau 9: Valeurs des critères de validation du modèle.....	46
Tableau 10 : Estimation du coût financier journalier au m <sup>2</sup> .....	54
Tableau 11: Estimation du coût financier annuel au m <sup>2</sup> .....	55

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Bâtiments pilotes réalisés en parpaings de ciment (a), en BTC ciment (b) et en BTC géopolymère (c).....	16
Figure 2 : Conditionnement (a) et mise en place des sondes (b et c).....	17
Figure 3 : Système de climatisation (a) et d'enregistrement (b) .....	18
Figure 4: Amortissement - Déphasage (Saison froide) .....	25
Figure 5: Température moyenne sur 24h aux surfaces de la paroi (Saison froide).....	26
Figure 6: Amortissement - Déphasage (Saison chaude) .....	28
Figure 7: Température moyenne sur 24h aux surfaces de la paroi (Saison chaude).....	29
Figure 8: Température moyenne sur 24h à l'intérieure et à l'extérieure (Saison froide).....	31
Figure 9: Amortissement - déphasage intérieur (Saison froide) .....	32
Figure 10 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 2 – Saison froide) .....	34
Figure 11 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 3 – Saison froide) .....	35
Figure 12 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 4 – Saison froide) .....	36
Figure 13 : Température moyenne sur 24h à l'intérieure et à l'extérieure (Saison chaude) ....	37
Figure 14: Amortissement - déphasage intérieur (Saison chaude).....	38
Figure 15 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 2 – Saison chaude) .....	40
Figure 16 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 3 – Saison chaude) .....	41
Figure 17 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 4 – Saison chaude) .....	42
Figure 18: Modélisation numérique des bâtiments pilotes.....	45
Figure 19: Résultats de la calibration - Valeurs de température intérieure .....	46
Figure 20: Consommation mensuelle d'énergie (Scénario 2) .....	47
Figure 21: Consommation d'énergie annuelle (Scénario 2) .....	47
Figure 22: Moyenne des températures horaires relevés au cours du mois de Mars.....	48
Figure 23: Consommation mensuelle d'énergie (Scénario 3) .....	49
Figure 24: Consommation d'énergie annuelle (Scénario 3) .....	49
Figure 25: Consommation mensuelle d'énergie (Scénario 4) .....	50

Figure 26: Consommation d'énergie annuelle (Scénario 4) ..... 50  
Figure 27: Coût de climatisation annuel en fonction de chaque matériau ..... 51  
Figure 28: Plus /moins-value sur le coût des BTC vis-à-vis du parpaing sur 50 ans..... 52

# I. INTRODUCTION

---

Le secteur de l'énergie est un élément central pour prétendre à un quelconque développement aussi bien sur le plan humain qu'économique (Bonhomme and Safa, 2024). D'ailleurs, les prévisions actuelles envisagent à la hausse la consommation d'énergie mondiale dans de multiples domaines tels que l'industrie de la construction. En effet, on estime que ce dernier consomme en moyenne 36% de l'énergie mondiale et des experts affirment que la consommation énergétique des bâtiments pourrait progresser de moitié d'ici 2050, en cas d'absence de progrès pour ce qui est de l'efficacité énergétique des bâtiments (Berardi, 2017). En Asie du Sud-Est particulièrement, les systèmes de refroidissement des bâtiments sont responsables de plus de 50% de l'énergie totale utilisée dans le secteur (Seghier *et al.*, 2022).

Malheureusement en Afrique en général, et Subsaharienne en particulier, la demande énergétique n'est pas toujours satisfaite. On estime en 2022 que seulement 51% de la population d'Afrique subsaharienne, ont accès à l'électricité (*Tendances | Suivi de l'ODD 7*, 2022). Ceci du fait d'une production insuffisante et de l'augmentation continue de la demande. Il se pose donc la nécessité de renforcer les moyens de production et de rationaliser les ressources déjà acquises. Dans le secteur immobilier, une application d'une telle politique pourrait être de viser une réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Dans le cas du Burkina Faso, le secteur résidentiel représente environ 33% de la consommation électrique totale, et pour la ville de Ouagadougou, 40% de la consommation énergétique des ménages est consacrée au refroidissement (Tete *et al.*, 2023).

Ainsi, dans l'optique de réduire la consommation énergétique des bâtiments, plusieurs approches de conception sont mises au point tel que l'approche bioclimatique. Cette dernière prône la prise en compte du facteur « consommation d'énergie » depuis la conception et le choix des matériaux de construction, admettant en données d'entrée les spécificités climatiques du milieu ambiant ainsi que les propriétés thermiques des matériaux à disposition. L'approche consiste à comprendre le microclimat dans lequel le projet est bâti pour anticiper sur ses besoins futurs en énergie, nécessaires à assurer le confort thermique de ses usagers.

La pratique d'une telle stratégie nécessitant des bases scientifiques fiables sur lesquelles appuyées nos choix. Cette étude s'inscrit dans l'objectif globale de fournir des éléments de décisions en vue d'une implémentation de l'approche bioclimatique en milieu Soudano-Sahélien. Bien que des études, dont la détermination des modèles de confort adéquats pour le milieu Soudano-Sahélien (Ouedraogo *et al.*, 2022), ou encore des valeurs de température cible

les plus à même de fournir un sentiment de confort aux occupants pour le même milieu (Hema *et al.*, 2024) ont déjà été menées sur ce thème. Pour cette étude nous nous intéresserons au matériau qui constitue les parois du bâtiment. Selon les principes de l'approche bioclimatique, à un type de climat donné correspond un type d'architecture approprié. Les objectifs spécifiques de cette étude seront donc de :

- ✓ Evaluer l'impact du matériau utilisé pour la réalisation des parois sur le confort thermique, la consommation énergétique du bâtiment et le coût d'exploitation du bâtiment ;
- ✓ Evaluer la pertinence de l'utilisation des matériaux vis-à-vis de scénarios d'occupations,
- ✓ Evaluer le coût financier induit par la consommation énergétique, en fonction du matériau choisi.

Pour ce faire notre étude trouve son contexte dans la ville de Ouagadougou, au Burkina Faso et mettra en comparaison 3 matériaux couramment utilisés dans la construction à savoir : le parpaing, la brique de terre stabilisée au ciment (8%) et la brique de terre stabilisée au géopolymère (15%), développer au sein du Laboratoire Eco-matériaux et Habitats Durables (LEMHaD) (Omar Sore *et al.*, 2018). Afin de remplir les objectifs préalablement énoncés, nous capitalisons, sur les recherches préalablement menées et ayant un rapport pertinent avec notre sujet à travers l'Etat de l'Art. Faisant ainsi ressortir des hypothèses de recherches, qui serviront de socle de départ à notre étude. A la suite de l'Etat de l'Art, vient la présentation des matériels et méthodes employés pour la réalisation de cette étude. Ce rapport se poursuit par les résultats obtenus à partir des travaux effectués, pour finir sur une synthèse répondant clairement aux objectifs établis.

## II. ETAT DE L'ART

---

### 1. Contexte et disponibilité en matériaux locaux

Comme énoncé en introduction, il existe un réel besoin de rationaliser l'énergie disponible aussi bien de par le monde d'entier que pour les pays en développement en particulier. Pour exemple, de la période allant de 2012 à 2021 la consommation d'énergie des pays non membre de l'OCDE a progressé de 23,2%, témoignant d'une croissance économique et démographique rapide (Yolcan, 2023) et accentuant la nécessité de rationaliser les ressources disponibles. Dans cette optique comme démontré plus haut, le secteur du bâtiment peut avoir un impact significatif, en particulier son enveloppe.

Par le passé la terre crue, a longtemps été le principal matériau de construction au Burkina Faso. Du fait du peu d'outils nécessaire à leur pratique, l'adobe et la bauge étaient les techniques principalement utilisées (Kéré, 1995). Au vu de ses insuffisances d'autres solutions de mise en œuvre sont expérimentées notamment la Brique de terre Comprimée (BTC) ou encore le Bloc de Latérite Taillée (BLT). Pour ce qui est de la BTC, elle a connu de fortes améliorations notamment dans ses possibilités de stabilisations (Omar Sore *et al.*, 2018; Nshimiyimana *et al.*, 2019). Contrairement à la BLT, la BTC dispose d'un cadre normatif aussi bien à l'échelle de l'Afrique (normes ARS 674- 683), qu'à l'échelle du Burkina Faso (NBF 02-001 à NBF 02-008). Néanmoins, celle-ci reste encore moins populaire que le banco, majoritaire en zone rurale et le parpaing de ciment, majoritaire en zone urbaine.

Dans le cas précis de Ouagadougou, on a observé une forte progression dans utilisation du parpaing pour la construction des murs des bâtiments. Entre les matériaux dur et semi dur, la proportion en 2019 était respectivement de 59% et 21,5% (Comité National du Recensement, INSD, 2022). Par la suite, le parpaing présentant des limites, aussi bien sur le plan économique que celui du confort, notamment l'accès au logement qui devient plus difficile pour les populations du fait du coût des constructions élevé (Wyss, 2005). Ainsi, afin de répondre aux problématiques actuelles relatives notamment au coût et au confort thermique, l'usage de matériau à base de terre reprend de plus en plus d'ampleur au vu des diverses avancées réalisées dans sa compréhension, sa caractérisation et ses méthodes d'utilisation (Zoungrana *et al.*, 2020).

Dans le cadre de cette étude, trois matériaux localement disponibles au Burkina Faso sont mis en comparaison. Il s'agit (i) du bloc de béton creux (BBC) ou parpaing, (ii) la brique de terre stabilisée avec 8% de ciment (BTC ciment) et (iii) la brique de terre stabilisée avec

15% de géopolymère (BTC géopolymère). Nous nous intéressons à leur impact dans la construction aussi bien sur le plan du confort thermique que celui coût énergétique et économique.

## **2. Impact des parois sur le confort thermique**

Les parois extérieures constituant la majeure partie de l'enveloppe, celle-ci influence grandement la sensation de confort thermique au sein du bâtiment. Pour exemple, en Chine, une étude s'est intéressée au caractère réfléchissant de l'enveloppe et son impact sur le milieu intérieur. Elle montre qu'il est possible en fonction du degré de réflexivité de l'enveloppe, d'obtenir une baisse de température allant jusqu'à 2,3°C (température du globe) en ventilation naturelle, pour une baisse de la consommation énergétique annuelle atteignant 116kWh (Shen, Tan and Tzempelikos, 2011).

Dans un contexte similaire au notre, (Hema *et al.*, 2020) ont étudié l'effet de la conception des systèmes de murs principalement constitués de BTC sur le confort thermique intérieur des maisons en ventilation naturelle à partir de simulation. Les résultats montrent que le niveau de confort obtenu est fonction de la conception des murs composant l'enveloppe et des espaces au sein du bâtiment. Ils marquent également la supériorité des parois bicouche alliant résistance thermique et masse thermique vis-à-vis des parois monocouches.

Au cours d'une seconde étude, spécifiquement dédié aux parois extérieures multicouches, (Hema *et al.*, 2021) soulignent l'importance du positionnement des couches composant les parois de l'enveloppe. Ses résultats démontrent que pour une occupation durant la journée, il serait plus avantageux, en cas de paroi à double couche, que la couche intérieure soit celle possédant une forte masse thermique, comme dans le cas de la BTC. Tandis que pour une occupation nocturne l'inverse serait préférable. Ces mesures permettraient de réduire significativement les variations de température intérieure.

A partir d'une simulation thermique dynamique pour le même contexte climatique, (Neya *et al.*, 2025) démontrent que les bâtiments en BTC restent trop souvent chauds. Ceci a pour effets de provoquées de longue période d'inconforts pouvant atteindre de manière journalière 15 voire 19 heures.

Dans la même veine, l'étude menée par (Ouedraogo *et al.*, 2024) souligne également cet inconfort important pour un bâtiment en BTC. Dans une démarche s'appuyant principalement sur simulation numérique réalisée à partir d'un model préalablement calibré, ses résultats démontrent qu'à contexte climatique identique et suivant les technologies de construction

courante au Burkina Faso, le bâtiment en BTC est inconfortable thermiquement 80,1% du temps tandis que celui en parpaing est inconfortable 79,3% du temps. Néanmoins par la suite les résultats montrent que le bâtiment en BTC admet un meilleur potentiel vis-à-vis de l'optimisation des parois.

Egalement à partir d'une simulation (Moussa *et al.*, 2019), ont réalisé une étude comparative entre un bâtiment en BTC et en parpaing dans le contexte de Ouagadougou. Ses résultats démontrent que l'inconfort thermique dans le bâtiment en maçonnerie de BTC est inférieur de 400h par rapport au bâtiment en maçonnerie de parpaing sous ventilation naturelle. Dans le cas de locaux soumis à un système de climatisation, cela représente une économie annuelle de 310 000 francs CFA.

### **3. Impact des parois sur la consommation énergétique**

Comme le montre la dernière étude, outre le fait d'influencer le confort thermique au sein du bâtiment, le matériau utilisé dans la réalisation des parois de l'enveloppe affecte également la consommation énergétique de l'ouvrage.

En Italie, (Fabbri *et al.*, 2023) mènent une étude dans laquelle ils observent les besoins en énergie d'un bâtiment diminué au fur et à mesure que l'enveloppe est isolante. Bien que la relation observée ne puisse pas se traduire de manière linéaire, ses résultats démontrent qu'une isolation complète, impliquant donc les parois, permettrait une réduction jusqu'à 50% de la consommation énergétique en fonction de l'isolant mis en place.

Dans une autre étude, à travers des simulations (Tunçbilek *et al.*, 2023) met en comparaison plusieurs nature de paroi, notamment celle composée de matériaux à changement de phase et celle faisant usage d'isolants thermiques. Ses résultats montrent bel et bien une variation de la consommation énergétique du bâtiment en fonction du type de matériaux à changement de phase choisi ou de l'épaisseur de l'isolant mis en place. Dans les faits cela peut représenter jusqu'à 73,4% d'économie d'énergie.

Toujours en Turquie, une autre étude réalisée à partir de simulation bâtiments existants en considérant comme variable, les matériaux de base utilisés pour la réalisation des murs extérieurs. Les résultats ont démontré qu'en fonction de la situation géographique, le type de matériau du noyau du mur peut faire varier les valeurs de consommation d'énergie jusqu'à 25% (Süer and İLeriSoy, 2022).

En Algérie, (Abderrahmane and Labidine, 2014) mènent des simulations visant à étudier l'impact des matériaux de construction sur l'efficacité énergétique d'un bâtiment résidentiel.

Ses résultats montrent que l'impact du choix des matériaux de construction sur le besoin énergétique peut atteindre jusqu'à 50%, dans laquelle l'isolation des murs seuls peut apporter un gain de l'ordre de 22,73%.

#### **4. Synthèse partielle**

L'ensemble des études mentionnées ont comme dénominateur commun : La sensibilité des températures intérieures, et de manière générale du confort thermique, ainsi que de la consommation énergétique vis-à-vis du type de matériau utilisé pour la réalisation de l'enveloppe. Bien que certaines divergent, elles semblent de manière globale, soutenir la thèse selon laquelle les matériaux en terre semble présenter plus d'avantages que le parpaing moyennant diverses conditions.

Cependant il est important de faire remarquer à propos des études présentés plus haut, que pour certaines d'entre elles, le contexte climatique et géographique est assez différent de celui de la présente étude, et pour d'autres, elles ne prennent pas souvent en compte la consommation d'énergie. De plus, l'ensemble des investigations menées sont principalement basées sur des simulations thermiques qui peuvent se montrer plus ou moins précises en fonction du niveau de détail implémenté au cours de la phase de modélisation (Peinturier and Wallom, 2025).

Ainsi, la présente étude se veut un apport face aux différentes limites présentées par la littérature. Elle met en comparaison les performances thermiques de trois bâtiments identiques, réalisée en matériaux locaux (parpaing, BTC ciment et BTC géopolymère), et ne différant que par les matériaux utilisé pour la réalisation des parois de l'enveloppe. Le but est de répondre aux objectifs énoncés en introduction, en nous basant principalement sur une approche expérimentale pour ce qui est de la collecte de données. L'étude tient principalement compte de deux paramètres comme données d'entrée à l'analyse, notamment :

- La température de l'air
- La consommation d'énergie de refroidissement

Il n'est pas question ici de mettre en évidence de quelconques possibilités d'optimisation ou d'amélioration des matériaux utilisée, si oui de manière secondaire. La priorité sera portée sur la mise en évidence des différences relevées entre les bâtiments mis en comparaison si elles existent, leur ampleur et surtout la cohérence des raisons expliquant les phénomènes observés.

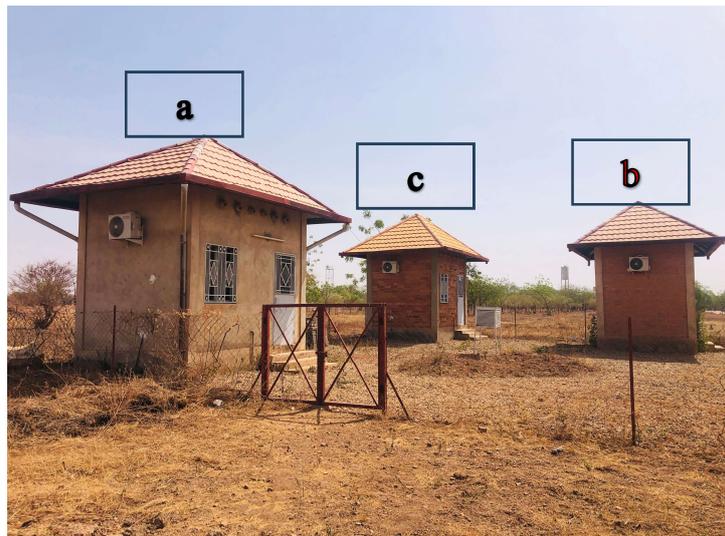
# III. MATERIELS & METHODES

---

## 1. Matériels

### a) Description du prototype expérimentale.

La présente étude est réalisée à partir de trois bâtiments pilotes situés à Ouagadougou, sur le domaine de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), plus précisément sur le site kamboinsé. Il s'agit de 3 bâtiments identiques pour ce qui est de leur géométrie (*Annexe 1*), ainsi que pour le système de climatisation dont ils sont dotés. La seule différence importante est limitée au matériau utilisé dans la réalisation des parois, à savoir : Le parpaing, la brique de terre comprimé stabilisé au ciment et la brique de terre stabilisé au géopolymère (Figure 1).



**Figure 1: Bâtiments pilotes réalisés en parpaings de ciment (a), en BTC ciment (b) et en BTC géopolymère (c)**

Une porte et deux fenêtres réparties sur les parois Nord et Sud, constituent les seules ouvertures donnant sur l'unique pièce de 10m<sup>2</sup> dont est doté le modèle de bâtiment réalisé. Au sein des trois bâtiments pilotes, le volume de la pièce est limité à une hauteur d'environ 2,7m par un contreplaqué de 3mm d'épaisseur, surplombé lui aussi par une toiture en aluminium de 35/100mm d'épaisseur. Le vide séparant le plafond et la toiture, se voit ventilé en permanence par l'air ambiant grâce à des ouvertures circulaires disposés sur les façades Nord et Sud.

Etant réalisés à des fins de recherche, aucun usage propre n'est associé à ces bâtiments pilotes. Durant toute la durée de l'étude ceux-ci resteront donc inoccupés et donc considérés

comme n'admettant pas de sources de chaleur interne. La démarche n'est pas nouvelle, en effet ce système de modélisation plus ou moins réelle des conditions de vie des populations au sein de logements courants, a déjà été exploité dans le cadre d'expérimentation antérieures (Kuznik and Virgone, 2009; Rojas *et al.*, 2016; Hema *et al.*, 2021).

## b) Outils de collecte de données.

### i. Données expérimentales

L'objectif étant principalement d'apprécier la performance des trois bâtiments pilotes vis-à-vis du rapport confort thermique/coût, les données recueillies au cours de l'étude sont essentiellement numériques. Ainsi tenant également compte des moyens à notre disposition, il est question de collecter de manière simultanée dans les trois bâtiments pilotes et à fréquence horaire, des valeurs de température de l'air et de consommation d'énergie de climatisation. Les outils exploités afin de recueillir ces données, varient en fonction des phases de l'étude. Au cours de la phase d'expérimentation en condition réelle, nous ferons usage :

- De sondes programmables de Waranet Solutions couplés au logiciel Warito II. Ces enregistreurs de température ont une capacité d'enregistrement allant jusqu'à 8000 mesures, couvrant une plage de température  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+140^{\circ}\text{C}$ , pour une précision de  $\pm 0,06^{\circ}\text{C}$  (Figure 2a). Pour chacun des trois bâtiments pilotes, elles seront disposées sur la surface intérieur et extérieur de la façade nord ainsi qu'au centre de la pièce, à une hauteur d'environ 1,50m du sol (Figure 2c). Les sondes disposées sensiblement à l'opposés, sur les surfaces de la paroi Nord seront recouvertes de laine de verre afin qu'elles puissent fournir des données de température de la surface sans perturbation (Figure 2b). Une sonde est également placée à l'extérieur des bâtiments pilotes afin de mesurer la température de

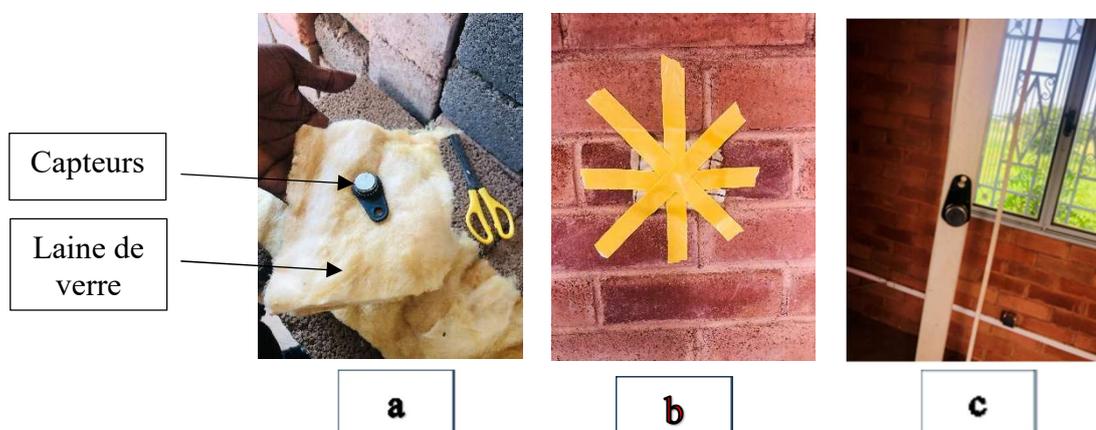
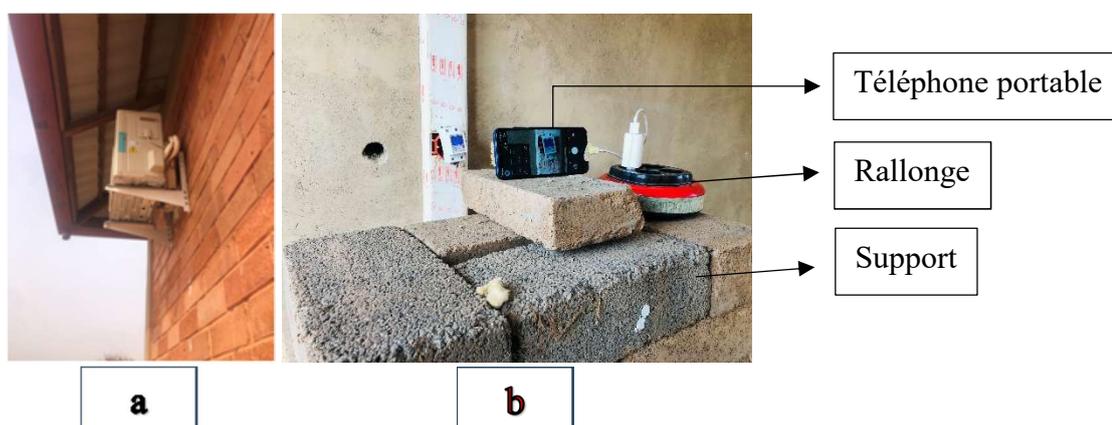


Figure 2 : Conditionnement (a) et mise en place des sondes (b et c)

l'air ambiant, tout en étant préservé de la radiation solaire par une boîte en bois maximisant l'aération naturelle (Figure 1).

- D'un système de climatisation de type inverter, permettant un ajustement progressif de la puissance de froid utile. Le modèle de climatiseur utilisé est AU-X9ZMVP de la marque Sharp faisant usage d'un réfrigérant de type R32 et dont la plage de s'étend de 16°C à 30°C (Figure 3a, Figure 3b).



**Figure 3 : Système de climatisation (a) et d'enregistrement (b)**

- De trois compteurs d'énergie, conformes à la norme CEI 6205321, installés au niveau de l'interrupteur du climatiseur. Pour chaque bâtiment le système de climatisation sera couplé à un téléphone préalablement paramétré et disposé avec un d'alimentation adéquat, ils permettront de quantifier et d'enregistrer la consommation d'énergie du système de climatisation (Figure 3c).

## ii. Données simulées

A la suite de la phase d'expérimentation en condition réelle, nous ferons usage pour la modélisation de différents logiciels afin de concevoir, calibrer et exploiter des modèles numériques simulant le comportement des bâtiments observés. Les logiciels utilisés sont :

- Sketchup 2022 : utilisé pour la modélisation en trois dimensions du bâtiment. En effet, Sketchup est un outil permettant la représentation numérique d'un ouvrage quelconque aussi bien en 2 dimensions qu'en 3 dimensions.
- EnergyPlus 25.1 : utilisé comme moteur de simulation thermiques. EnergyPlus est adapté dans le cadre de simulation énergétique de bâtiments, permettant à des architectes et ingénieurs d'anticiper sur la consommation d'énergie et d'eau des bâtiments.
- OpenStudio 1.4 : utilisé pour l'implémentation des paramètres climatiques et

thermiques dans le modèle. Il s'agit ici d'un kit de développement logiciel et d'une interface de ligne de commande facilitant la programmation du modèle en vue de son exécution dans EnergyPlus.

- Elements v1.0.6 : utilisé pour la modification du fichier météo. Il s'agit d'un logiciel permettant de créer, éditer et personnaliser des fichiers météo pour la modélisation énergétique des bâtiments.

Le dispositif décrit ainsi que les équipements associés permettront donc de collecter des données qui après traitement et analyse, seront clairement présentés dans l'optique de confirmer ou d'infirmer la thèse affirmant la supériorité de la BTC vis-à-vis du parpaing.

### **c) Outils de traitement et rendu des données**

Une fois l'ensemble des données récoltées, la phase de traitement, d'analyse et de rendu des travaux réalisés, a nécessité également divers moyens notamment :

- Le logiciel Excel 2016 pour le traitement numérique des données, puis leur mise en forme graphique afin de procéder à leur analyse.
- Le logiciel Word 2016 pour la rédaction du présent rapport.
- Le logiciel Rstudio associé au langage de programmation R pour l'implémentation de la méthode IQR au sein des différents jeux de données obtenus.
- Le logiciel Zotero ayant servi à l'organisation des différentes ressources bibliographiques citées dans le présent document.

## **2. Méthodologie**

Le climat soudano-sahélien du centre auquel sont soumis nos bâtiments pilotes, présente en fonction de la période de l'année des températures extrêmes. Particulièrement pour ce qui est de la ville de Ouagadougou, la moyenne mensuelle des températures au cours de l'année se situerait entre 25°C et 34°C pour une humidité relative majoritairement située entre 14% et 58%, exception faite de la saison pluvieuse où elle peut atteindre les 80% (Hema *et al.*, 2022). Afin de fournir une appréciation représentative de la situation climatique locale, notre étude se déroule au cours des deux saisons dominantes pour la ville de Ouagadougou : la saison sèche et la saison pluvieuse. Toutes les mesures se font de manière simultanée pour les trois bâtiments pilotes.

Nous disposons de trois bâtiments pilotes dont la différence majeure se situe dans le

matériau utilisé à la réalisation des parois. Comme matériau mis en comparaison, il est question ici du parpaing, de la brique de terre stabilisée au ciment (8%) et de la brique de terre stabilisée au géopolymère (15%). Les propriétés thermiques des matériaux susmentionnés sont connues, ceci grâce à diverses études et expérimentations menées (Omar Sore *et al.*, 2018; Moussa *et al.*, 2019; Hema *et al.*, 2020). Une synthèse de celles-ci est présenté au sein du Tableau 1 et le détails des calculs effectués est fourni en *Annexe 4*.

**Tableau 1: Propriétés thermiques des matériaux / parois de l'enveloppe**

	$e$ [m]	$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$c$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$E$ [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> .s <sup>0.5</sup> ]	CT [kJ.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	U [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Parpaing	0.19	0.85	1147	1000.00	7.40.E-07	986.82	218	2.33
BTC Géopolymère	0.14	0.71	1730	1027.10	4.00.E-07	1123.20	249	2.72
BTC Ciment	0.14	1.02	1840	975.00	5.69.E-07	1352.73	251	3.26

## a) Méthodologie de collecte de données.

### i. Données expérimentales

Dans un premier temps nous disposons les enregistreurs de température uniquement, et apprécions le flux de chaleur au sein des bâtiments sans mise en marche du système de climatisation. Dans un second temps, nous mettons en marche le système de climatisation pour un fonctionnement permanent avec 27°C comme température de consigne. La démarche vise à quantifier la consommation de chaque bâtiment pour un fonctionnement continue. La troisième phase consiste en la mise en place de scénario d'occupation. La climatisation n'est plus active de manière permanente, mais suit un planning d'occupation de la pièce, fonction de l'usage qui lui ai attribué. Nous considèrerons pour ce faire deux hypothèses donnant suite chacune à un scénario chacun, à savoir : celle d'un usage de bureau (voir les horaires d'utilisation au sein du Tableau 2), puis celle d'un usage résidentiel (voir les horaires d'utilisation au sein du Tableau 3).

**Tableau 2: Scénario d'occupation du local - Usage de bureau (Moussa *et al.*, 2019)**

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Horaires	7h - 16h					-	
Motif	9h de travail par jours					Repos	
Climatisation active	Oui					Non	

**Tableau 3: Scénario d'occupation du local - Usage résidentiel (Moussa *et al.*, 2019)**

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Horaires	16h-07h					00h-00h	
Motif	10h de travail par jours					Repos	
Climatisation active	Oui					Oui	

Une fois de plus la conception du planning suivie nous est propre, mais s'inspire des horaires de travail observées au sein de la ville de Ouagadougou. Tout comme pour les phases précédente les bâtiments sont considérés comme dépourvu de source de chaleur interne et les ouvertures donnant accès au local sont fermés tout au long de l'étude. Une synthèse des différents scénarios énumérés et réalisés au cours des trois première phase de notre étude est présenté au sein du Tableau 4.

**Tableau 4: Synthèse des scénarios réalisés sur les bâtiments pilotes**

	Objectif recherché	Durée minimale
<b>Scénario 1</b> Sans climatisation	Le but est d'apprécier le comportement des matériaux uniquement vis-à-vis du climat.	20 jours
<b>Scénario 2</b> Climatisation permanente	Le but est non seulement d'apprécier le comportement du matériau soumis à un conditionnement tout en évaluant la consommation énergétique qu'il induit pour un fonctionnement permanent.	4 jours
<b>Scénario 3</b> Usage de bureau	Le but est d'apprécier le comportement du matériau soumis à un conditionnement non permanent (entre 7h et 16h pour un usage de bureau, entre 16h et 7h pour un usage résidentiel) tout en évaluant la consommation énergétique qu'il induit.	
<b>Scénario 4</b> Usage résidentiel		

## ii. Données simulées

Les données seront obtenues à partir d'une modélisation numérique des bâtiments pilotes préalablement instrumentés. La démarche mis en œuvre est de réaliser un modèle numérique représentatif des conditions réelles observées au cours des phases précédentes, afin de pouvoir explorer les effets de diverses possibilités d'usage pour des périodes beaucoup plus longues, ainsi que leurs possibles retombés économiques pour des cas de construction courantes. Pour ce faire après conception du modèle et avant exploitation, celui-ci sera calibré suivant les directives ASHRAE 90.1-2004 et 90.2-2004 principalement basées sur trois indicateurs statistiques présentés de manière succinctes au sein du Tableau 5.

**Tableau 5 : Critères de validation du modèle numérique (Ouédraogo *et al.*, 2024)**

Désignation	Abréviation	Expression mathématique	Objet	Valeurs cibles
Erreur de Biais Normalisé	NMBE	$\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^N (m_i)}$	Il s'agit d'un index adimensionnel estimant la moyenne des différences entre les mesures expérimentales et celles simulées.	< 10%
Coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne	CVRMSE	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2 / N}}{\bar{m}}$	Il s'associe au précédent afin de fournir une appréciation sur la bonne représentativité du model vis-à-vis des données mesurées.	< 30%
Coefficient de détermination	R <sup>2</sup>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}$	Traite de la qualité de l'ajustement d'un modèle par rapport aux données mesurées.	> 90%
		<i>m<sub>i</sub> : valeurs mesurées</i>	<i>s<sub>i</sub> : valeurs simulés</i>	
		<i>m̄ : valeurs moyenne des données mesurées</i>	<i>N : nombre de valeurs du jeu de données</i>	

Les hypothèses pris en compte pour cette modélisation sont les suivantes :

- Il n'y a aucun apport de chaleur dans le milieu interne des bâtiments
- Les pièces (portes et fenêtres) sont considérées fermés durant toute la durée de l'observation.
- Les débords de toiture ont été modélisés comme ombrage.
- Chaque bâtiment est modélisé avec deux zones thermiques qui sont le local proprement dit et ensuite le comble sous toiture.

## b) Méthodologie de traitement de données

Les données résultantes de l'exploitation des différents modèles numériques pourront être directement analysé. Par contre pour ce qui est des données résultantes des observations et enregistrements obtenues en conditions réelles, celles-ci restent vulnérables à différentes erreurs liées à de possibles dysfonctionnements des capteurs, de panne d'alimentation et d'autres artefacts de mesure. De ce fait, afin de garantir la fiabilité des mesures nous effectuons dans un premier temps à une vérification, voire une correction statistique du jeu de données vis à vis de possibles valeurs aberrantes, avant toute analyse. Pour ce faire, la méthode de détection statique retenue est : L'écart interquartile (IQR).

Il est question d'une méthode statistique généralement utilisé pour détecter, voire supprimer des valeurs aberrantes d'un jeu de données. L'idée ici est d'éviter au jeu de données d'être influencées par des valeurs extrêmes pouvant résulté d'artefacts de mesures. Pour la présente étude, elle s'avère pertinente du fait de sa robustesse face aux données asymétriques, pouvant analyser un jeu de données continues, sans supposée une quelconque hypothèse de

distribution préalable (Jamshidi *et al.*, 2022).

Dans le détail, cette méthode considère comme valeur aberrante toute valeur se trouvant à l'extérieur de l'intervalle  $[Q_1 - 1,5EI ; Q_3 + 1,5EI]$ .  $Q_1$ ,  $Q_3$  et  $EI$  étant respectivement le premier quartile, le troisième quartile de la série de mesures examinée et l'écart entre les deux quartiles précédemment énoncés. Elle sera appliquée pour la correction statistique du jeu de donnée afin d'éliminer les valeurs grossièrement aberrantes.

## c) Méthodologie d'analyse des données

### i. Analyse du confort thermique

Une fois les données relatives au confort thermique collectées, et traitées. Elles seront mises en forme de manière à faire ressortir les performances d'amortissement thermique et de déphasage thermique des matériaux mis en comparaison. Cette démarche n'est pas nouvelle, et s'adapte bien au type de données recueillies (Hema *et al.*, 2021; Zoma *et al.*, 2023).

L'amortissement thermique étant défini comme « la réduction de l'amplitude des variations de température à travers un matériau » permettant ainsi de limiter les fluctuations thermiques entre l'intérieur et l'extérieur » (Yahoda and Wright, 2006). Pour le calcul nous utilisons l'expression est la suivante :

$$\text{Amortissement thermique} = T_{ext.} - T_{int.}$$

Avec  $T_{ext.}$  : Température extérieure à un moment  $i$

$T_{int.}$  : Température intérieure à un moment  $i$

Le déphasage thermique quant à lui peut être défini comme « le décalage temporel entre le moment où la température maximale est atteinte à l'extérieur et le moment où cette température maximale se ressent à l'intérieur » (Verbeke and Audenaert, 2018). Pour son calcul nous utiliserons l'expression suivante :

$$\text{Déphasage thermique} = t_{int.} - t_{ext.}$$

Avec  $t_{ext.}$  : Heure du pic de température extérieure

$t_{int.}$  : Heure du pic de température intérieure

Etant situé au sein d'un climat aux pics de températures extrêmes, l'une des caractéristiques d'un bon matériau serait donc de minimiser l'intervalle de température entre l'intérieure et l'extérieur. Il s'agit ici d'avoir l'amortissement thermique (écart absolu) le plus important tant envers le pic de froid que le pic de chaleur. Pour ce qui est du déphasage, il traduit la capacité du matériau à différer l'apparition du pic de chaleur dans le bâtiment. En fonction de l'usage fait du bâtiment cette propriété peut être avantageuse ou désavantageuse

vis-à-vis de l'ambiance thermique et de la consommation énergétique du bâtiment. Il sera donc question de l'évaluée en fonction du contexte fixé.

## ii. Analyse de la consommation énergétique

La phase de collecte de donnée permettra de disposer de valeurs de consommation d'énergie de froid à fréquence horaire. Une fois c'est donné obtenues, elles sont quantifiées à une échelle de temps choisi (jours, mois, années) afin de pouvoir les mettre en comparaison suivant le scénario observé.

## iii. Analyse du coût économique

L'analyse économique s'appuiera sur les résultats obtenus de la précédente. Il sera question de mettre en évidence dans un premier temps, les données de tarification de la consommation énergétique en vigueur au Burkina Faso. Par la suite, à partir du barème de prix connue, évaluer les retombées financières découlant des valeurs de consommation énergétique du bâtiment à l'échelle d'une année et à l'échelle de la durée de vie du bâtiment. L'objectif étant de quantifier le gain ou la perte financière entraînée par un matériau vis-à-vis d'un autre, nous évaluons le coût engendré par le système de climatisation rapportée au m<sup>2</sup> de la surface de l'espace conditionné. Les données d'entré communes aux deux approches sont résumées au sein du Tableau 6.

**Tableau 6: Données de bas de l'estimation financière**

Tension	Basse tension Monophasé 2 fils
Catégorie et tranche tarifaire	Monophasé normal : 20A – 30A
Tarifs au kWh	96 F CFA entre 0 et 50 kWh
	102 F CFA entre 51 et 200 kWh
	109 F CFA à plus de 200 kWh
Redevance mensuelle	764 F CFA
Prime fixe mensuelle	355 F CFA par Ampère

# IV. RESULTATS & DISCUSSION

## 1. Analyse de la performance thermique des parois

Dans un premier temps, nous étudions le comportement propre à la paroi proprement dite, pour ce faire nous exploitons principalement en données d'entrée, les différentes mesures effectuées par les capteurs disposés sur la surface intérieur et extérieur de la façade nord de chaque bâtiment. Bien sûr nous ne considérons que les mesures prises sans mise en marche du système de climatisation.

### a) Saison froide

La durée d'observation s'étend du 02 octobre 2024 au 01 Décembre 2024. Notre approche s'appuie sur les capacités de déphasage thermique et d'amortissement thermique

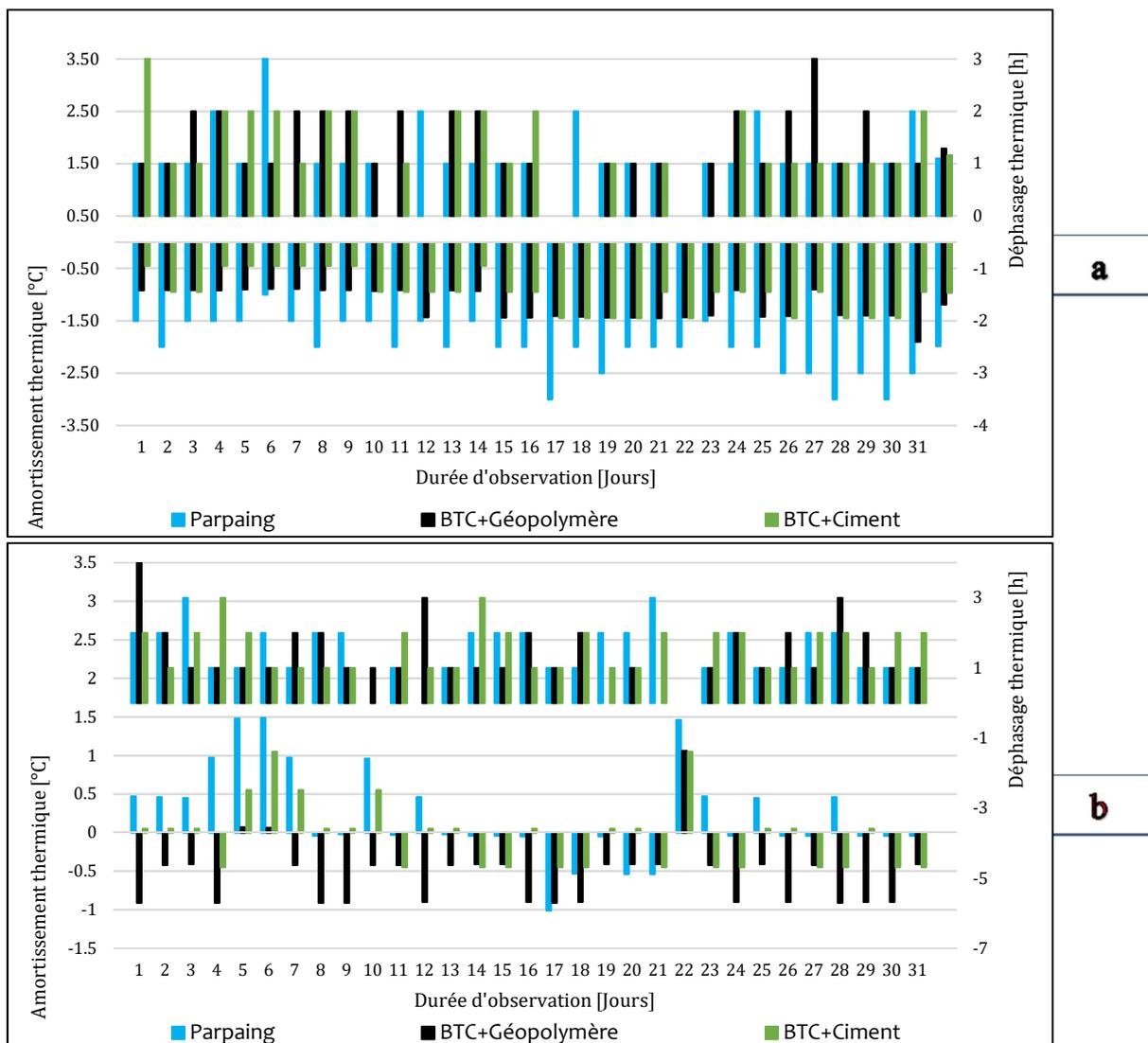


Figure 4: Amortissement - Déphasage (Saison froide)

mesurés vis à vis de ces deux extrêmes.

La Figure 4 nous présente pour les trois bâtiments pilotes les valeurs d'amortissement thermique (histogramme inférieur) et de déphasage thermique (histogramme supérieur) obtenues durant la période d'observation, vis-à-vis du pic de froid (a) et du pic de chaleur (b). Les données étant prises simultanément et les bâtiments étant situés dans la même zone climatique, les contraintes sont donc supposées identiques pour les trois bâtiments pilotes et les valeurs d'amortissement thermique et de déphasage thermique sont calculés en tenant compte uniquement des températures de surface et non de celle du milieu ambiant.

Vis-à-vis du froid, l'on observe une prédominance du parpaing pour l'amortissement thermique (1,98°C). Celui-ci est suivie par la BTC géopolymère (1,19°C). La BTC ciment ne se démarque pas par ses capacités d'amortissement (0,97°C), mais affiche un déphasage thermique moyen (70min). Pour le déphasage, c'est a BTC géopolymère qui affiche les meilleures performances (77min). La marge globale est de 11min [66min – 77min].

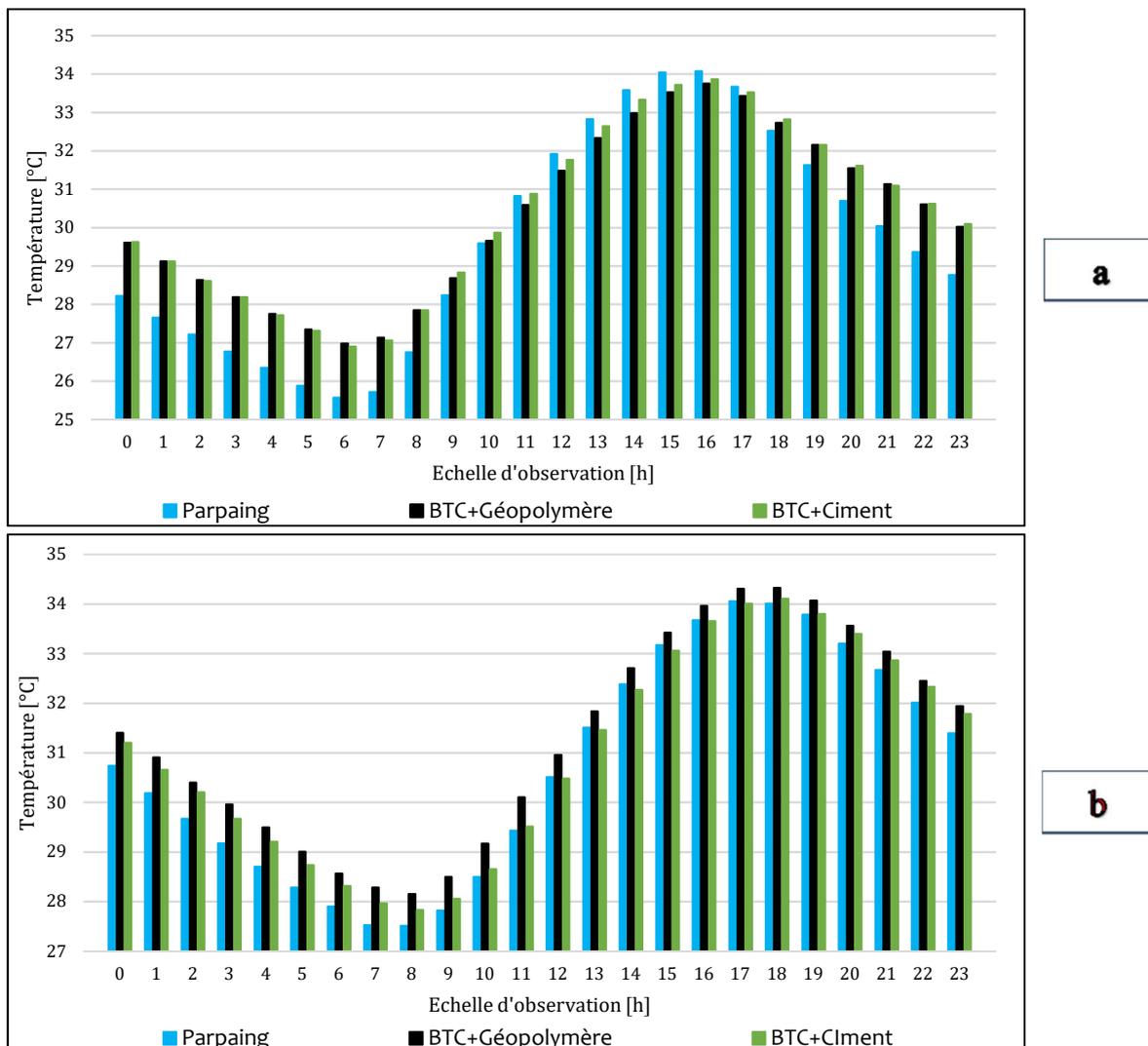


Figure 5: Température moyenne sur 24h aux surfaces de la paroi (Saison froide)

Lorsqu'on essaie de faire varier notre point de vue, en nous basant désormais sur le pic de chaleur observé dans la journée, la BTC géopolymère semble démontré beaucoup moins d'avantage que précédemment. Ses valeurs d'amortissement thermique sont majoritairement négatives (en moyenne  $-0,54^{\circ}\text{C}$ ), traduisant une supériorité de la température de sa surface interne vis-à-vis de la surface externe de la paroi. Ce phénomène de surchauffe s'observe plus modérément chez la BTC ciment (en moyenn  $-0,05^{\circ}\text{C}$ ).

Ainsi, en considérant le pic de chaleur, le parpaing semble être le matériau le plus adapté vis-à-vis de l'amortissement thermique (en moyenne  $0,24^{\circ}\text{C}$ ). Pourtant la Figure 5 semble poser quelques doutes en laissant remarqué qu'à la différence des autres, la surface extérieure (a) de la paroi en parpaing est beaucoup plus influencé par le milieu ambiant. Elle présente une valeur de température extérieure plus imporante aux heures chaudes ( $0,33^{\circ}\text{C}$  de plus que la BTC géopolymère et  $0,21^{\circ}\text{C}$  de plus de la BTC ciment), et beaucoup plus faibles aux heures froides ( $1,4^{\circ}\text{C}$  de moins que la BTC géopolymère et  $1,32^{\circ}\text{C}$  de moins de la BTC ciment), ce qui pourrait biaisé notre appréciation de sa performance comparativement aux autres matériaux.

## b) Saison chaude

Au cours de la saison chaude, la période d'expérimentation s'étend du 11 Mars 2025 au 07 Avril 2025. Une fois de plus, le cycle dominant la réponse thermique observée est celui de 24h. Comme pour la période froide, nous nous appuyons principalement sur les capacités de déphasage et d'amortissement mesurés vis à vis de ces deux extrema (a, b) présents dans le cycle. Pour ce faire la Figure 6 nous permet une visualisation des valeurs d'amortissement et de déphasage obtenues au cours de la période susmentionnée. En rappel, les mesures sont primes de manière simultanées pour les trois bâtiments.

Tout d'abord il est important de souligné la hausse de température au cours de cette saison. Pour des sollicitations extérieures variantes en moyenne entre  $23,33^{\circ}\text{C}$  à  $35,29^{\circ}\text{C}$  au cours de la saison froide, l'intervalle moyen est à présent de  $26,00^{\circ}\text{C}$  à  $41,92^{\circ}\text{C}$ . L'on constate donc dans un premier temps une hausse significative (en moyenne  $4,65^{\circ}\text{C}$  en plus) des sollicitations climatiques sur nos trois batiments.

En réponse à cette évolution, si l'on s'arrête uniquement sur la paroi, l'on constate pour ce qui est de l'amortissement thermique de meilleures capacités du côté du parpaing. Aussi bien vis-à-vis du pic froid (en moyenne  $-2,23^{\circ}\text{C}$ ) que du pic chaud (en moyenne  $1,08^{\circ}\text{C}$ ), celui-ci affiche de meilleures performances. La BTC géopolymère affiche d'assez bonnes capacités vis-à-vis du pic froid (en moyenne  $-1,25^{\circ}\text{C}$ ), elle est constamment en surchauffe vis-à-vis du pic chaud (en moyenne  $-0,32^{\circ}\text{C}$ ). La BTC ciment qui affichait précédemment quelques jours en

surchauffe, semble avoir amélioré sa réponse thermique (en moyenne  $-0,86^{\circ}\text{C}$  vis-à-vis du pic de froid et  $0,37^{\circ}\text{C}$  vis-à-vis du pic de chaleur). Bien évidemment celle-ci reste encore inférieure à celle du parpaing, mais cela laisse entrevoir pour ce matériau de possibles capacités d'adaptation positive vis-à-vis des contraintes climatiques grandissantes.

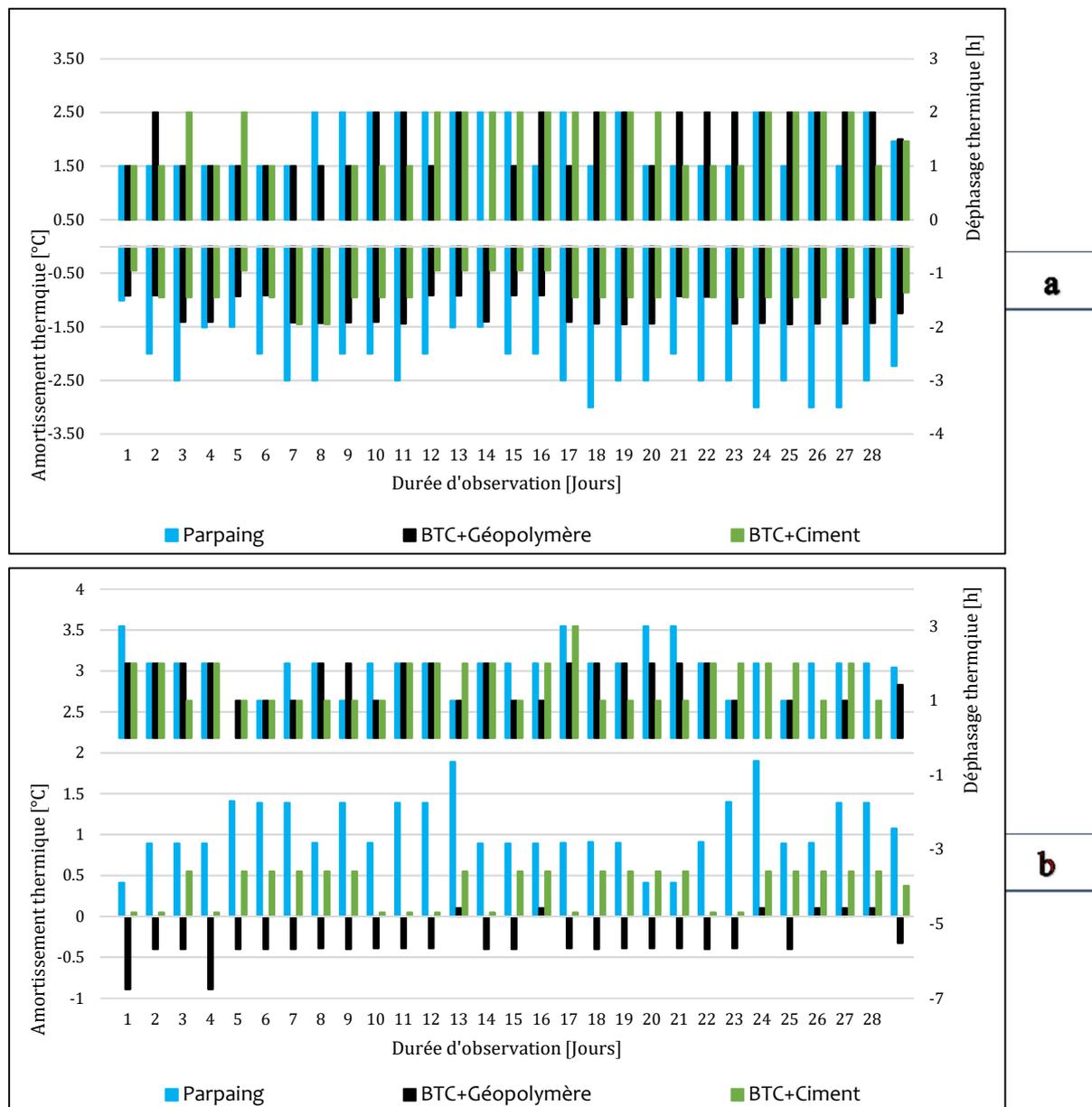


Figure 6: Amortissement - Déphasage (Saison chaude)

Néanmoins, la Figure 7 nous rappelle comme remarqué en saison froide, la forte sensibilité de la paroi extérieure (a) du parpaing vis-à-vis des variations climatiques ambiante. Cette dernière observation remet en doute de possibles déductions de supériorité du parpaing vis-à-vis de la performance globale. Bien que les valeurs d'amortissement thermique des matériaux tel que la BTC ciment semblent plus faibles, ceux-ci semblent moins soumis aux fluctuations climatiques extérieures.

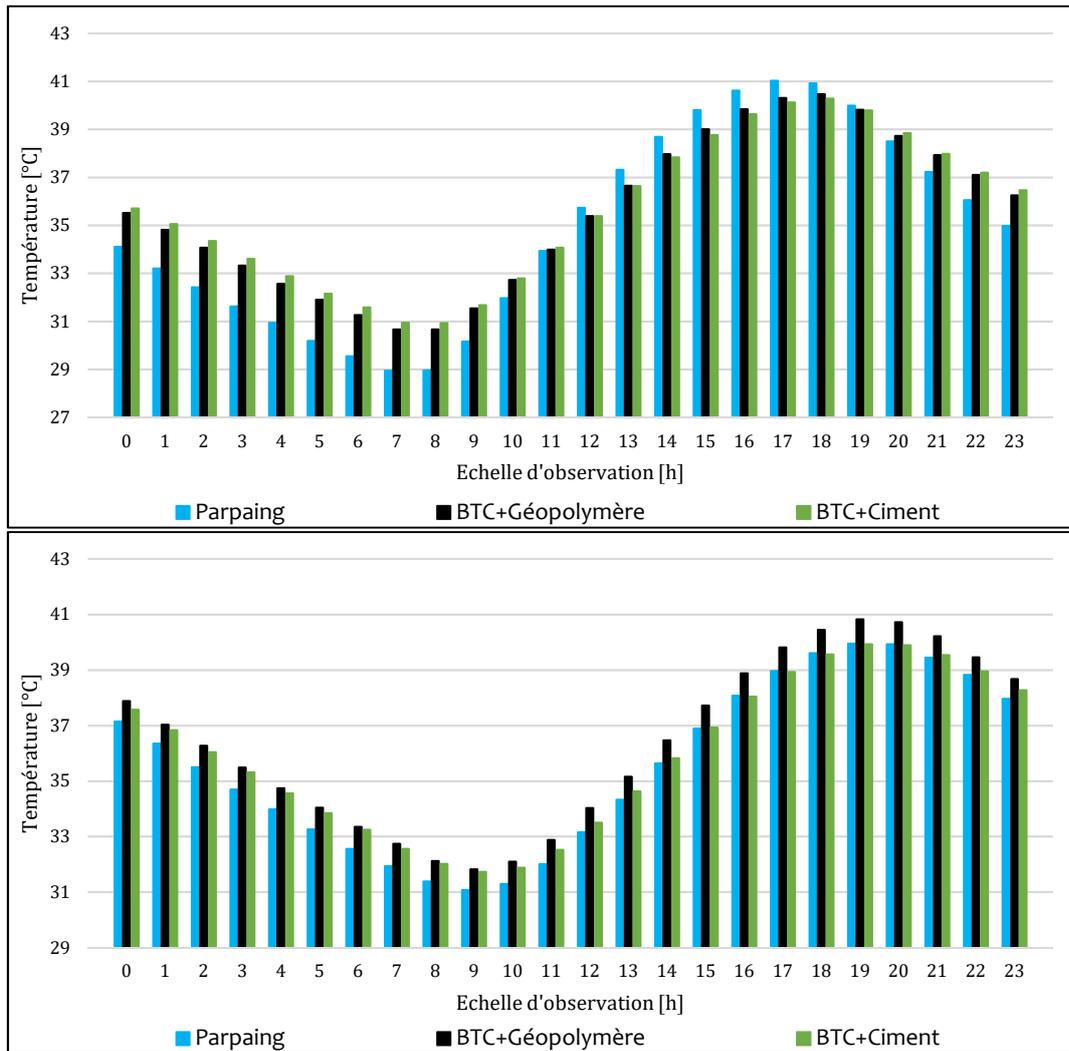


Figure 7: Température moyenne sur 24h aux surfaces de la paroi (Saison chaude)

Sur le plan du déphasage, il est difficile d'affirmer, une quelconque supériorité vis-à-vis du pic froid (écart moyen de 2min). Mais en considérant le pic chaud, le parpaing affiche de meilleurs performance (en moyenne 114min), devant le la BTC ciment (en moyenne 92min) et la BTC géopolymère (en moyenne 86min). Néanmoins, le nombre d'occurrence (assez réduit) ne permet pas une affirmation définitive.

### c) Synthèse partielle & Discussion

Il ressort donc des observations effectuées, la forte aptitude de la paroi en parpaing à amortir les sollicitations climatiques du milieu ambiant. Pour le cas de la saison chaude, l'amortissement thermique de la paroi en parpaing est en moyenne 4,5 fois supérieure à l'amortissement thermique de la BTC géopolymère, et 3 fois supérieure à celui de la BTC ciment (Figure 6b). Toutefois, elle reste plus sensible que les autres matériaux aux fluctuations climatiques extérieures.

Ses propriétés thermiques (*Tableau 1 et Annexe 1*) nous permettent de comprendre ce comportement. L'enduit appliquée à la surface du mur a une effusivité propre ( $1367,48 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{S}^{0.5}$ ) supérieure à ceux de la BTC géopolymère ( $1123,20 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{S}^{0.5}$ ) et de la BTC ciment ( $1352,73 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{S}^{0.5}$ ). L'effusivité traduisant la capacité du matériau à régir avec l'air ambiant, cela pourrait partiellement expliquer la sensibilité du parpaing vis-à-vis des fluctuations climatiques extérieures. A la suite de la couche d'enduit le parpaing proprement dit présente une effusivité beaucoup plus faible que l'enduit ( $894,43 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{S}^{0.5}$ ). Aussi on remarque une baisse du coefficient de transmission thermique de la surface de la paroi ( $4,85 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) vers l'intérieur de la paroi ( $2,80 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Cela pourrait expliquer partiellement les fortes capacités d'amortissement thermique du parpaing.

Dans le cas de la BTC géopolymère, on remarque sa prédisposition à la surchauffe (amortissement thermique moyen de  $-0,32^\circ\text{C}$  en saison chaude et  $-0,54^\circ\text{C}$  en saison froide). En effet, sa température intérieure, au pic des sollicitations journalières, est majoritairement au-dessus de sa température extérieure. Pour ce qui est de la BTC Ciment elle présente également un profil intéressant, affichant d'assez bonnes capacités d'amortissement. Les performances de la BTC ciment restent inférieures à celle du parpaing. En plus de cela elle semble mieux gérer les pics de sollicitations (amortissement thermique moyen positif) que la BTC géopolymère (amortissement thermique moyen négatif) sous contrainte élevée (Saison chaude).

Enfin, Les capacités de déphasage semblent plus communes pour les trois matériaux vis-à-vis du pic de froid. Vis-à-vis du pic de chaleur elles s'améliorent pour le parpaing (progression moyenne de 66min à 114min) avec l'augmentation des sollicitations thermiques.

## **2. Analyse de l'ambiance thermique intérieure**

Dans le but de parvenir à une appréciation plus complète des flux de chaleurs au sein de nos bâtiments pilotes, nous nous intéressons à présent au milieu intérieur du bâtiment. En effet, l'enveloppe du bâtiment se compose d'autres éléments en dehors des parois (toiture, comble...). Nous voulons apprécier l'influence de la nature des parois dans ce collectif, vis-à-vis de l'ambiance thermique intérieure. Dans cette optique notre attention se porte à présent sur les données collectées à partir des capteurs disposés au centre de la pièce et dans le milieu extérieur.

### **a) Saison froide**

La période d'observation pour le scénario 1 est identique à celle mentionnée pour l'étude des parois en saison froide. On rappelle que les mesures ont bien été prises en simultané et les

ouvertures restent fermées durant toute la durée de l'essai. Pour ce qui est des scénarios 2,3 et 4, ils sont réalisés à la suite du scénario 1 suivant les mesures préconisées au sein du Tableau 4.

### i.Sans climatisation

Au cours de la collecte de données durant la saison froide, on observe entre le pic de froid extérieur et le pic de chaleur extérieure, un intervalle de température avoisinant en moyenne 11,97°C. La Figure 8 montre que la BTC géopolymère présente des valeurs de température les plus élevées à l'approche des pics de froid (de 00h à 07h) et des valeurs de température les moins élevées (de 08h et 16h) au voisinage des pics de chaleur. La sensibilité du parpaing est moins visible en considérant le milieu intérieur. On note entre le pic de froid et le pic de chaleur un intervalle moyen de 6,85°C pour le bâtiment en parpaing, 6,71°C pour le bâtiment en géopolymère et 6,87°C pour le bâtiment en BTC ciment.

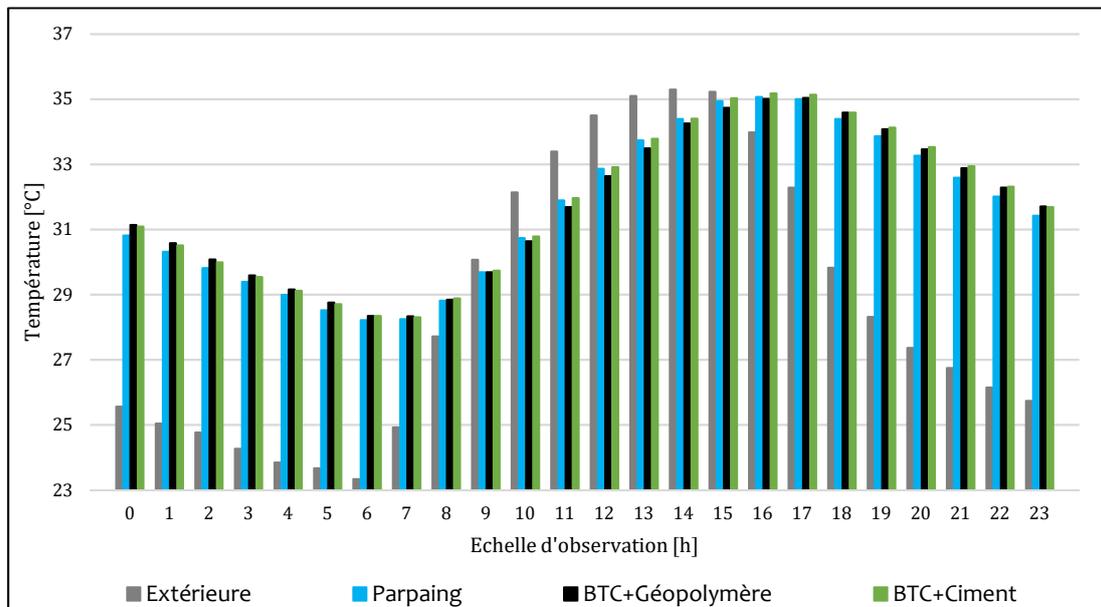


Figure 8: Température moyenne sur 24h à l'intérieure et à l'extérieure (Saison froide)

La Figure 9 présente les valeurs d'amortissement thermique (histogramme inférieure) et de déphasage thermique (histogramme supérieure) obtenues en tenant compte des valeurs de température relevés pour le milieu intérieur des bâtiments et pour le milieu extérieur ambiant. Ces valeurs sont présentés vis-à-vis du pic de froid (Figure 9a) et vis-à-vis du pic de chaleur (Figure 9b).

L'ambiance intérieur de la BTC géopolymère est moins soumis aux variations climatiques extérieures, par rapport à la BTC ciment. En considérant la médiane statistique des valeurs obtenues, la BTC géopolymère présente un amortissement thermique et un

déphasage thermique plus important que la BTC ciment (Tableau 7). Le parpaing présente l'amortissement thermique le plus important des 3 matériaux vis-à-vis du pic de chaleur, mais il présente l'amortissement le plus faible vis-à-vis du pic de froid. Toutefois, durant la saison froide, les différences entre les matériaux restent assez légères (de l'ordre de 0,02°C) et varie en fonction de la journée d'observation.

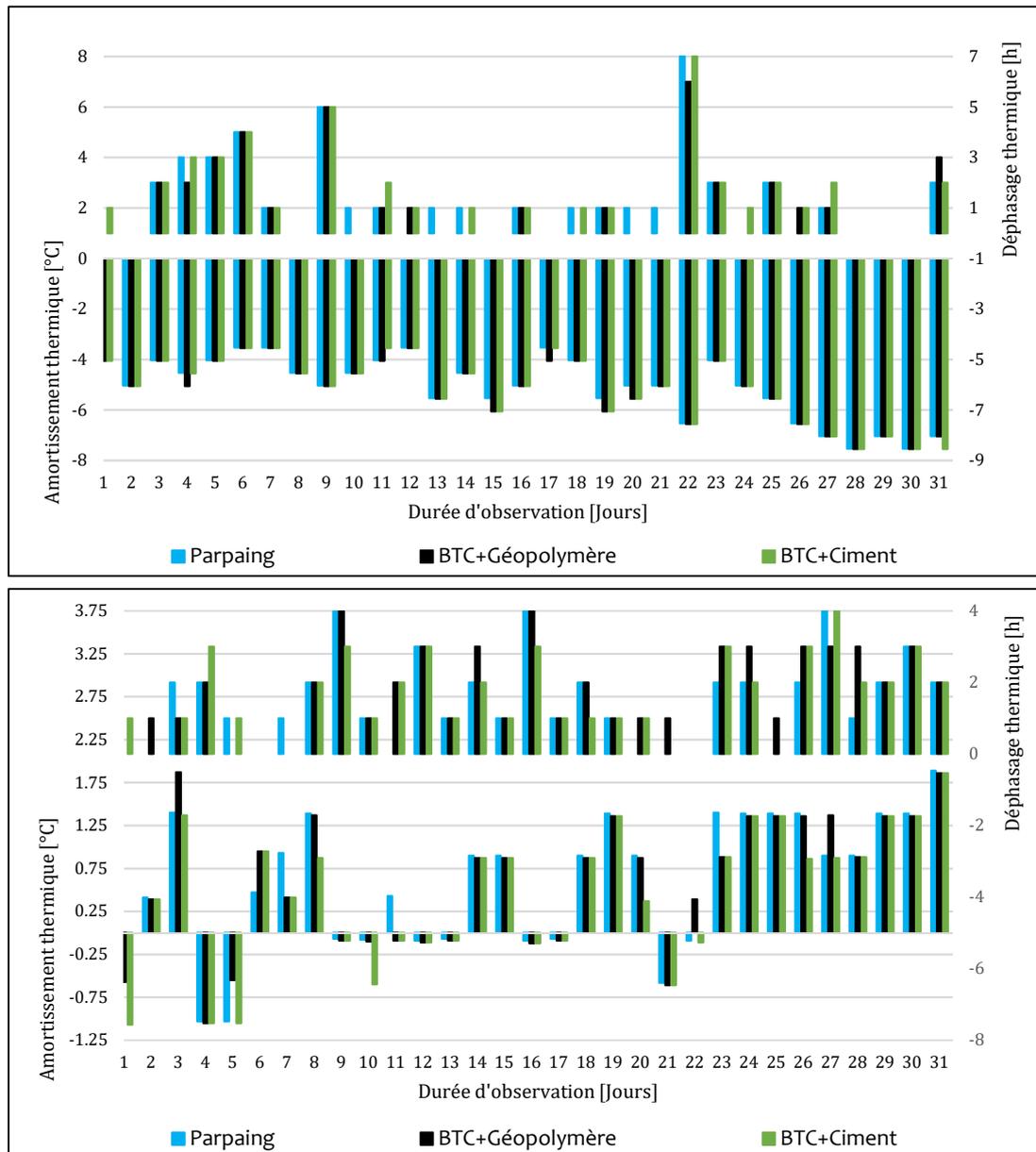


Figure 9: Amortissement - déphasage intérieur (Saison froide)

Pour le déphasage, il est assez difficile d'émettre une opinion à partir d'observation visuelle, du fait que les trois matériaux semblent présentés des capacités quasi similaires durant la période froide. Une distribution statistique des valeurs collectées montre qu'en valeur médiane, la BTC géopolymère présente le déphasage le plus important (Tableau 7). Si l'on se base sur les moyennes des valeurs obtenues le déphasage thermique de la BTC géopolymère est supérieure de 15min à celui du parpaing et de 10min à celui de la BTC ciment.

**Tableau 7: Distribution statistique des valeurs relevés durant la saison froidee**

	Vis-à-vis du pic de chaleur						Vis-à-vis du pic de froid					
	Amortissement			Déphasage			Amortissement			Déphasage		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Minimum	-1,05	-1,05	-1,07	0,00	0,00	0,00	-7,53	-7,55	-7,55	0,00	0,00	0,00
1 <sup>er</sup> Quartile	-0,07	-0,09	-0,10	1,00	1,00	1,00	-5,53	-6,05	-6,05	0,00	0,00	0,00
Médiane	0,90	0,87	0,86	1,00	2,00	1,00	-5,03	-5,05	-5,05	1,00	1,00	1,00
3 <sup>e</sup> Quartile	1,39	1,36	0,92	2,00	3,00	2,50	-4,03	-4,05	-4,05	2,00	2,00	2,00
Maximum	1,89	1,87	1,86	4,00	4,00	4,00	-3,53	-3,55	-3,55	7,00	6,00	7,00
(*)						<i>M2 : Bâtiment en BTC géopolymère</i>						
<i>M1 : Bâtiment en parpaing</i>						<i>M3 : Bâtiment en BTC ciment</i>						

## ii. Climatisation permanente

Durant la phase de climatisation permanente des bâtiments pilotes, on note de manière globale une consommation égale pour la BTC géopolymère et le parpaing de ciment (Figure 10a). Le maximum de consommation énergétique est observée chez la BTC ciment, toutefois il est important de souligner la faiblesse de la variation observée qui est de 0,5kWh. La Figure 10b propose une vision plus détaillée des résultats présentés plus haut. On note clairement le rôle joué par le système de climatisation mis en place. Pour une consommation quasi nulle de 23h à 10h, celle-ci augmente considérablement à partir de 11h pour atteindre son pic de consommation à 17h pour la BTC géopolymère, et 16h pour le parpaing et BTC ciment. En observant la moyenne horaire de la consommation énergétique pour chaque matériau, on note un déphasage plus important du pic de consommation vis-à-vis du pic de température extérieure chez la BTC géopolymère. Par contre la chute de consommation qui suit est beaucoup plus brutale chez celle-ci par rapport aux autres matériaux.

Au cours de la hausse de température (11h-16h) on observe une consommation d'énergie nettement inférieure chez la BTC ciment par rapport au parpaing, par contre la chute de consommation qui suit le pic de température ambiante est plus continue chez le parpaing que chez la BTC ciment ce qui soutient la thèse selon laquelle le parpaing engendre une plus grande sensibilité du milieu intérieur de l'enveloppe aux variations climatiques extérieures.

Aussi, en comparaison à la BTC ciment, la BTC géopolymère présente une allure de consommation plus discontinue durant la hausse de température (10h-15h) traduisant une possible meilleure conservation de l'énergie de froid. Toutefois cette consommation se verra augmenter significativement vis-à-vis des autres matériaux à partir du franchissement du pic de chaleur au sein du milieu extérieur.

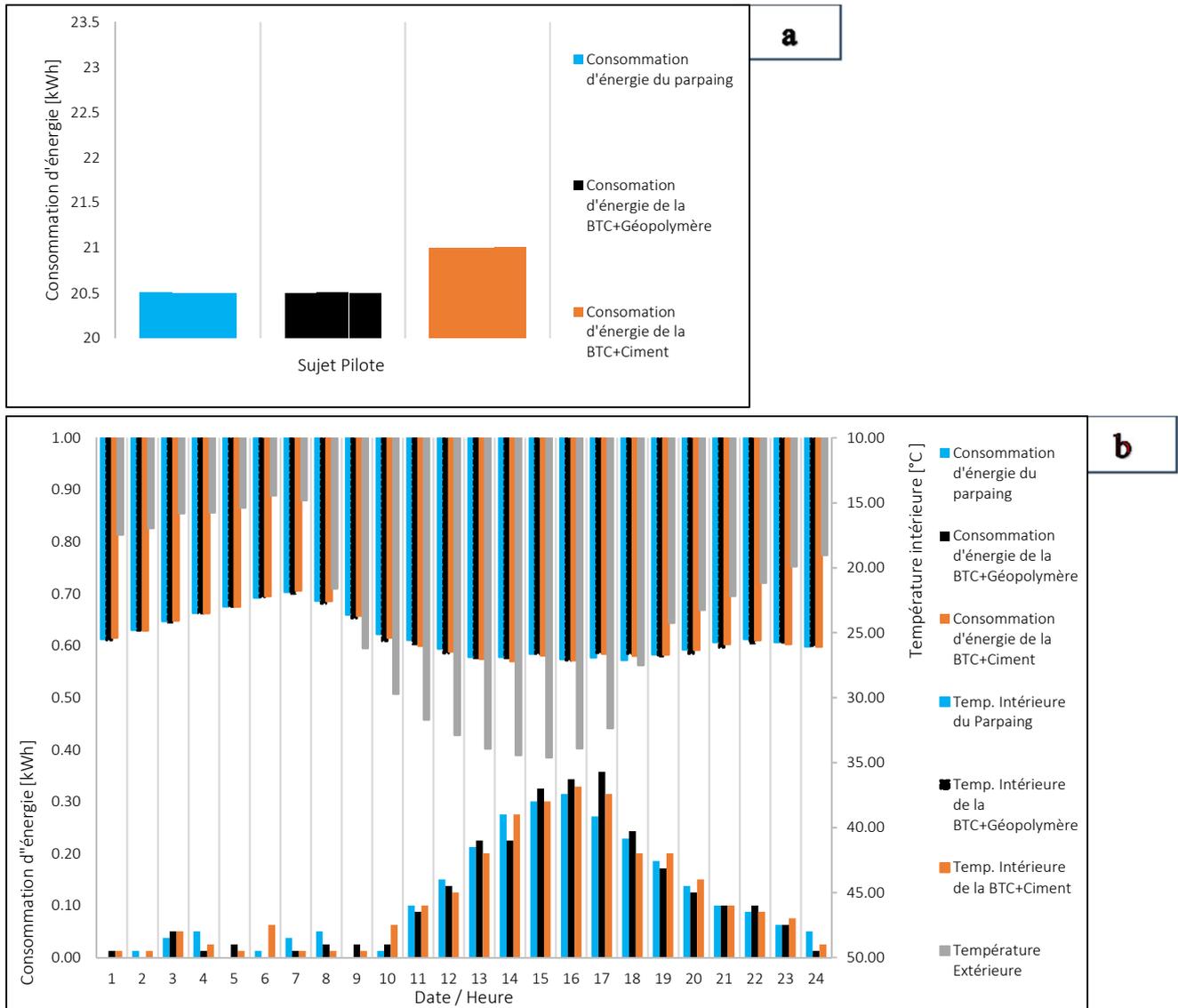


Figure 10 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 2 – Saison froide)

### iii. Climatisation périodique

Dans le cadre du scénario 3 et 4, le système de climatisation est mis en marche de manière périodique suivant 2 schémas d'utilisation : Le mode bureau et le mode résidentielle. La Figure 11a permet une visualisation de la consommation globale des trois bâtiments pilotes pour ce qui est du scénario 3. De manière globale et en accord avec les observations déjà effectuée sur le scénario 2, la BTC ciment affiche une consommation totale plus basse que les deux autres matériaux qui quant à eux sont à égalité. Bien évidemment on remarque une fois de plus la faiblesse de la différence observée (0,5kWh), les raisons possibles étant énoncées plus haut. Le détail de cette consommation exposé par la Figure 11b, nous permet effectivement d'observer un meilleur comportement chez la BTC ciment qui présente non seulement une allure plus basse durant la hausse de température (9h-15h), mais aussi un pic d'énergie de

consommation plus bas que les deux autres matériaux.

La BTC géopolymère quant à elle présente également une allure de consommation assez basse et discontinue, mais un pic de consommation plus important, apparaissant après le pic de température extérieure. Cette dernière caractéristique remet le niveau de consommation de la BTC géopolymère à égalité avec le parpaing qui présente un pic de consommation légèrement plus bas mais une allure de consommation plus continue et plus élevée.

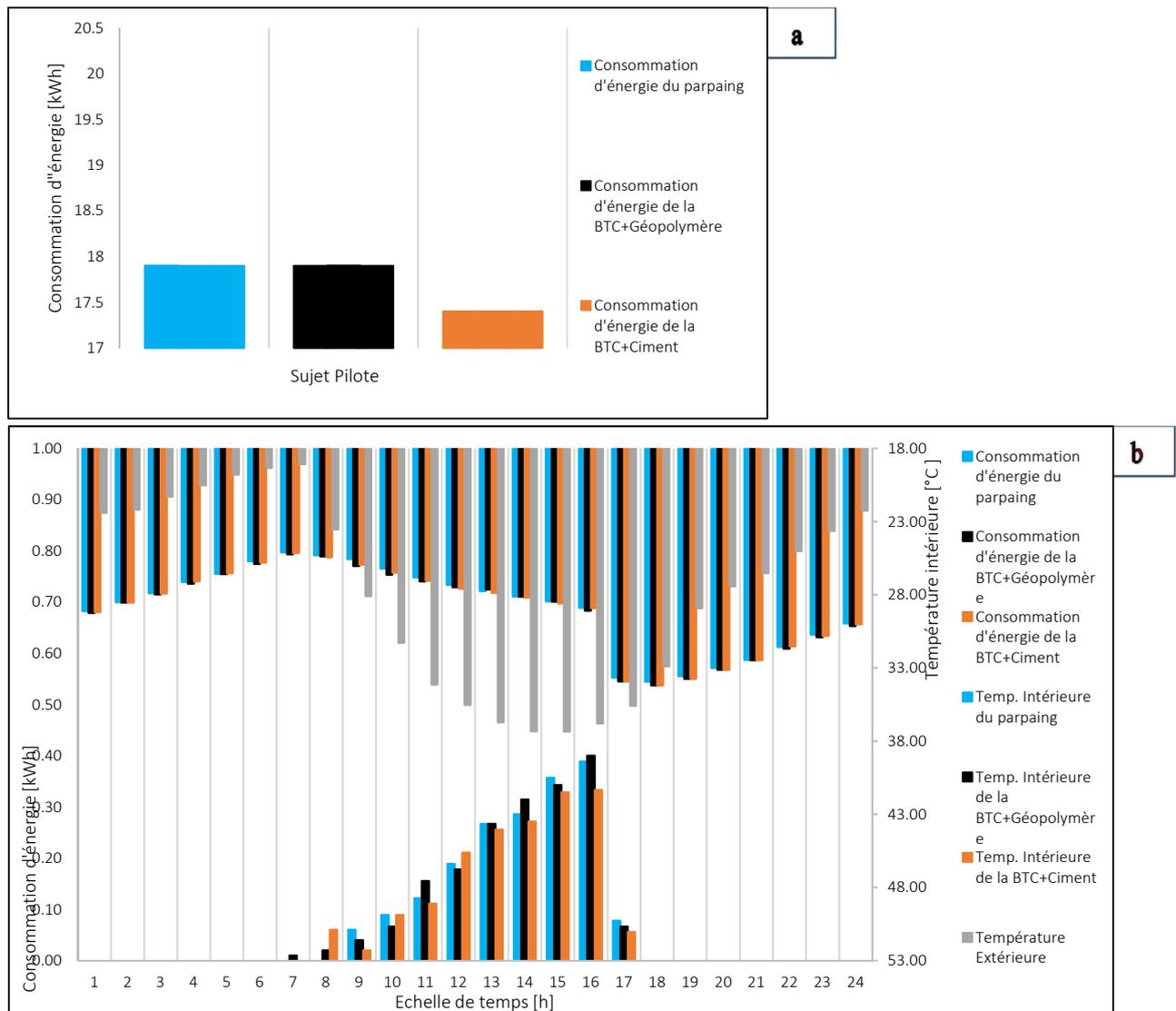


Figure 11 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 3 – Saison froide)

Pour ce qui est du scénario 4 (Figure 12a), la BTC géopolymère affiche pour la saison froide un minimum de consommation accompagné d'un écart beaucoup plus important que ceux déjà obtenus (1,4kWh – 1,9kWh). La BTC ciment affiche pour ce cas de figure la valeur de consommation maximale. Aussi, on note vis-à-vis du parpaing un écart plus semblable à ceux déjà enregistrés (0,5kWh).

Dans le détail (Figure 12b), on observe très peu de consommation d'énergie durant la journée (7h-16h), dû au fait que la climatisation n'est active en journée uniquement le weekend. En semaine celle-ci est mis en marche une heure après le pic de température extérieure et très probablement après le pic de température intérieure au géopolymère également, raison pour laquelle le pic de consommation est remarqué à l'heure de démarrage (16h-17h) et est sensiblement identique aux trois bâtiments.

Il est également important de noter une remontée de la consommation énergétique du parpaing au cours de la phase de chute (après le pic de température extérieure et le pic de consommation énergétique). A l'opposée de la chute brutale de consommation observé chez la BTC géopolymère ou de l'allure plus douce qu'affiche la BTC ciment, on note une légère remontée de la consommation énergétique 2h après avoir franchi le pic de consommation et 1h après confirmation de la chute de consommation.

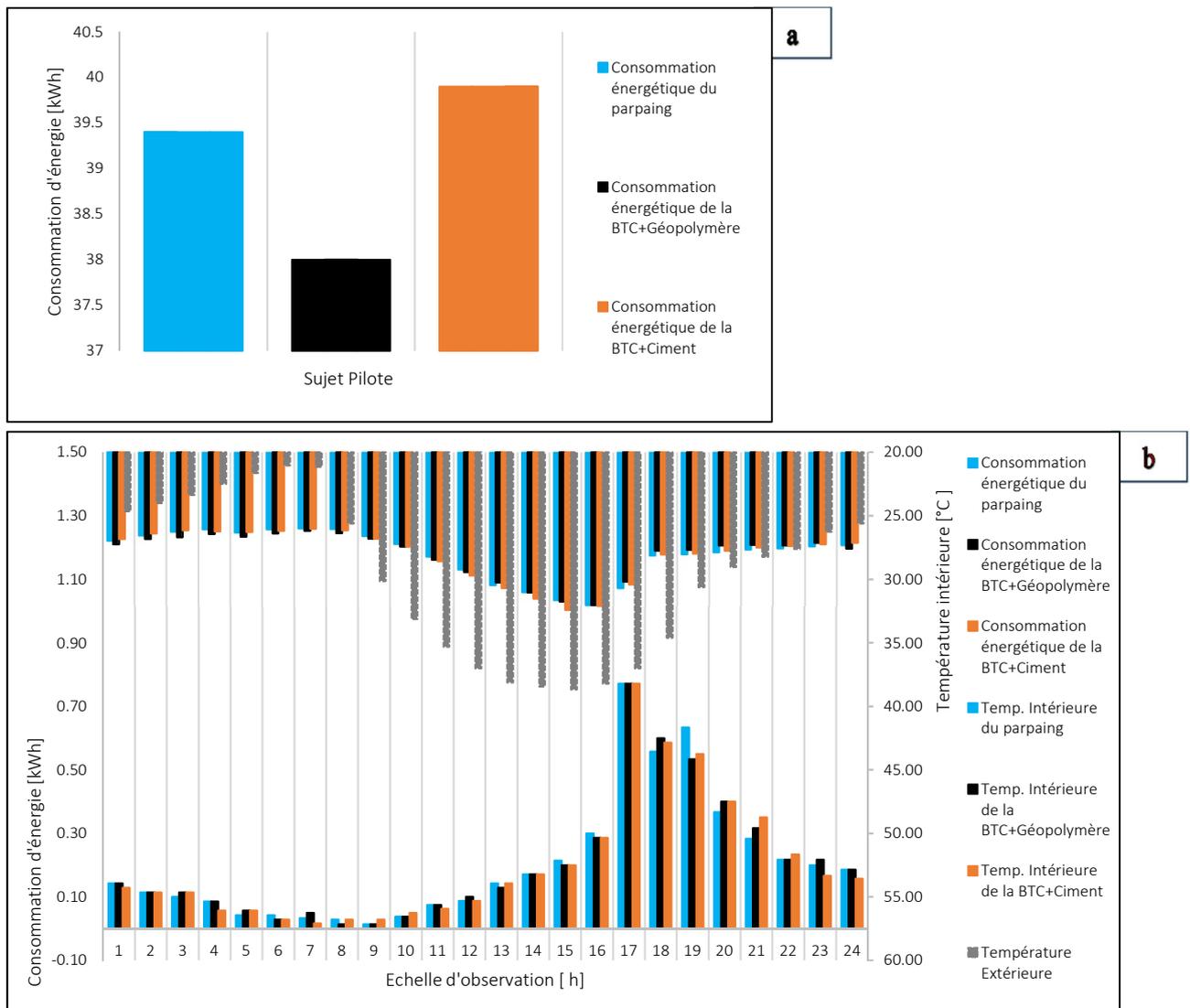


Figure 12 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 4 – Saison froide)

## b) Saison chaude

La période d'observation pour le scénario 1 est identique à celle mentionnée pour l'étude des parois en saison chaude. On rappelle que les mesures ont bien été prises en simultanément. Pour ce qui est des scénarios 2, 3 et 4, ils sont réalisés à la suite du scénario 1 suivant les mesures préconisées au sein du Tableau 4.

### i. Sans climatisation

Au cours de la collecte de données durant la saison chaude, on observe un intervalle moyen plus important entre les pics de température extérieures (en moyenne 16°C entre le pic de froid et pic de chaleur). La médiane des valeurs de température collectées a progressé de 5,47°C (de 27,59°C en saison froide à 33,06°C en saison chaude). Sous ces sollicitations climatiques plus fortes qu'en saison froide (fluctuations plus importantes, température plus élevées) le parpaing affiche pour ce qui est de la température intérieure, une allure nettement en dessous de celle affichée par ses concurrents (Figure 13). En moyenne on note durant une journée une différence de 0,27°C avec la BTC ciment et 0,31°C avec la BTC géopolymère.

La BTC ciment qui au cours de la saison froide aura déjà eu à démontrer d'assez bonnes performances, se positionne en seconde place sous des sollicitations climatiques élevées. Dans les faits, l'allure de la moyenne horaire des températures observées pour la BTC ciment est assez similaire à celle de la BTC géopolymère (Figure 13). La moyenne des différences entre les valeurs de température observées est de 0,04°C.

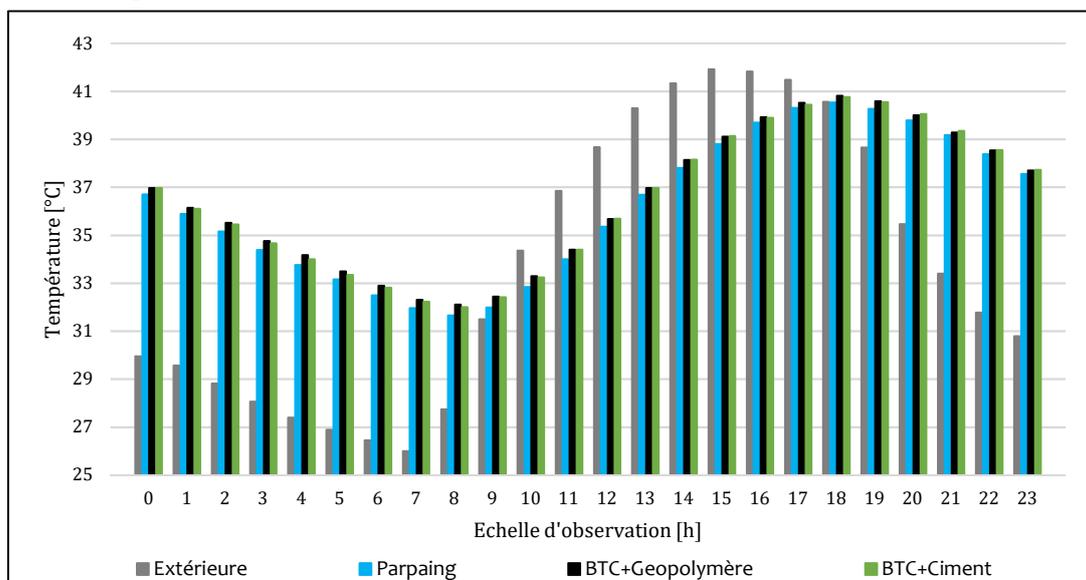


Figure 13 : Température moyenne sur 24h à l'intérieure et à l'extérieure (Saison chaude)

Lorsqu'on s'intéresse à la Figure 14, nous avons les détails du comportement des trois matériaux mis en examen pour ce qui est de leurs capacités d'amortissement et de déphasage.

Tout comme durant la saison froide, vis-à-vis du pic froid (Figure 14a), l'amortissement est quasi similaire pour les trois bâtiments. En effet les variations sont minimales entre les bâtiments ce qui ne permet pas une appréciation claire. Il en est de même pour le déphasage, ou malgré de faibles variations, les matériaux à base de terre semblent néanmoins avoir pris le pas sur le parpaing.

Par contre si l'on considère l'amortissement thermique vis-à-vis du pic chaud (Figure 14b), ce dernier est visiblement dominé par le parpaing qui affiche des valeurs d'amortissement supérieures pour la majorité des occurrences relevés au cours de l'expérimentation. Aussi, l'on ne peut ignorer l'amélioration globale des capacités d'amortissement des trois matériaux sous des charges climatiques plus importantes, cela se voit notamment dans la baisse drastique des occurrences de surchauffe pour les trois bâtiments bien que les cas les plus importants de

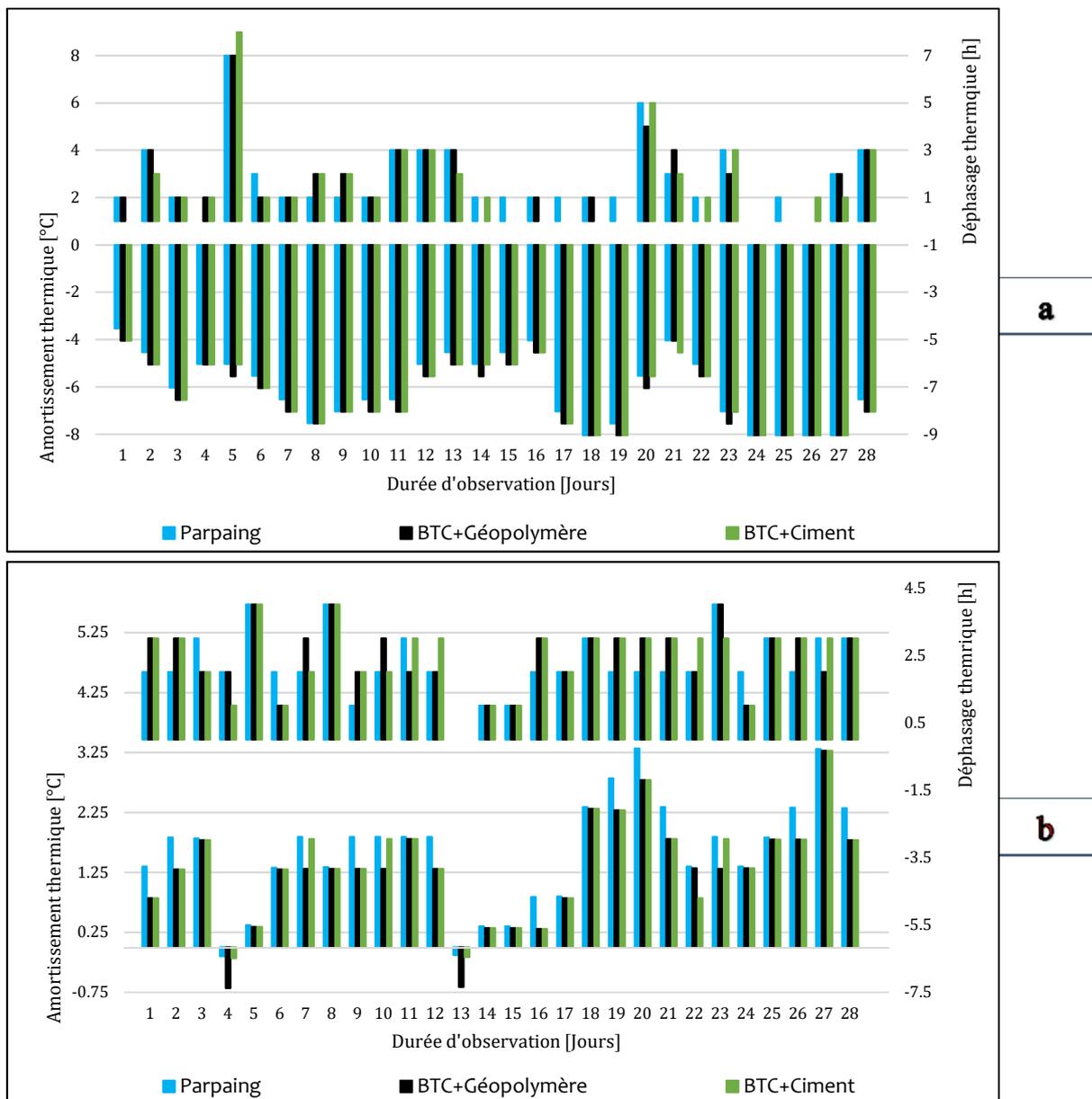


Figure 14: Amortissement - déphasage intérieur (Saison chaude)

surchauffe soit toujours observés chez la BTC géopolymère.

En termes de statistiques, suite à une analyse des valeurs relevés aussi bien vis à vis du pic froid que du pic chaud (Tableau 8), nous permet confirmer la réduction globale de l'intervalle de surchauffe de  $[-1,07^{\circ}\text{C}; -1,05^{\circ}\text{C}]$  à  $[-0,68^{\circ}\text{C}; -0,15^{\circ}\text{C}]$ . Deuxièmement, vis-à-vis du pic de chaleur, le parpaing semble nettement se démarqué des matériaux à base de terre pour ce qui est de l'amortissement. Le gap séparant les températures affichées par le parpaing, de la BTC géopolymère et de la BTC ciment à la médiane est environ de  $0,52^{\circ}\text{C}$ . La BTC ciment et la BTC géopolymère, semblent affiché un comportement quasi identique.

**Tableau 8: Distribution statistique des valeurs relevés durant la saison chaude**

	Vis-à-vis du pic de chaleur						Vis-à-vis du pic de froid					
	<i>Amortissement</i>			Déphasage			<i>Amortissement</i>			Déphasage		
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	M1	M2	M3	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	M1	M2	M3
Minimum	-0,15	-0,68	-0,18	0,00	0,00	0,00	-9,04	-9,56	-9,06	0,00	0,00	0,00
1 <sup>er</sup> Quartile	1,21	0,82	-0,82	2,00	2,00	2,00	-7,16	-7,55	-7,55	1,00	0,00	0,00
Médiane	1,83	1,31	1,31	2,00	3,00	3,00	-6,28	-6,80	-6,80	1,00	1,00	1,00
3 <sup>e</sup> Quartile	1,96	1,80	1,81	3,00	3,00	3,00	-5,03	-5,43	-5,05	3,00	3,00	2,00
Maximum	3,32	3,28	3,28	4,00	4,00	4,00	-3,53	-4,05	-4,05	7,00	6,00	8,00
	(*)						<i>M2 : Bâtiment en BTC géopolymère</i>					
	<i>M1 : Bâtiment en parpaing</i>						<i>M3 : Bâtiment en BTC ciment</i>					

Néanmoins on ne peut s'empêcher de remarquer la difficulté de la BTC géopolymère à limiter l'influence du pic de chaleur sur son milieu interne. Par contre, bien que cela reste en dessous des valeurs affichés par le parpaing, le BTC ciment semble pouvoir mieux protéger son milieu intérieur face aux pic de chaleur observé. D'ailleurs cela est en total accord avec les résultats préalablement obtenus au cours de la période froide.

## ii. Climatisation permanente

Au cours la saison chaude, la réalisation du scénario 2 nous induits des conclusions similaires à ceux du scénario 1 (sans climatisation). En effet, un rapide coup d'œil sur la consommation globale d'énergie pour les trois bâtiments semble conforté la supériorité du parpaing. Comme le montre la Figure 15a l'écart existant entre le parpaing et les matériaux à base de terre est plus important que ceux observés précédemment (8,35kWh en moyenne). La consommation des matériaux à base de terre semble assez similaire bien que la BTC ciment semble être la plus économe avec une différence moyenne de 1,3kWh.

La Figure 15b nous apprend plus sur le comportement des matériaux mis en

comparaison. La BTC géopolymère, comme par le passée admet des difficultés face au pic au chaud qui provoque chez lui une hausse notable dans la consommation d'énergie de froid. Néanmoins il est important de remarqué que cette hausse de température n'intervient qu'une fois le pic de température passée et non simultanément. La BTC ciment quand à elle semble admettre un comportement similaire au géopolymère mais avec moins d'intensité, du fait à un amortissement plus important, nécessitant ainsi moins d'énergie de refroidissement.

Le parpaing affichant le minimum de consommation d'énergie, semble tiré avantage de sa forte sensibilité aux conditions climatiques extérieure, en effet au cours de la hausse des températures (7h-14h), la performance de celui-ci ne semble pas avantageuse de manière claire. Par contre une fois le pic de température passée (après 15h), l'on constate que sa consommation d'énergie chute presque simultanément avec la baisse des contraintes climatiques extérieures, ce qui n'est pas le cas pour la BTC ciment et encore moins pour la BTC géopolymère.

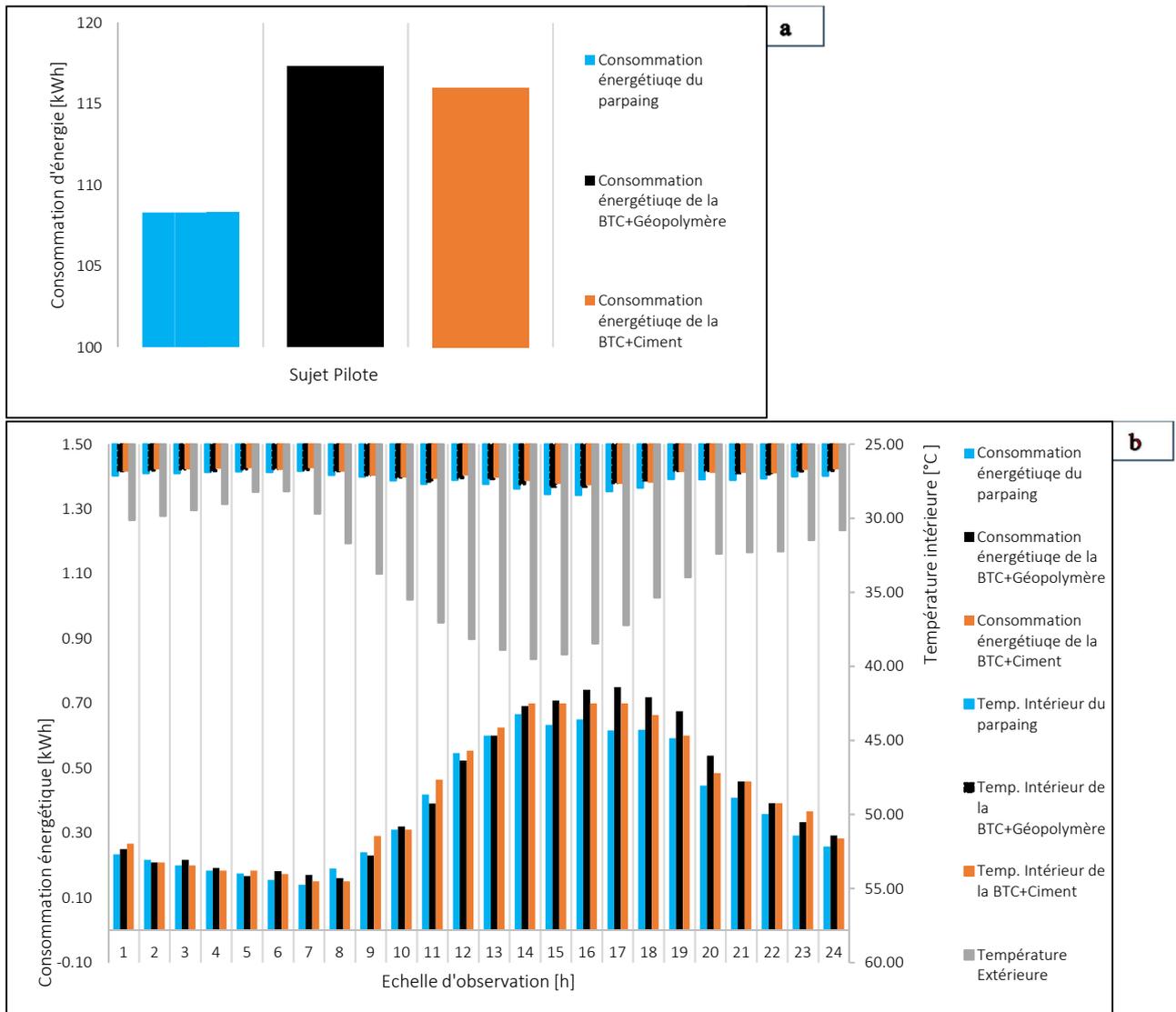


Figure 15 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 2 – Saison chaude)

### iii. Climatisation périodique

Les résultats obtenus au cours des scénarios de climatisation périodique (scénario 3 et 4) appuient ceux obtenus au cours de la phase de climatisation permanente (scénario 2). Si l'on considère une utilisation de bureau (scénario 3), de manière globale le parpaing affiche une consommation énergétique nettement inférieure à celle des matériaux à base de terre (Figure 16a). Ces derniers affichent une fois de plus une consommation quasi similaire, possible témoignage de similitude dans leur fonctionnement.

Quoique s'il existe des similitudes dans le fonctionnement de la BTC ciment et BTC géopolymère, la Figure 16b nous montre qu'il y existe également des différences. Fidèle à lui-même la BTC géopolymère admet toujours des difficultés à maîtriser sa consommation énergétique à l'approche du pic de température extérieure. Pourtant la BTC ciment affiche un meilleur lissage de sa consommation à l'approche du pic de chaleur. Néanmoins, le meilleur lissage est encore celui du parpaing, qui malgré de fortes sollicitations arrive à suffisamment

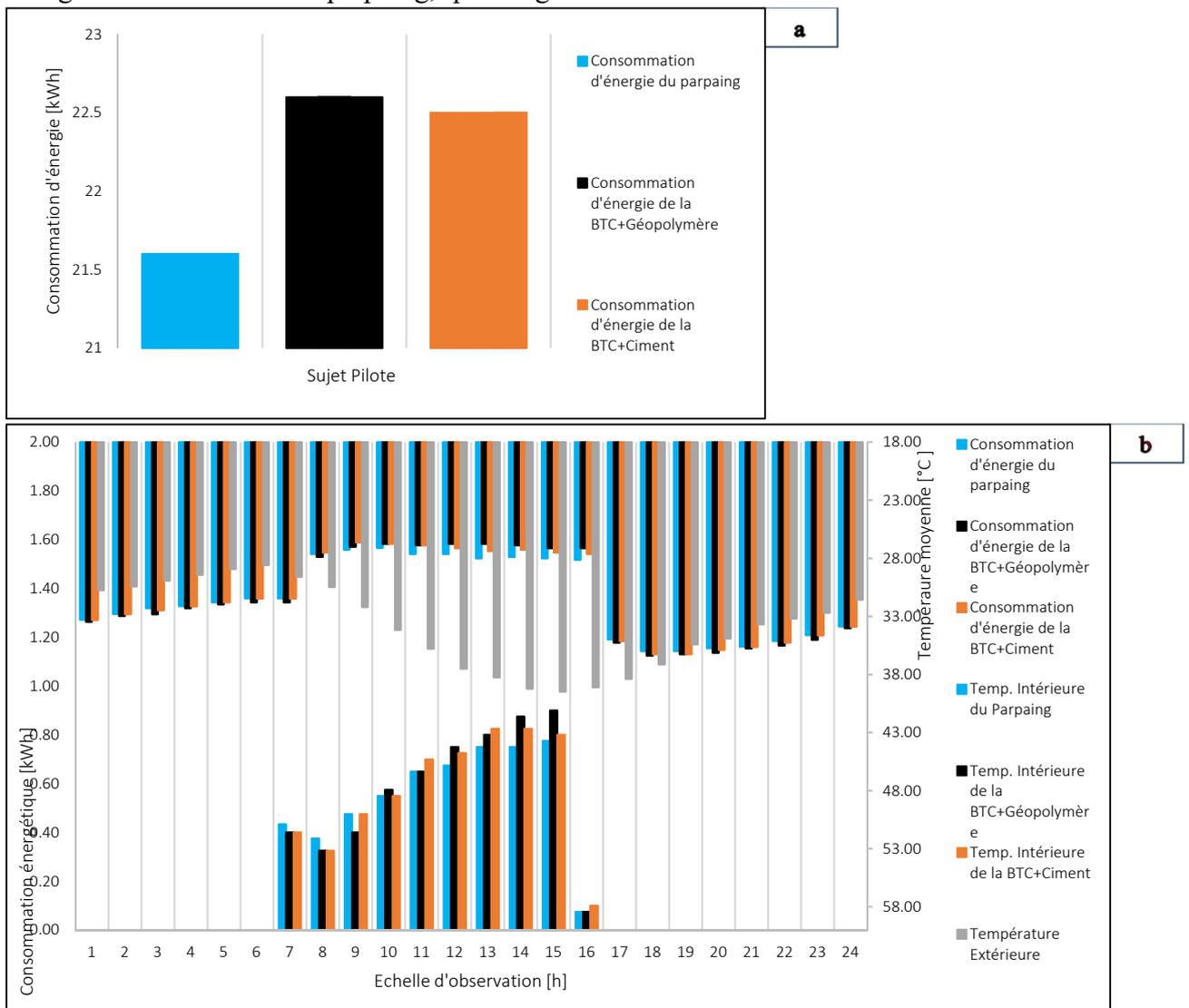


Figure 16 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 3 – Saison chaude)

amortir les charges induites le milieu ambiant.

Pour une utilisation résidentielle des locaux sujets, les résultats obtenus sont similaires quoique dans des proportions plus importantes (Figure 17a). La consommation totale du parpaing pour la période d'observation reste la plus intéressante des trois matériaux. Celle de la BTC géopolymère reste la plus forte suivie de celle de la BTC ciment. Les différences observées préalablement sont toujours valables pour ce qui est de la BTC ciment et de la BTC géopolymère vis à vis du pic de chaleur (Figure 17b). Le parpaing semble tiré avantage du fait qu'il débute sa chute de température à un pic bien plus bas que la BTC ciment et la BTC géopolymère, ajouté à sa sensibilité face aux variations climatiques extérieures, il en résulte une dégression de chaleur plus rapide que les autres matériaux.

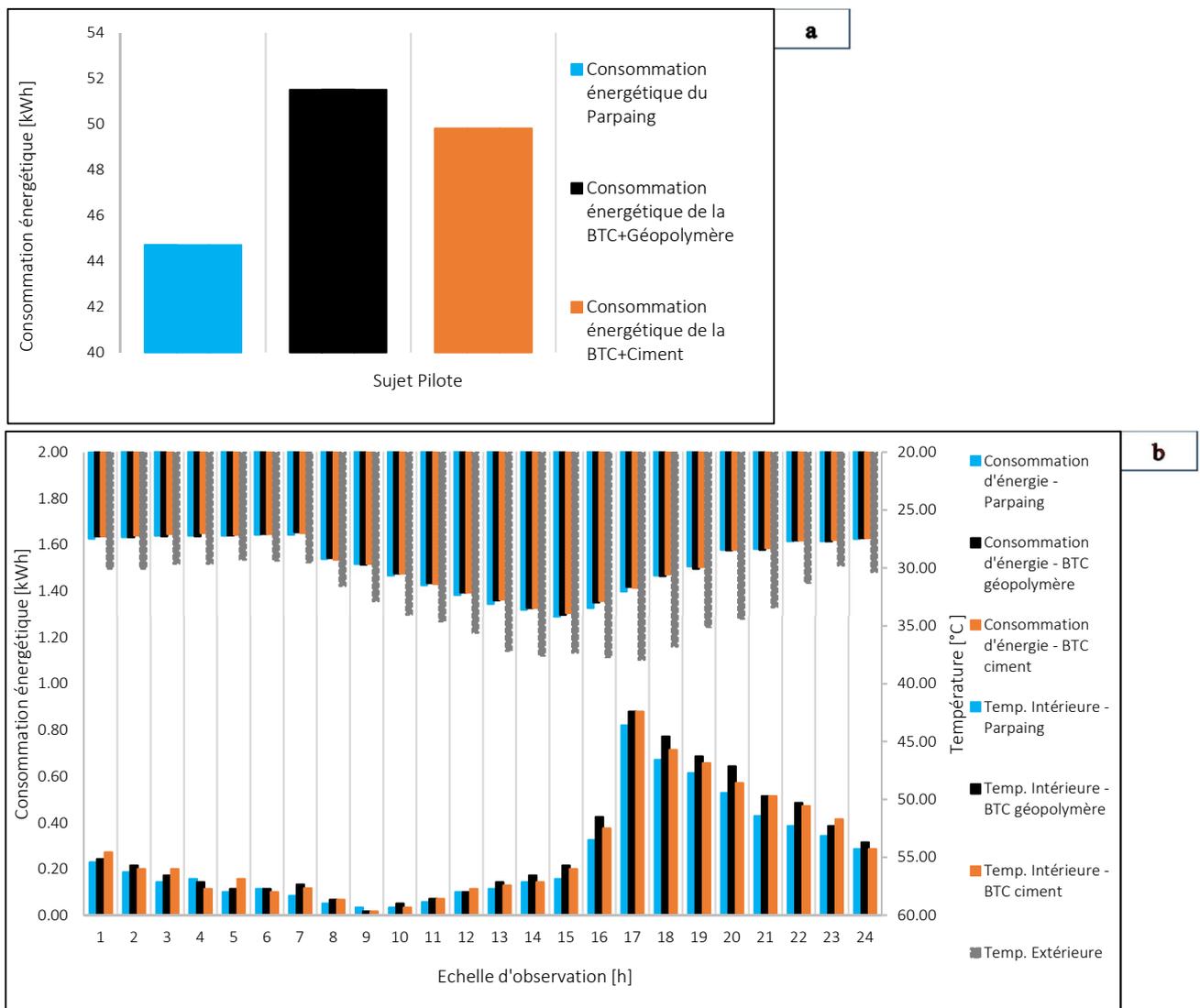


Figure 17 : Température intérieure - Consommation énergétique (Scénario 4 – Saison chaude)

## c) Synthèse partielle & Discussion

### i. Performances thermiques

Durant la saison froide, on remarque une différence importante entre les résultats présentés à la Figure 4 et à la Figure 9. Ceux-ci suggèrent que les performances thermiques à l'échelle de la paroi, ne reflètent pas obligatoirement celle de la pièce (ambiance thermique intérieure). La Figure 4 met en évidence des différences importantes dans le comportement des matériaux, et montre une forte supériorité du parpaing (amortissement thermique). Par contre, en considérant la Figure 9 et le Tableau 7, on constate que les différences observées précédemment sont moins importantes à l'échelle de la pièce. Ceci pourrait s'expliquer du fait que la paroi n'est qu'un élément de l'enveloppe. De ce fait, c'est son comportement vis-à-vis de l'ensemble (porte, fenêtre, plafond, toiture, etc...) qui permet le confort. Ainsi, malgré des propriétés thermiques des matériaux jugées « appréciables », une paroi pourrait s'avérer désavantageuse en fonction du fonctionnement global de l'enveloppe.

Si l'on s'appuie uniquement sur l'analyse de l'ambiance intérieure, nous constatons que la paroi en parpaing a des capacités d'amortissement supérieures aux autres (de l'ordre de 0,02°C en saison froide et de l'ordre de 0,5°C en saison chaude). Les parois en matériau à base de terre présentent un déphasage supérieur vis-à-vis du parpaing (en moyenne 1 heure de plus). La faiblesse des différences observées pourrait s'expliquer par les dimensions des locaux soumis aux expérimentations. En effet, dans un cadre plus réaliste, elles devraient être plus importantes. On peut également noter les ouvertures restées fermées, dans des cas de ventilation admise, cela pourrait entraîner des différences plus significatives.

Au cours de la saison froide, les contraintes climatiques extérieures ne semblent pas encore assez importantes pour permettre une exploitation efficace des capacités du parpaing. Le parpaing se démarque par une courbe de température plus basse durant la période de forte chaleur (Figure 13). Ce constat suggère que dans un climat sujet à de fortes hausses de température, les propriétés thermiques (Tableau 1) du parpaing (coefficient de transmission thermique faible, faible effusivité, faible capacité thermique, forte diffusivité, faible densité) sont préférables à ceux des matériaux en terre (capacité thermique plus importante, diffusivité plus faible, densité plus importante, etc...).

### ii. Consommation énergétique

Sous des sollicitations climatiques plus importantes, le bâtiment en parpaing présente la consommation énergétique la plus faible de manière globale (Figure 15a, Figure 16a et Figure

17a). Dans le détail, elle présente la consommation énergétique la plus faible durant la majeure partie du temps de fonctionnement du système de climatisation (Figure 15b, Figure 16b et Figure 17b).

Pour le cas du bâtiment en géopolymère, il présente une consommation énergétique plus basse durant la saison froide. Pour exemple, en considérant le scénario 4 (utilisation résidentielle), on observe une baisse de 3,55% par rapport au parpaing et 4,76% par rapport à la BTC ciment (Figure 12a). Par contre, sa consommation énergétique est plus importante au cours de la saison chaude (Figure 12b). On note une augmentation de 15,21% par rapport au parpaing et une augmentation 3,41% par rapport à la BTC ciment. Dans le détail, en considérant les 3 scénarios l'on constate que la différence se fait une fois le pic de température extérieure passé.

Une fois le pic de température extérieure passée, la consommation énergétique des bâtiments en parpaing et en BTC ciment semble chuter presque instantanément. Par contre, la BTC géopolymère voit sa consommation énergétique progressée. Les propriétés diffusives de ce matériau, pourraient apporter un élément de compréhension. Ayant une valeur de diffusivité ( $4,00E-07 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ) moins importante que le parpaing ( $7,40E-07 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ) ou la BTC ciment ( $5,69E-07 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ), elle se laisse donc moins traverser par la chaleur. De ce fait, une fois le pic de température extérieure passé et le flux de chaleur inversé (de l'intérieur vers l'extérieur), la chaleur accumulée (par les parois, le toit, le plafond, etc...) a plus de mal à s'échapper du bâtiment. Ceci a pour conséquence de nécessiter beaucoup plus d'énergie de climatisation que les autres matériaux. L'on peut tenir compte également de son effusivité importante accentuant une émission rapide de la chaleur hors du matériau.

La BTC ciment se démarque également par une capacité thermique plus importante ( $251\text{kJ}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ), lui permettant de stocké beaucoup plus d'énergie ( $249\text{kJ}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  pour la BTC géopolymère et  $218\text{kJ}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  pour le parpaing). En revanche, elle s'avère plus effusive que ses concurrents traduisant une facilité à réagir avec son environnement, notamment à l'accumulation mais aussi au rejet la chaleur préalablement accumulée. Contrairement à la BTC géopolymère, sa diffusivité plus importante lui permet un rejet de chaleur plus aisée lorsque le flux de chaleur est inversé. Néanmoins, cela induit également une pénétration de la chaleur plus importante. D'ailleurs, elle présente le coefficient de transmission thermique le plus élevé des trois matériaux ( $3,26\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  contre  $2,33\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  pour le parpaing et  $2,72\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  pour la BTC géopolymère). Aussi, du fait de sa forte capacité thermique (la plus importante des trois), se rejet s'observe plus longtemps que chez ses concurrents. Cela induit un temps de fonctionnement plus long du système de climatisation, notamment durant la nuit.

### **3. Conception et exploitation du modèle numérique**

Dans l'optique de fournir un cas pratique traduisant le ressenti thermique ainsi que les implications pécuniaires des conclusions préalablement formulées, nous débutons dans cette partie la phase de modélisation numérique (Figure 18). Dans un premier temps nous produisons un modèle comprenant les maquettes des bâtiments pilotes préalablement observés à laquelle, nous associons les paramètres physiques et thermiques exposés plus hauts. Les valeurs numériques des principaux paramètres thermiques associées au modèle conçu, sont résumées au sein du Tableau 1.

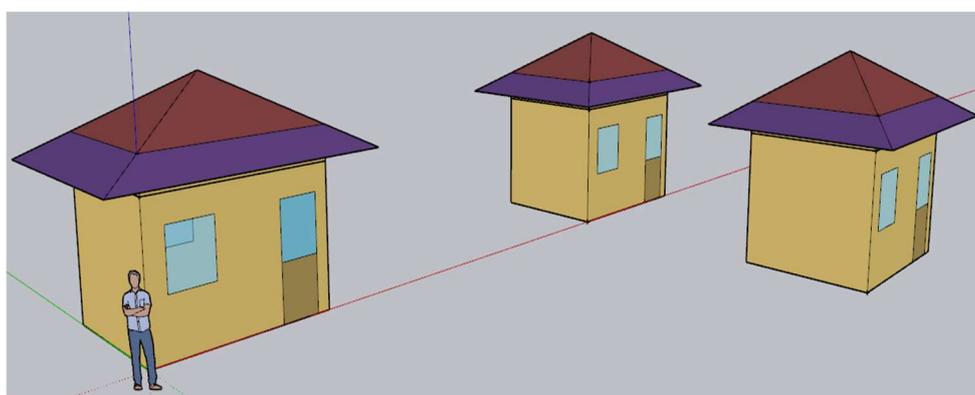


Figure 18: Modélisation numérique des bâtiments pilotes

#### **a) Calibrage et validation du modèle**

Le climat considéré dans le modèle est de type « 1B » : Climat tropical très chaud et sec. Le calibrage sera effectué suivant le paramètre de confort mis en exergue au cours de la phase expérimentale à savoir : la température de l'air du milieu. Les critères de validation du modèle seront évalués sur une durée d'une semaine prise au cours de la période énoncée. L'ensemble des modifications nécessaires à un bon niveau de calibration, ne sont appliquées qu'aux variables non précises tel que l'absorptivité et la réflectivité solaire ou encore l'infiltration d'air au m<sup>2</sup> de surface de paroi, etc....

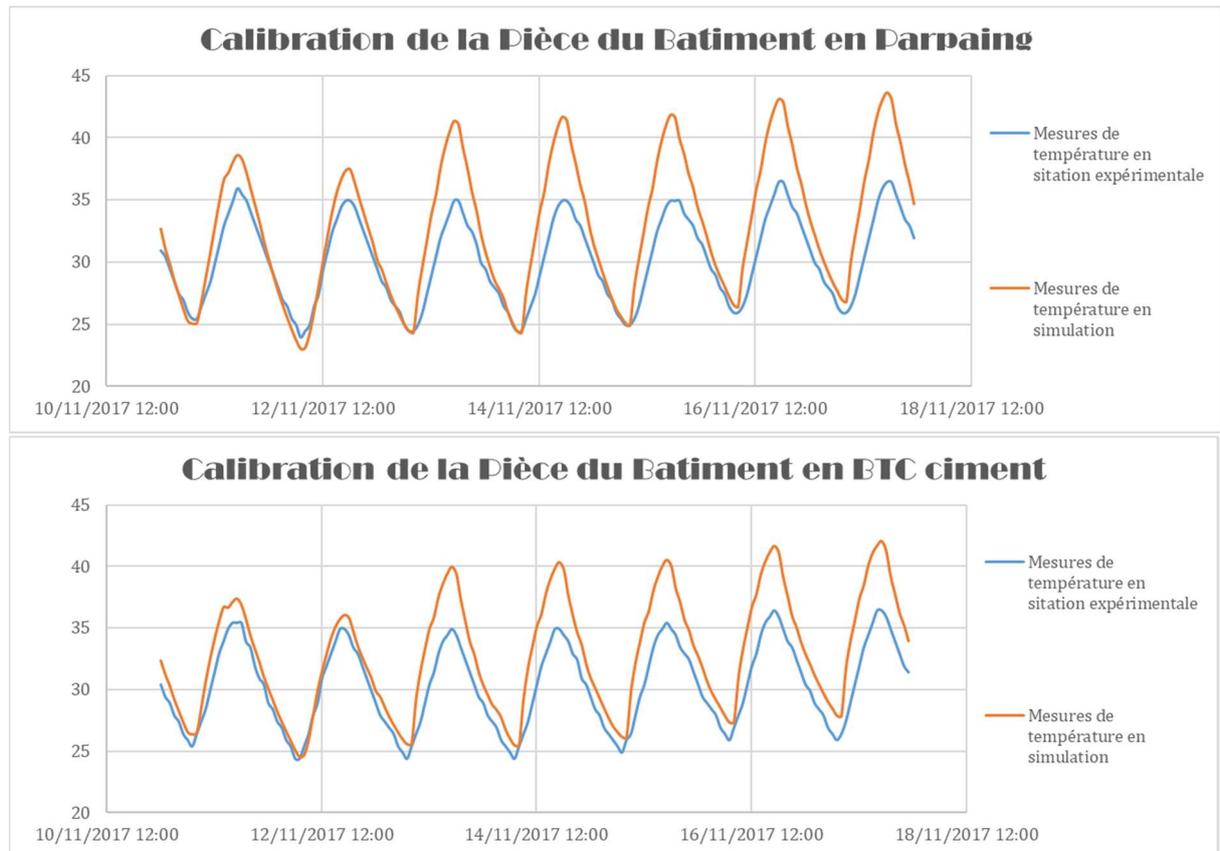
Ne disposant pas de mesures climatiques associées à l'environnement extérieure (radiation solaire, vitesse du vent, etc...) , nécessaires à la calibration du bâtiment en BTC stabilisées au géopolymère. Le modèle présenté pour ce bâtiment a été dérivé de celui du bâtiment réalisé en BTC stabilisées au ciment. Ceux-ci auront donc des paramètres principaux différents propres à chaque matériau, comme spécifiés au sein du Tableau 1, mais des paramètres secondaires identiques (Absorptivité, réflectivité, etc..). L'objectif étant de fournir une appréciation, bien qu'approximative du comportement de ce matériau, mais également de

corroborer ou de discuter les conclusions induites par la partie expérimentale de cette étude.

Les critères de validations mentionnées en méthodologie sont évalués, pour le modèle conçu et sont présentés au sein du Tableau 9. L'ensemble des données relatives au paramétrage du modèle numérique, ainsi que le détail de la phase de calibration du modèle réalisé est présentée de manière concise au sein de l'Annexe 2. Néanmoins, les figures /// présentés ci-dessous nous permettent d'apprécier les écarts résiduels, qui bien sur affecteront les résultats, entre les valeurs mesurées et les valeurs obtenue par simulation.

**Tableau 9: Valeurs des critères de validation du modèle**

	Valeurs de coefficients après calibrage		
	NMBE	CVRMSE	R <sup>2</sup>
Température du comble du bâtiment en BTC ciment	6,34%	8,53%	94,83%
Température du comble du bâtiment en parpaing	6,84%	9,03%	94,78%
Température de la pièce du bâtiment en BTC ciment	0,08%	0,10%	92,00%
Température de la pièce du bâtiment en parpaing	8,92%	11,94%	91,01%
Seuil de validation	< 10%	< 30%	> 90%



**Figure 19: Résultats de la calibration - Valeurs de température intérieure**

## b) Dépense énergétique annuelle

Nous nous fixons pour objectif, dans le cadre de cette partie, d'apprécier le coût énergétique annuel, induit par l'utilisation de chaque matériau dans la réalisation des bâtiments pilotes préalablement expérimentés puis modélisés, au cours d'une année civile. Pour ce faire nous exploitons le modèle numérique conçu et calibré sur le comportement observé de manière expérimentale. L'ensemble des paramétrages supplémentaires, ainsi des résultats issus de la phase de simulation sont exposés de manières concises au sein de l'Annexe 3. En rappel, bien que différent de celui utilisé au cours de la phase d'expérimentation, le système de climatisation mis en marche dans le modèle est identique pour les trois bâtiments.

### i. Climatisation permanente

Lors de la simulation du scénario 2, au cours de laquelle le système de climatisation est actif en permanence, on note que la BTC stabilisée au ciment affiche la plus forte dépense

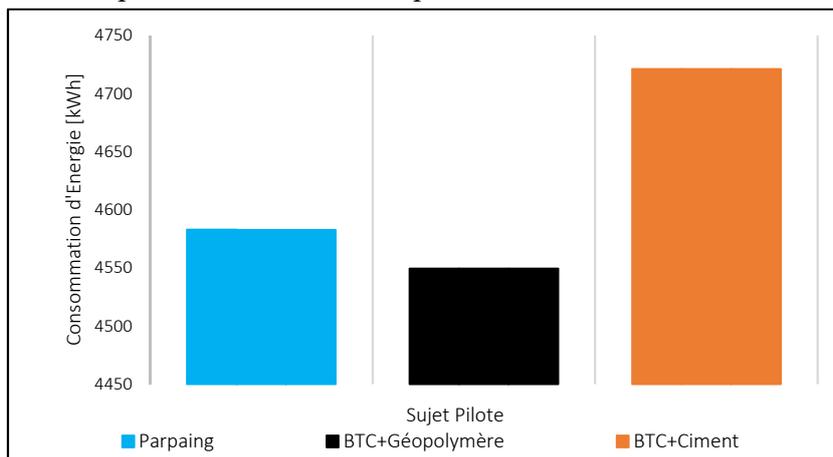


Figure 21: Consommation d'énergie annuelle (Scénario 2)

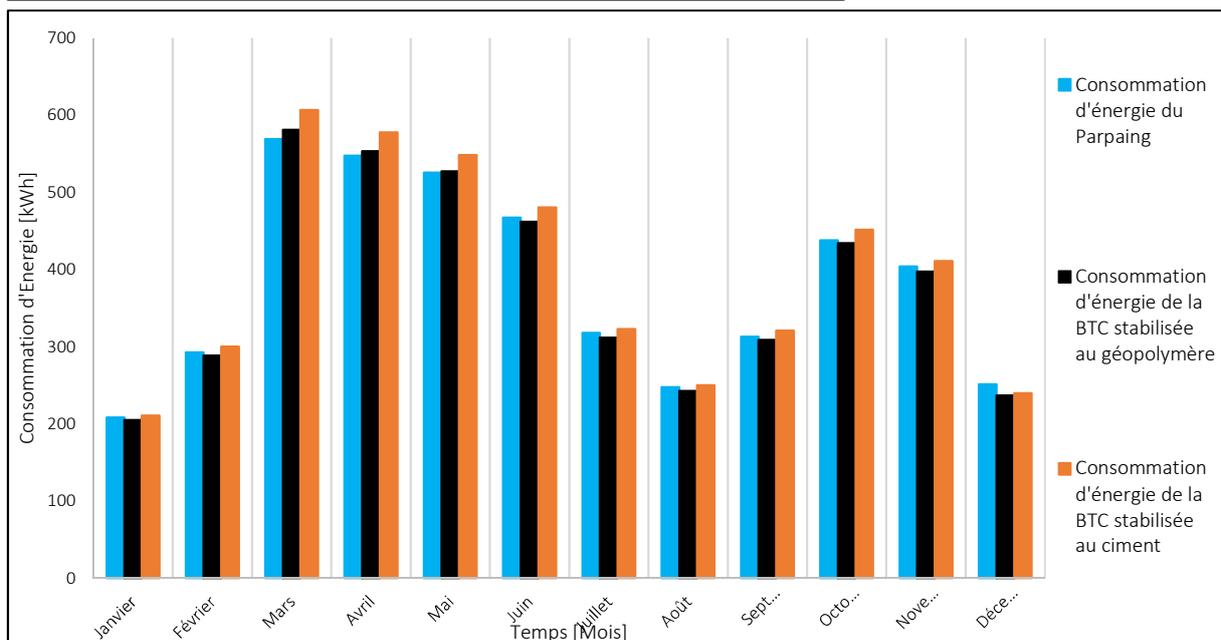


Figure 20: Consommation mensuelle d'énergie (Scénario 2)

énergétique, suivant au travers d'un écart assez important du parpaing (Figure 21). L'on remarque alors que contrairement aux résultats obtenues au cours de la saison chaude, la BTC stabilisée au géopolymère n'affiche plus la plus grande valeur de dépense énergétique, notamment durant les mois de Mars, Avril, Mai et Juin qui sont les mois les plus chauds (Figure 20). Néanmoins, comme expérimenté, le parpaing affiche la consommation d'énergie la plus basse durant les mois de fortes chaleur (Mars, Avril, Mai).

Le pic de sollicitation est observé durant le mois de Mars. Un autre point intéressant en ressort lorsqu'on s'y attarde, notamment la difficulté affichée au cours de ce mois par le système de climatisation, à maintenir la température de consigne demandée aux environs de 17h (Figure 22). De cette observation, pourrait donc ressortir le pic de sollicitation thermique journalier. Ce dernier étant un élément intéressant en cas d'approche adaptative sur l'amélioration de l'utilisation faite des locaux ainsi que des dispositifs de ventilation mis en place. Il est important également de remarquer qu'au cours de cette période de forte sollicitation, la BTC stabilisée au géopolymère affiche une meilleure conservation de l'énergie de froid accumulée au sein du milieu intérieur. Bien que cela pourrait être dû au manque de précision dans le comportement du model associé au bâtiment géopolymère (manque de calibration) , mais cela pourrait également être du fait de ses propriétés propres introduites dans le paramétrage du matériau.

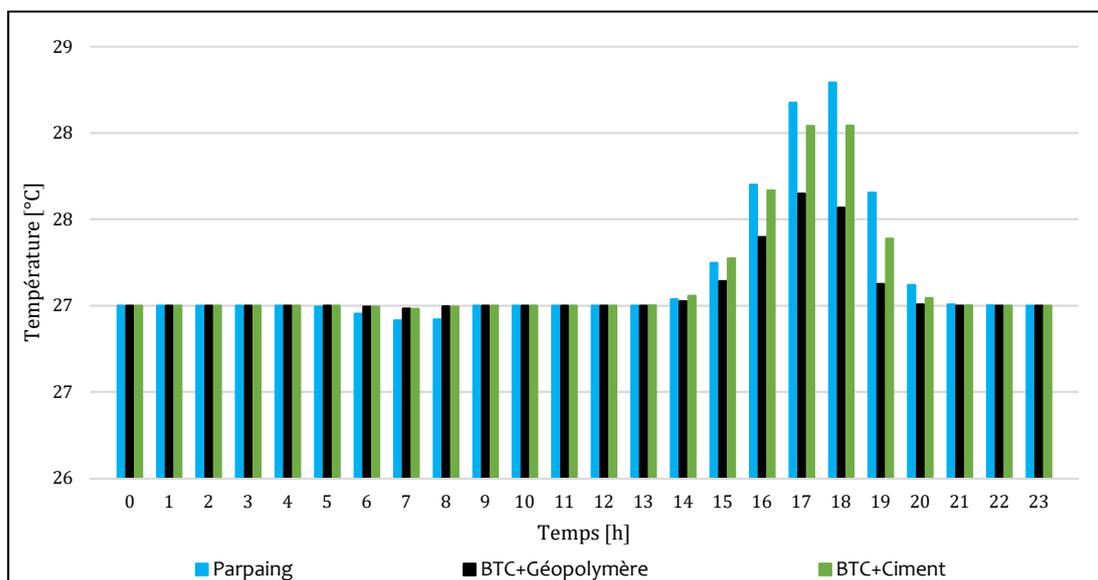
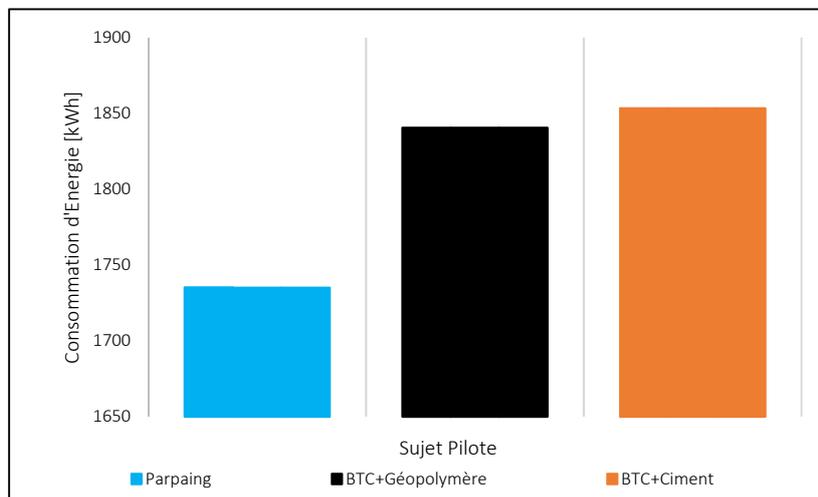


Figure 22: Moyenne des températures horaires relevés au cours du mois de Mars

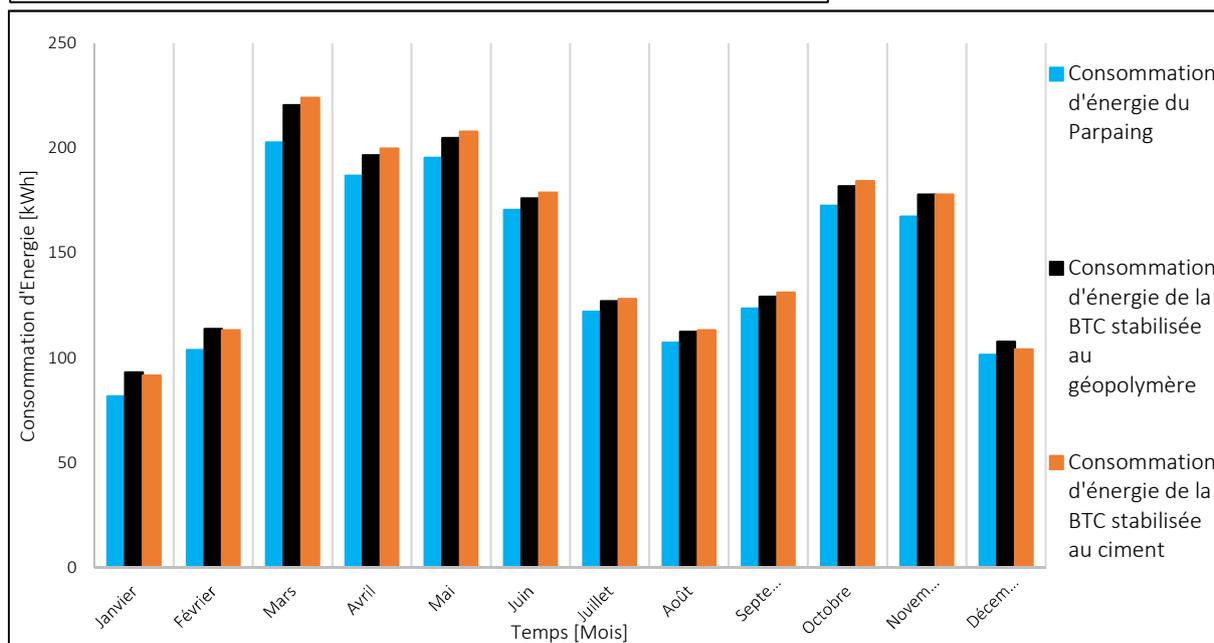
## ii. Climatisation périodique

Le mode de climatisation périodique englobe les scénarios de climatisation 3 et 4, dont les modalités d'exécution ont été implémenté durant la simulation (Annexe 3). Dans le cadre d'une utilisation de bureau (Scénario 3), on note que conformément aux observations menées

expérimentalement le parpaing de ciment affiche la plus faible dépense énergétique (Figure 24), et celle de la BTC stabilisée au ciment est très proche de celle de la BTC stabilisée au géopolymère, bien que contrairement au modèle expérimentale la BTC stabilisée au ciment domine le classement. Globalement, la marge de différence entre le matériau le plus et le moins efficace ne varie pas de manière significative annuellement (environ 100kWh) (Figure 23).



**Figure 24: Consommation d'énergie annuelle (Scénario 3)**



**Figure 23: Consommation mensuelle d'énergie (Scénario 3)**

Dans le cas du scénario 4 traduisant un usage résidentiel, le parpaing est détrôné de sa position de leader si l'on regarde sur le plan global (Figure 26). Dans le détail, ce dernier affiche la dépense énergétique la plus faible durant les mois de forte chaleur (Mars, avril, Mai). Par la suite, la charge climatique s'amenuisant du fait de la saisonnalité ainsi que l'usage nocturne de la pièce, la BTC stabilisée au géopolymère reprend la pole position (Figure 25). Ces observations corroborent bien les résultats préalablement obtenus au cours de la phase expérimentale aussi bien en saison froide qu'en saison chaude.

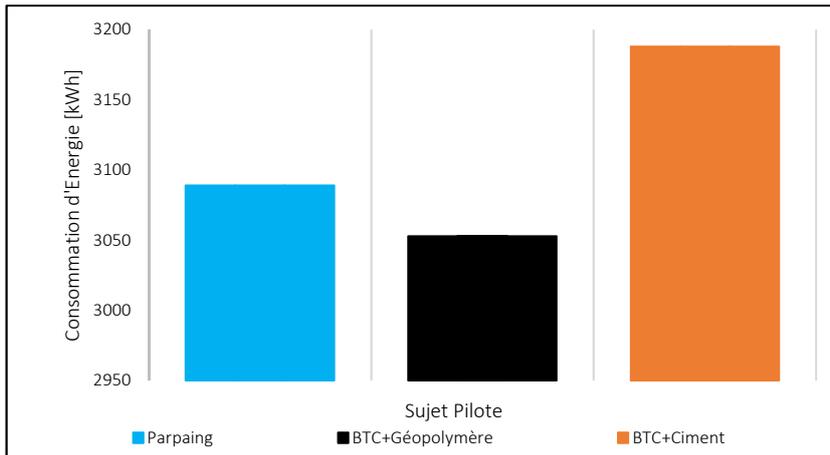


Figure 26: Consommation d'énergie annuelle (Scénario 4)

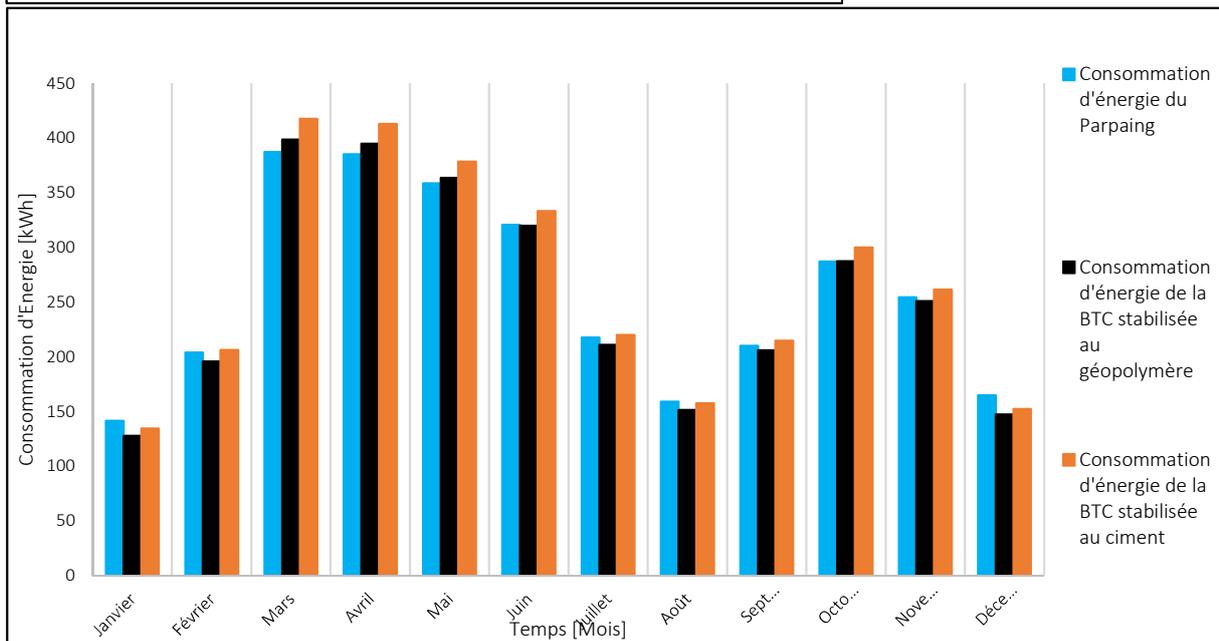


Figure 25: Consommation mensuelle d'énergie (Scénario 4)

### c) Synthèse partielle

Une simulation numérique du comportement observé des matériaux mis en comparaison, sur une période de temps couvrant une année civile, nous permet de constater que le parpaing permet de mieux minimiser la consommation énergétique des bâtiments (Figure 25). En tenant comptes deux bâtiments calibrés (en parpaing et en BTC ciment), le bâtiment présente une baisse annuelle d'environ 3,10% par rapport à la BTC ciment.

Pour des raisons évoquées au sein de la partie précédente, le parpaing démontre une meilleure efficacité dans sa dépense énergétique sous de forte sollicitations thermiques. Tenant compte du fait qu'au sein de la zone Soudano-sahélienne, les sollicitations thermiques sont assez importantes sur la plus grande partie de l'année, il est donc assez évident qu'elle présente parmi les valeurs les plus faibles de dépense énergétique sur l'année.

L'on constate également, la forte consommation de la BTC stabilisé au ciment. Bien évidemment, au vue des résultats obtenus au cours de la phase d'expérimentation, cette forte consommation était attendu, bien que les écarts restent peu significatifs.

Bien que le principe général soit reproduit au cours de la simulation, la BTC stabilisée au ciment n'affiche pas en tout point un comportement similaire à celui observer expérimentalement. Notamment, pour ce qui de son rapport de consommation vis-à-vis de la BTC stabilisée au ciment, envers qui elle présentait une valeur de dépense énergétique plus élevée au cours de l'expérimentation au scénario 4 (supérieure de 3,41%). Cette dernière remarque, rappelle donc ici le caractère imprécis du modèle représentant le bâtiment en BTC stabilisés au géopolymère, et donc la nécessité d'une calibration qui lui soit propre.

#### 4. Estimation de la dépense financière

Annuellement, le scénario le moins gourmand en énergie est celui de l'utilisation de bureau (Figure 27). Les sollicitations climatiques sont moins importantes en début de journée, elles progressent pour atteindre leur pic de chaleur dans la pièce aux environs de 17h, heure à laquelle le système de climatisation est coupé depuis environ 1h. Ce scénario permet donc de minimiser la consommation d'énergie en déduisant le temps d'apparition du pic de température du temps de d'utilisation de la pièce. Bien que le scénario 4 se déroule dans la nuit, ou les sollicitations thermiques sont moins importantes pour nos matériaux, celui-ci présente néanmoins une forte consommation. Cela est sûrement dû au fait que la climatisation débute au

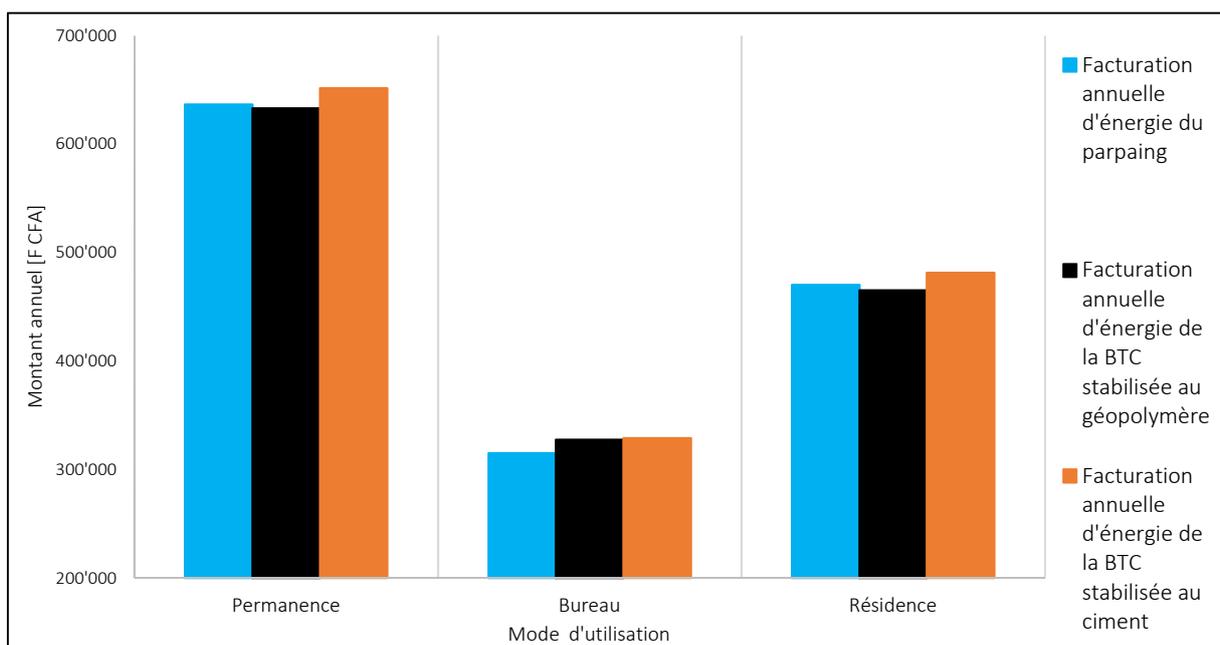


Figure 27: Coût de climatisation annuel en fonction de chaque matériau

moment où la pièce est soumise à son pic de sollicitation journalier, ainsi que fonctionnement de la climatisation tout au long du weekend.

Quoi qu'il en soit, s'il existe un doute sur la bonne représentativité de la consommation de la BTC stabilisée au géopolymère, le coût annuel induit par la BTC stabilisée au ciment est strictement supérieur à celui du parpaing et cela peu importe le scénario considéré. On observe en moyenne une différence de 13000 FCFA annuellement. Si l'on considère le modèle « voûte nubienne », l'on peut estimer la durée de vie d'un bâtiment en brique de terre comprimé à environ 50 ans. Dans cette hypothèse, une utilisation de la BTC stabilisé au ciment entrainera tout au long de la durée de vie du bâtiment, un déficit d'environ 600000 F CFA (Figure 28).

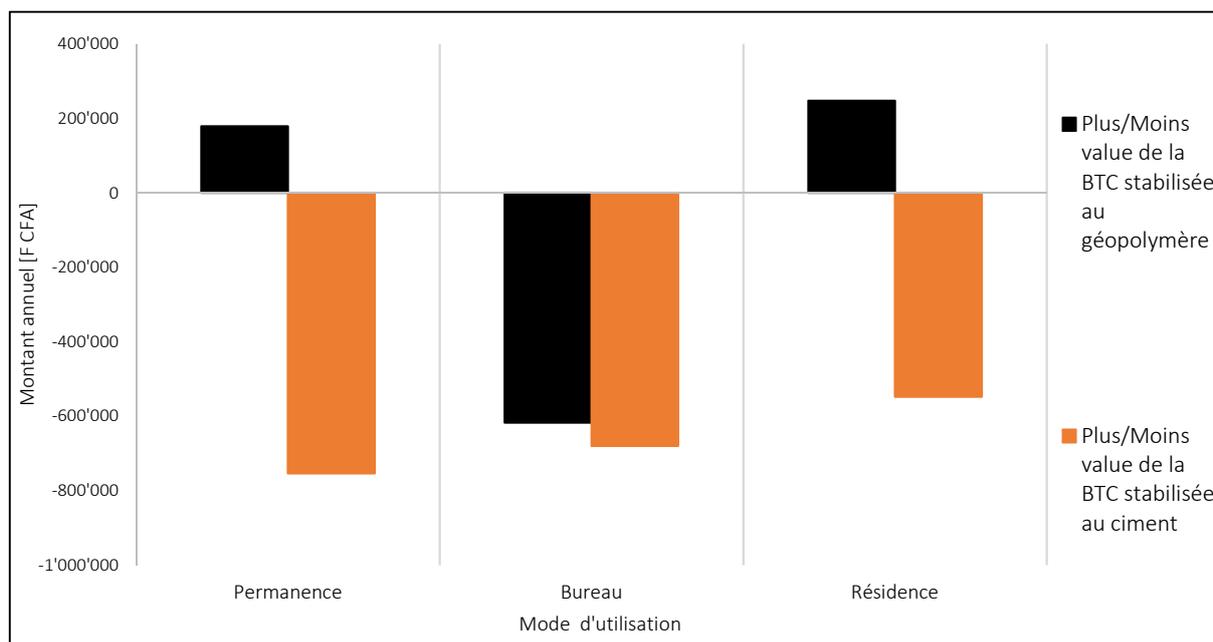


Figure 28: Plus /moins-value sur le coût des BTC vis-à-vis du parpaing sur 50 ans

## 5. Synthèse globale & Discussion

L'analyse des résultats expérimentaux et numériques a permis de comparer les performances thermiques et énergétiques des trois matériaux étudiés : parpaing, BTC ciment et BTC géopolymère sur les points suivants :

### i. Performance thermique des parois

Le parpaing offre le meilleur amortissement thermique, limitant les variations de température intérieure. Pour le cas de la saison chaude, l'amortissement thermique de la paroi en parpaing est en moyenne 4,5 fois supérieure à l'amortissement thermique de la BTC géopolymère, et 3 fois supérieure à celui de la BTC ciment (Figure 6b). Toutefois, elle reste plus sensible que les autres matériaux aux fluctuations climatiques extérieures.

Dans le cas de la BTC géopolymère, on remarque sa prédisposition à la surchauffe (amortissement thermique moyen de  $-0,32^{\circ}\text{C}$  en saison chaude et  $-0,54^{\circ}\text{C}$  en saison froide). En effet, sa température intérieure, au pic des sollicitations journalières, est majoritairement au-dessus de sa température extérieure.

La BTC Ciment présente des valeurs d'amortissement thermique majoritairement positives, y compris sous contraintes élevées (saison chaude), mais ses performances restent inférieures à celle du parpaing.

Enfin, Les capacités de déphasage semblent plus communes pour les trois matériaux vis-à-vis du pic de froid. Vis-à-vis du pic de chaleur elles s'améliorent pour le parpaing (progression moyenne de 66min à 114min) avec l'augmentation des sollicitations thermiques.

## **ii. Confort thermique intérieur**

Les résultats obtenus à la suite de l'observation de l'ambiance thermique intérieure suggèrent que les performances thermiques à l'échelle de la paroi, ne reflètent pas obligatoirement celle de la pièce (ambiance thermique intérieure). Ceci pourrait s'expliquer du fait que la paroi n'est qu'un élément de l'enveloppe.

Le bâtiment en parpaing a des capacités d'amortissement supérieure aux autres (de l'ordre de  $0,02^{\circ}\text{C}$  en saison froide et de l'ordre de  $0,5^{\circ}\text{C}$  en saison chaude). Les parois en matériau à base de terre présentent un déphasage supérieure vis-à-vis du parpaing (en moyenne 1 une heure de plus). Ainsi, pour un climat sujet à de fortes hausses de température, les propriétés thermiques (Tableau 1) du parpaing (coefficient de transmission thermique faible, faible effusivité, faible capacité thermique, forte diffusivité, faible densité) semblent préférables à ceux des matériaux en terre (capacité thermique plus importante, diffusivité plus faible, densité plus importante, etc...).

Les bâtiments en BTCs présentent de meilleurs capacités de déphasage que le parpaing.

## **iii. Consommation énergétique**

Le parpaing permet de réduire significativement la consommation d'énergie liée au refroidissement, notamment en scénarios d'occupation permanent comme périodique (bureau ou résidentiel) durant les périodes de forte sollicitation climatique. Pour une utilisation permanente du système de climatisation, l'on observe un gain énergétique de 7,67% par rapport à la BTC géopolymère et 6,64% par rapport à la BTC ciment.

La BTC géopolymère entraîne la consommation énergétique la plus élevée dans la plupart des scénarios testées expérimentalement en saison chaude. Pour exemple, en

considérant le scénario 4 (utilisation résidentielle), on observe une baisse de 3,55% par rapport au parpaing et 4,76% par rapport à la BTC ciment (Figure 12a). Par contre, sa consommation énergétique est plus importante au cours de la saison chaude (Figure 12b). On note une augmentation de 15,21% par rapport au parpaing et une augmentation 3,41%. Par contre, en saison froide elle semble plus maîtrisée.

Contrairement à la BTC géopolymère, sa diffusivité plus importante lui permet un rejet de chaleur plus aisée lorsque le flux de chaleur est inversé. D'ailleurs, elle présente le coefficient de transmission thermique le plus élevé des trois matériaux ( $3,26\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$  contre  $2,33\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$  pour le parpaing et  $2,72\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$  pour la BTC géopolymère). Cela a pour conséquence également d'augmenter sa consommation énergétique. De plus, du fait de sa forte capacité thermique (la plus importante des trois), le rejet de chaleur accumulée s'observe plus longtemps que chez ses concurrents. Cela induit un temps de fonctionnement plus long du système de climatisation, notamment durant la nuit.

#### iv. Estimation financière

Sur la durée de vie du bâtiment, la BTC ciment engendre une moins-value économique importante en raison de ses performances énergétiques médiocres. La BTC géopolymère semble se révéler économiquement plus avantageuse en simulation, Néanmoins ce modèle n'étant pas calibré sur le fonctionnement observé en expérimentation cela ne pourrait s'affirmer sans étude complémentaire. Le parpaing occupe une position de leader et est plus compétitif que les autres matériaux considérés.

En saison chaude, un rapport des coûts estimées pour chaque matériau en fonction de la surface de la pièce, pour une hauteur sous plafond de 2,7m permet d'obtenir approximativement les ratios exposés au sein du Tableau 10 et du Tableau 11. Annuellement le parpaing démontre un gain financier moyen d'environ 3% au  $\text{m}^2$  de surface par rapport à la BTC ciment.

**Tableau 10 : Estimation du coût financier journalier au  $\text{m}^2$**

Mode d'utilisation	A partir des données expérimentales					
	Consommation énergétique journalière moyenne (kWh)			Estimation financière journalière au $\text{m}^2$ (XOF/ $\text{m}^2$ )		
	Parpaing	Géopolymère	Ciment	Parpaing	Géopolymère	Ciment
Permanente	9,15	9,91	9,81	125	150	150
Bureau	5,51	5,75	5,73	100	100	100
Résidence	6,10	7,07	6,82	100	125	100

**Tableau 11: Estimation du coût financier annuel au m<sup>2</sup>**

Mode d'utilisation	A partir des données simulées					
	Consommation énergétique annuelle moyenne (kWh)			Estimation financière annuelle au m <sup>2</sup> (XOF/m <sup>2</sup> )		
	Parpaing	Géopolymère	Ciment	Parpaing	Géopolymère	Ciment
Permanente	636'475	-	651'550	62'900	-	64'400
Bureau	315'400	-	329'000	31'175	-	32'525
Résidence	470'375	-	481'325	46'500	-	47'575

## V. CONCLUSION & PERSPECTIVES

---

Cette étude met en évidence l'importance du choix des matériaux de parois dans la conception bioclimatique des bâtiments en climat soudano-sahélien. L'inertie thermique semble plus appropriée vis à vis de la fraîcheur (saison froide) et l'isolation sera plus appropriée vis-à-vis de la chaleur (saison chaude).

Le parpaing offre une performance notable, bien qu'ayant une inertie moindre. A l'échelle de l'enveloppe dans son ensemble, il possède des capacités d'amortissement supérieures à celle des BTCs (de l'ordre de  $0,02^{\circ}\text{C}$  en saison froide et de l'ordre de  $0,5^{\circ}\text{C}$  en saison chaude). Ceci lui permet de minimiser au mieux la consommation énergétique du bâtiment, ce qui induit des coûts financiers moins élevées (environ 3% d'économie annuelle au  $\text{m}^2$  par rapport à la BTC ciment).

Pour l'heure les méthodes courantes d'utilisation des BTCs, présentent des lacunes vis-à-vis de l'ambiance thermique du bâtiment. La BTC géopolymère a du mal à évacuer la chaleur une fois le pic de consommation passé, entraînant une forte hausse de la consommation énergétique du bâtiment (augmentation de 15,21% par rapport au parpaing et 3,41% par rapport à la BTC ciment au cours de la saison chaude).

La BTC ciment se démarque également par une capacité thermique plus importante ( $251\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ), lui permettant de stocker beaucoup plus d'énergie ( $249\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  pour la BTC géopolymère et  $218\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  pour le parpaing). Mais cela induit un temps de fonctionnement plus long du système de climatisation par rapport aux autres matériaux, notamment durant la nuit.

Ces conclusions soutiennent donc celles de (Ouedraogo *et al.*, 2024) et (Neya *et al.*, 2025) qui démontraient suivant une méthodologie différente, que les BTCs présentaient plus de période d'inconfort que le parpaing.

Les épaisseurs de paroi, employées couramment dans la réalisation des bâtiments à Ouagadougou sont donc insuffisantes, pour assurer une bonne ambiance thermique tout en minimisant de manière optimale la consommation énergétique.

Cette étude ouvre donc la question portant sur la définition de l'épaisseur de paroi optimale, pour les matériaux à base de terre, afin de garantir une ambiance thermique confortable. Ceci en minimisant la consommation énergétique à venir et les coûts de réalisation immédiats du bâtiment.

Elle pose également une interrogation sur l'adéquation des méthodes d'utilisation du

matériau terre dans le contexte du climat Soudano-Sahélien au Burkina Faso. A ce propos, (Hema *et al.*, 2020) et (Hema *et al.*, 2021) propose une mutation de la paroi simple aux systèmes de paroi (paroi double, etc.), et fourni des résultats vis-à-vis des gains de confort possibles.

De plus, une continuité du travail ainsi effectuer, pourrait se traduire par l'étude de l'impact d'hygrométrie sur les ressentit thermique des occupants. Permettant ainsi d'aborder de manière plus directe le gain de confort thermique. A la suite, l'impact d'une ventilation (mécanique ou naturelle) pourrait également constituer une valeur ajouter à ce travail.

Pour finir, les parois extérieures du bâtiment ne sont qu'un élément de l'enveloppe. Comme remarqué dans le cas de la BTC géopolymère c'est le fonctionnement de l'ensemble qui constitue avantage ou un désavantage pour l'ambiance thermique du bâtiment. En plus à ce travail, il serait donc important d'étudier également l'impact du matériau utilisée pour la toiture, ainsi que ses possibles répercussions sur la consommation énergétique du bâtiment.

## VI. BIBLIOGRAPHIE

---

Abderrahmane, B. and Labidine, M.Z. (2014) 'L'impact du choix des matériaux de construction sur l'efficacité énergétiques d'un bâtiment résidentiel.'

Berardi, U. (2017) 'A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends', *Resources, Conservation and Recycling*, 123, pp. 230–241. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.014>.

Bonhomme, G. and Safa, H. (2024) 'L'impact de l'énergie sur le développement des sociétés humaines et l'économie globale', *Reflets de la physique*, (77), pp. 18–23. Available at: <https://doi.org/10.1051/refdp/202477018>.

Comité National du Recensement, INSD (2022) *Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso*. Synthèse des résultats définitifs 5.

Fabbri, K. *et al.* (2023) 'Exploring the Role of Building Envelope in Reducing Energy Poverty Risk: A Case Study on Italian Social Housing', *Energies*, 16(24), p. 8093. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16248093>.

Hema, C. *et al.* (2020) 'Impact of the Design of Walls Made of Compressed Earth Blocks on the Thermal Comfort of Housing in Hot Climate', *Buildings*, 10(9), p. 157. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings10090157>.

Hema, C. *et al.* (2021) 'Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: An experimental investigation', *Journal of Building Engineering*, 38, p. 102148. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102148>.

Hema, C. *et al.* (2022) 'Reducing overheating risk in naturally ventilated houses through the design of compressed Earth blocks walls in hot dry climate', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 42(6), pp. 1203–1222. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-12-2021-0160>.

Hema, C. *et al.* (2024) 'A field study on thermal acceptability and energy consumption of mixed-mode offices building located in the hot-dry climate of Burkina Faso', *Science and Technology for the Built Environment*, 30(2), pp. 184–193. Available at: <https://doi.org/10.1080/23744731.2023.2291007>.

Jamshidi, E.J. *et al.* (2022) 'Detecting outliers in a univariate time series dataset using unsupervised combined statistical methods: A case study on surface water temperature', *Ecological Informatics*, 69, p. 101672. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101672>.

Kéré, B. (1995) *Architecture et cultures constructives du Burkina Faso*. Mémoire. CEAA Terre de L'Ecole d'Architecture de Grenoble.

Kuznik, F. and Virgone, J. (2009) 'Experimental assessment of a phase change material for wall building use', *Applied Energy*, 86(10), pp. 2038–2046. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.004>.

Moussa, H.S. *et al.* (2019) 'Comparative Study of Thermal Comfort Induced from Masonry Made of Stabilized Compressed Earth Block vs Conventional Cementitious Material', *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7(6), pp. 385–403. Available at: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.76026>.

Neya, I. *et al.* (2025) 'Effect of cement and geopolymer stabilization on the thermal comfort: case study

of an earthen building in Burkina Faso', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 43(3), pp. 283–301. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2022-0069>.

Nshimiyimana, P. *et al.* (2019) 'Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash', *Construction and Building Materials*, 216, pp. 622–631. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.037>.

Omar Sore, S. *et al.* (2018) 'Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso', *Construction and Building Materials*, 165, pp. 333–345. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>.

Ouedraogo, A.L.S.-N. *et al.* (2022) 'A model for thermal comfort assessment of naturally ventilated housing in the hot and dry tropical climate', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 40(2), pp. 183–201. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2021-0011>.

Ouedraogo, A.L.S.-N. *et al.* (2024) 'Optimisation of Thermal Comfort of Building in a Hot and Dry Tropical Climate: A Comparative Approach between Compressed Earth/Concrete Block Envelopes', *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 12(01), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2024.121001>.

Peinturier, L. and Wallom, D.C.H. (2025) 'Building energy simulation calibration accuracy and modelling complexity: Implications for energy performance improvement', *Energy and Buildings*, 344, p. 115971. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115971>.

Rojas, J. *et al.* (2016) 'Thermal performance of two envelope systems: Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations', *Journal of Building Physics*, 39(5), pp. 452–460. Available at: <https://doi.org/10.1177/1744259115591993>.

Seghier, T.E. *et al.* (2022) 'BIM-based retrofit method (RBIM) for building envelope thermal performance optimization', *Energy and Buildings*, 256, p. 111693. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111693>.

Shen, H., Tan, H. and Tzempelikos, A. (2011) 'The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption—An experimental study', *Energy and Buildings*, 43(2), pp. 573–580. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.024>.

Süer, F.Z. and İleriSoy, Z.Y. (2022) 'Effects of Exterior Wall Details and Building Locations on Energy Consumption of Residential Buildings in Turkey'.

*Tendances | Suivi de l'ODD 7* (2022).

Tete, K.H.S. *et al.* (2023) 'Urban domestic electricity consumption in relation to households' lifestyles and energy behaviours in Burkina Faso: Findings from a large-scale, city-wide household survey', *Energy and Buildings*, 285, p. 112914. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112914>.

Tunçbilek, E. *et al.* (2023) 'Enhancing building wall thermal performance with phase change material and insulation: A comparative and synergistic assessment', *Renewable Energy*, 218, p. 119270. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119270>.

Verbeke, S. and Audenaert, A. (2018) 'Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 2300–2318. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>.

Wyss, U. (2005) 'La construction en « matériaux locaux »'.

Yahoda, D.S. and Wright, J.L. (2006) 'Heat Transfer Analysis of a Between-Panes Venetian Blind Using

Effective Longwave Radiative Properties', 110.

Yolcan, O.O. (2023) 'World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation', *Innovation and Green Development*, 2(4), p. 100070. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100070>.

Zoma, V. *et al.* (2023) 'Numerical Study of the Thermal Behavior of a Hollow Block with Phase Change Materials (PCM) in the Sahelian Zone', *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences*, 11(1), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.9734/ajopacs/2023/v11i1191>.

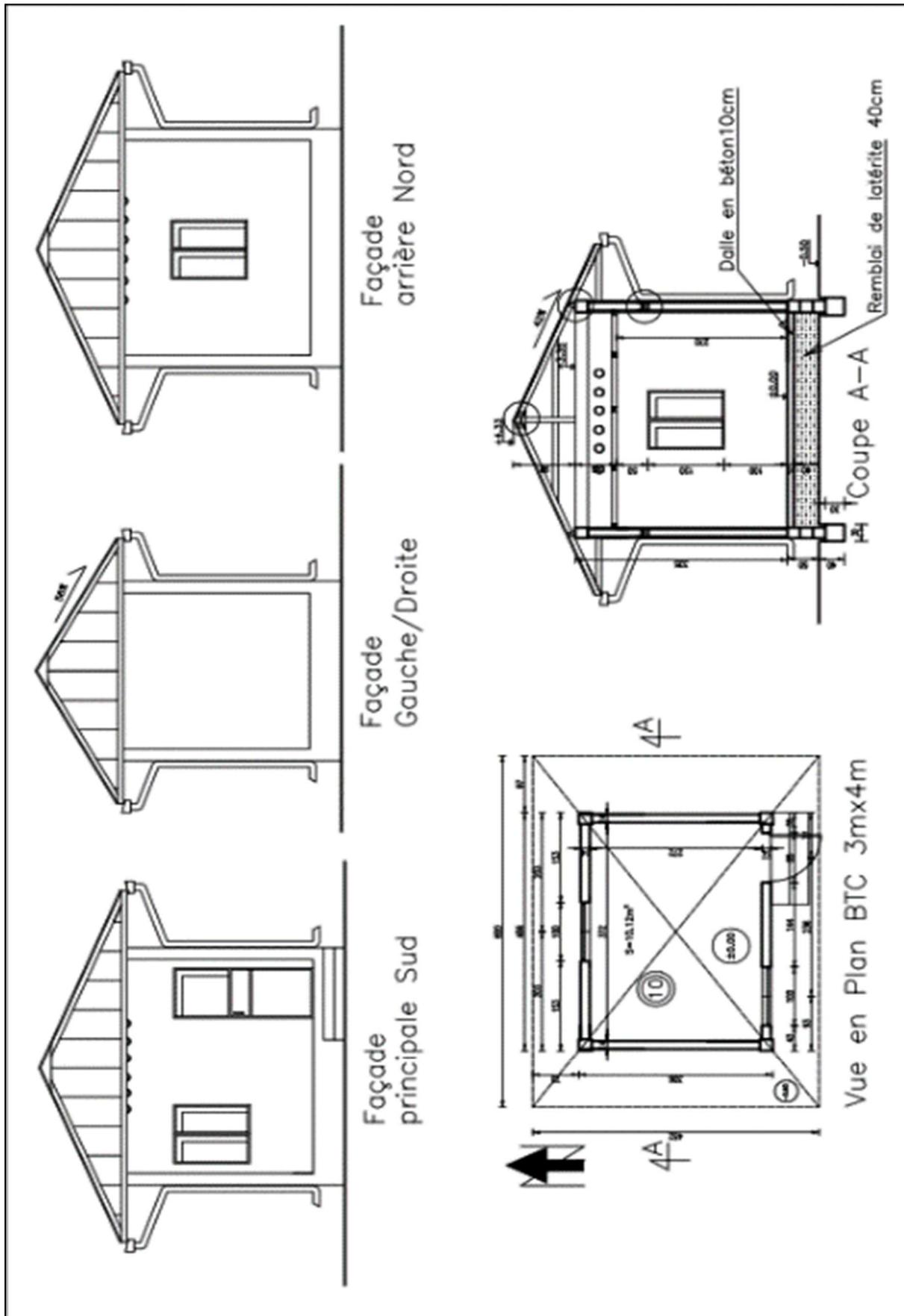
Zoungrana, O. *et al.* (2020) 'Sustainable habitat in Burkina Faso: Social trajectories, logics and motivation for the use of compressed earth blocks for housing construction in Ouagadougou', in. *ECO-ARCHITECTURE 2020*, pp. 165–172. Available at: <https://doi.org/10.2495/ARC200131>.

## VII. ANNEXES

---

- 1- Plan des bâtiments pilotes
- 2- Modélisation des bâtiments pilotes
- 3- Simulation avec climatisation

## Annexe I : Plans des bâtiments pilotes



## Annexe II : Modélisation des bâtiments pilotes

Dans le cadre de la modélisation des bâtiments pilotes nous avons fait usage du logiciel Openstudio 1.4 associé au logiciel Sketchup 22. Le but l'annexe ainsi présenté est de fournir les valeurs effectives des paramètres thermiques des parois mis en œuvre dans le modèle numérique, ainsi que les résultats de calibration qui en découle. Le bâtiment, ainsi que le système de climatisation seront modélisés mais la calibration se fera sans ce dernier.

La modélisation réaliser est constituée de deux parties, représentant les espaces qui constituent notre bâtiment. Il s'agit du comble sous toiture, soumis à une ventilation naturelle et permanente ainsi que de la pièce intérieure du bâtiment dont les ouvertures restent fermées tout au long de l'étude.

### 1. Paramètres communs

Il est question ici des matériaux communs aux trois bâtiments. Pour ceux-ci en fonction de leurs natures ainsi que différentes observations dans la littérature, les valeurs implémentés dans la réalisation du modèle sont contenues dans le tableau suivant :

**Annexe 2 / Tableau 1 : Paramètres de calibration des éléments communs aux trois bâtiments**

	Toit métallique	Métal de porte	Contreplaqué de plafond	Dallage du sol
Rugosité	Lisse	Lisse	Moyennement lisse	Moyennement rugueux
Epaisseur [m]	0.001	0.0015	0.005	0.100
Conductivité [W/m.K]	45.28	45.00	0.12	1.70
Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	7824	8000	500	1280
Chaleur spécifique [J/kg.K]	500	460	1200	840
Absorptivité thermique [%]	0.99	0.99	0.99	0.99
Absorption solaire [%]	0.00	0.00	0.00	0.53
Absorption visible [%]	0.00	0.00	0.00	0.53

Outres les différents éléments du bâtiment proprement dit, le système de climatisation également est commun aux trois bâtiment. Afin de le représenté dans le modèle conçu nous mettons en place un système de production d'air froid dont les caractéristiques sont les suivantes :

**Annexe 2 / Tableau 2 : Composition du système de climatisation**

Désignation dans OpenStudio	Rôle et Spécifications
OA system	Assurer un renouvellement de l'air au cours de la climatisation de la pièce en intégrant un volume d'air calculé en fonction de l'utilisation et des dimensions de la pièce.
Unitary – Two speed DX cowlng system – Cycling - Elec Reheat	Assurer le refroidissement de l'air dans la pièce. Cette unité dispose de d'une vitesse de production variable permettant un comportement similaire à celui d'un climatiseur inverter.
Set point manager single zone cooling	Joue le rôle de capteur dans la pièce permettant de contrôler la position température de la pièce vis-à-vis de la température de consigne afin d'activer au besoin le système de climatisation. La température de consigne maintenu sera celle de 27°C.
Diffuser	Permet de disperser l'air froid produit dans la pièce

## 2. Paramètres spécifiques

Spécifiquement à chaque modèle correspond un matériau. Les valeurs de propriétés thermiques implémentées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

**Annexe 2 / Tableau 3 : Paramètres de calibration de chaque matériau**

	Parpaing		Brique de terre stabilisées au ciment	Brique de terre stabilisées au Géopolymère
	Blocks de béton creux	Mortier de ciment		
Rugosité	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Epaisseur [m]	0.15	0.02	0.14	0.14
Conductivité [ $W/m.K$ ]	0.80	1.10	1.02	0.71
Densité [ $kg/m^3$ ]	1000	1700	1860	1730
Chaleur spécifique [ $J/kg.K$ ]	1000.00	1000.00	975.00	1027.14
Absorptivité thermique [%]	0.99	0.99	0.30	0.30
Absorption solaire [%]	0.53	0.53	0.30	0.30
Absorption visible [%]	0.53	0.53	0.30	0.30

## 3. Résultats

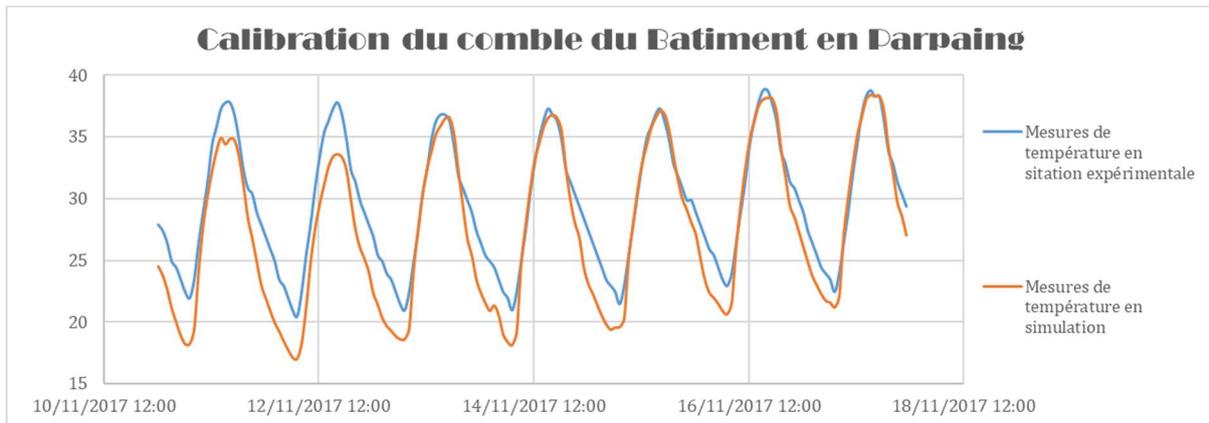
### • Bâtiment en parpaing

Dans le cas du bâtiment en parpaing les coefficients de calibration obtenus suite à la phase de calibration sont les suivants :

	Valeurs de coefficients après calibrage		
	NMBE	CVRMSE	R <sup>2</sup>
Température du comble du bâtiment en parpaing	6,84%	9,03%	94,78%
Température de la pièce du bâtiment en parpaing	8,92%	11,94%	91,01%

Seuil de validation	< 10%	< 30%	> 90%
---------------------	-------	-------	-------

Les écarts de température observés entre les valeurs fournis par le modèle et les valeurs



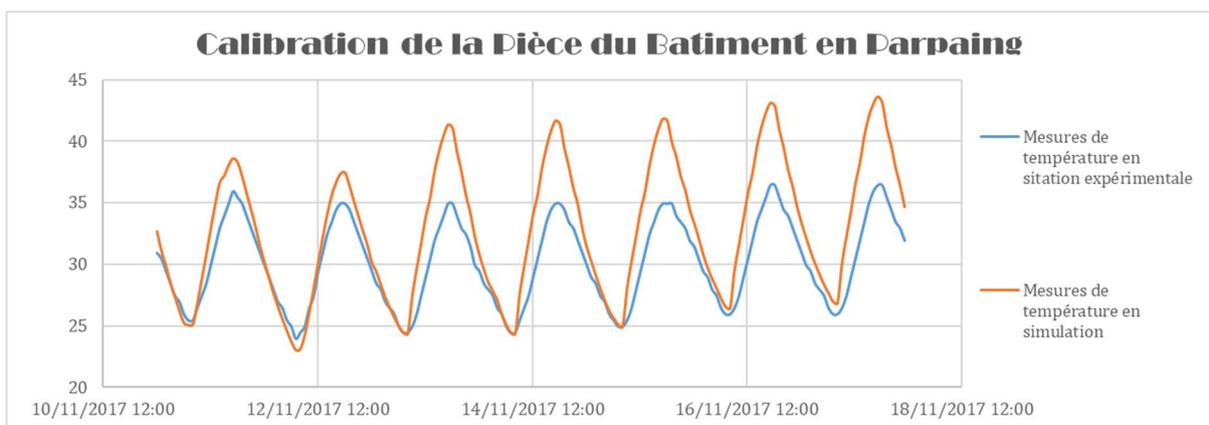
Annexe 2 / Figure 1 : Résultats de la calibration du comble du bâtiment en parpaing

de température observés expérimentalement sont exposée par les graphes suivants :

A partir des courbes de températures fournit l'on peut observer que malgré de bon coefficients de validations, le modèle a encore tendance à chauffer plus que nécessaire dans la pièce du bâtiment. Cela pourrait signifier que bien qu'il soit assez représentatif de la situation réelle observé en expérimentation celui-ci puisse encore être sujet à amélioration.

• **Bâtiment en BTC Ciment**

Dans le cas du bâtiment en BTC Ciment les coefficients de calibration obtenus suite à la phase de calibration sont les suivants :

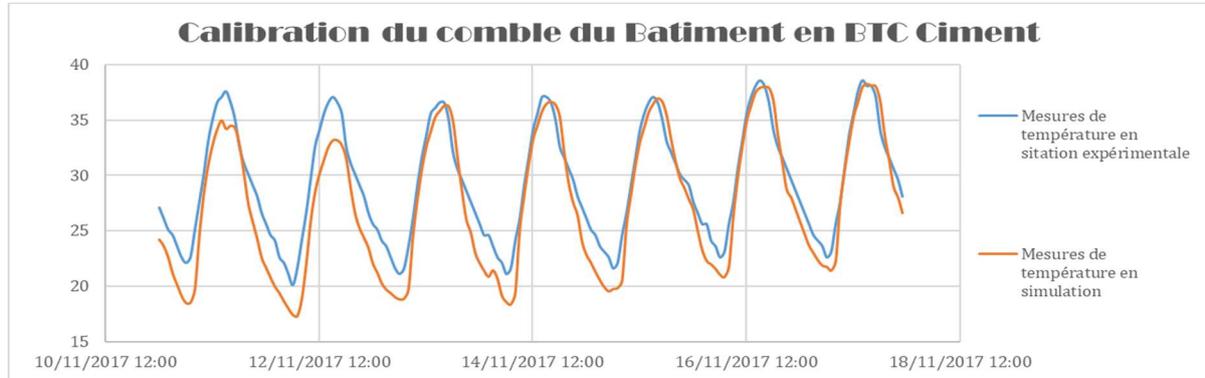


Annexe 2 / Figure 2 : Résultats de la calibration de la pièce du bâtiment en parpaing

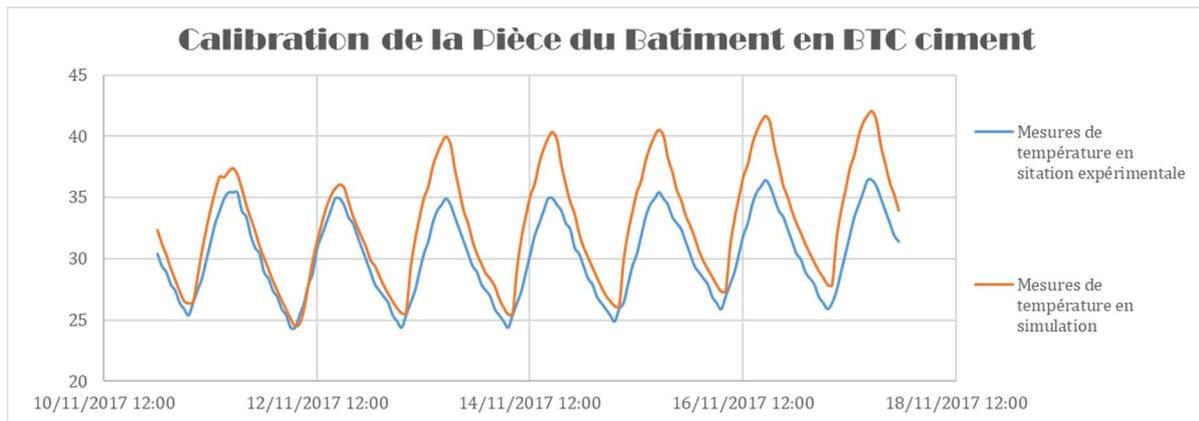
	Valeurs de coefficients après calibrage		
	NMBE	CVRMSE	R <sup>2</sup>
Température du comble du bâtiment en BTC ciment	6,34%	8,53%	94,83%

Température de la pièce du bâtiment en BTC ciment	0,08%	0,10%	92,00%
Seuil de validation	< 10%	< 30%	> 90%

Les écarts de température observés entre les valeurs fournis par le modèle et les valeurs de



**Annexe 2 / Figure 3 : Résultats de la calibration du comble du bâtiment en BTC Ciment**  
température observés expérimentalement sont exposée par les graphes suivants :



**Annexe 2 / Figure 4 : Résultats de la calibration de la pièce du bâtiment en BTC Ciment**

Comme pour le cas du parpaing, l'on peut remarquer que malgré de bon coefficients de validations, le modèle a encore tendance à chauffer plus que nécessaire dans la pièce du bâtiment. Cela pourrait signifier que bien qu'il soit assez représentatif de la situation réelle observé en expérimentation celui-ci puisse encore être sujet à amélioration.

- **Bâtiment en BTC Géopolymère**

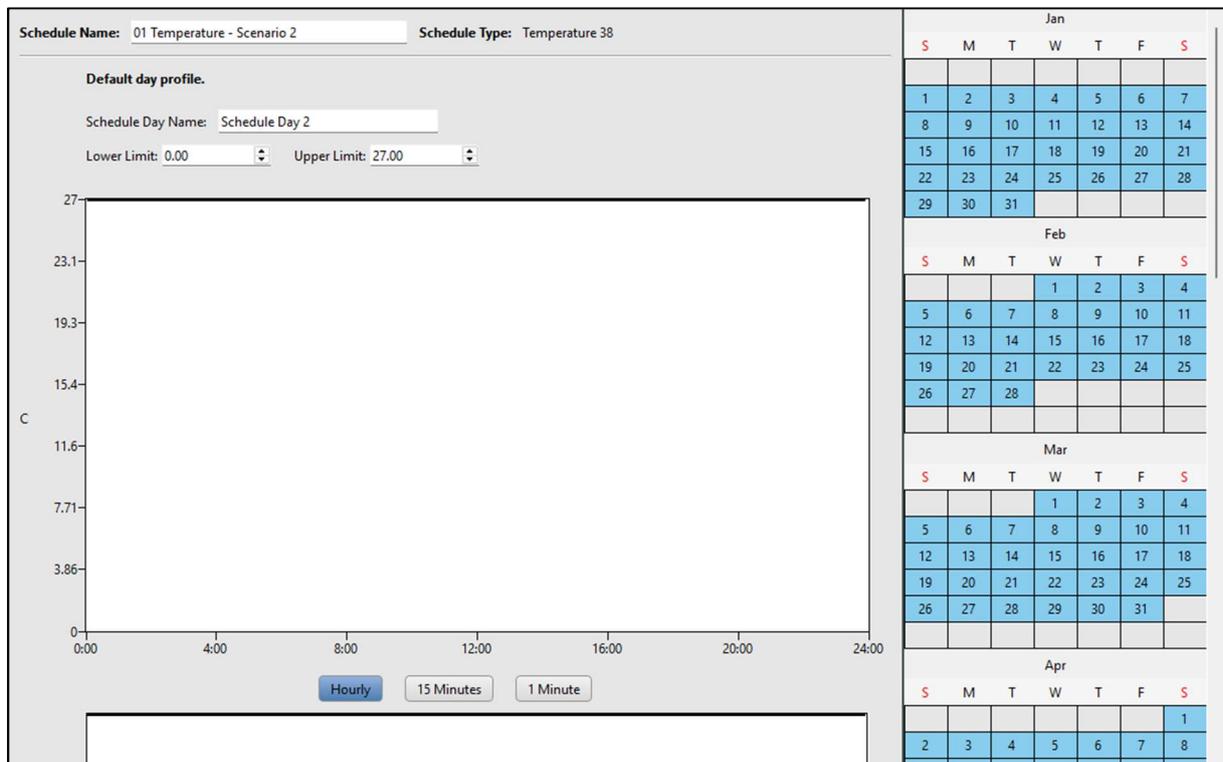
Dans le cas de la brique de terre stabilisée au Géopolymère, nous ne disposons pas données de calibration permettant une bonne précision de notre modèle numérique. Dans cette étude, pour ce bâtiment nous ferons donc une approximation de son comportement à partir de celui observé chez la brique de terre stabilisée au ciment, en attente d'études complémentaire.

## Annexe III : Simulation avec climatisation

Au cours de la phase de climatisation périodique, il est nécessaire de fournir au système de climatisation des instructions précises sur son temps de fonctionnement qui est désormais limité, en plus des paramètres déjà évoqués.

Afin d'implémenter les différents scénarios conçus dans le fonctionnement de notre système de climatisation nous avons eu recours à diverses stratégies basées principalement sur la valeur de température de consigne et exposé ci-après.

### 1. Scénario de base : Climatisation permanente



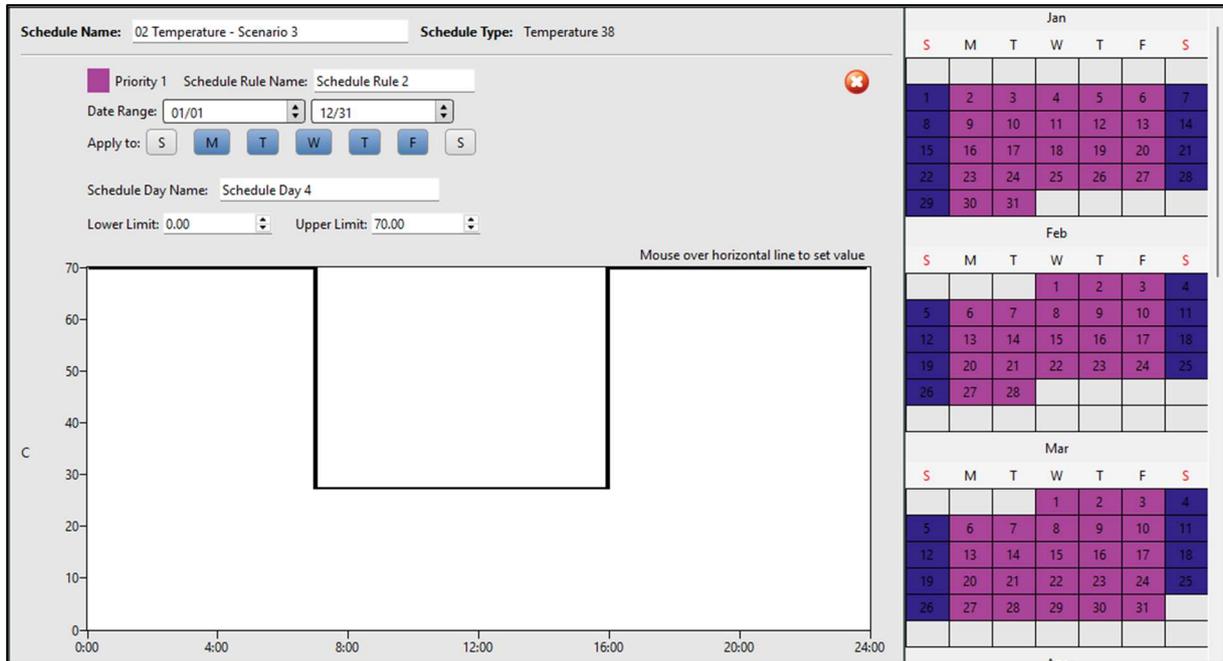
Annexe 3/ Figure 1 : Paramétrage du scénario 2 dans OpenStudio

Comme le montre la figure ci haut, le système de climatisation est programmé pour fonctionner tous les jours de l'année, sans limitation d'heure et suivant une température de consigne de 27°C. Ainsi, le système de climatisation s'assurera à chaque instant de la durée de l'essai que la température à l'intérieure de la pièce soit inférieure à 27°C.

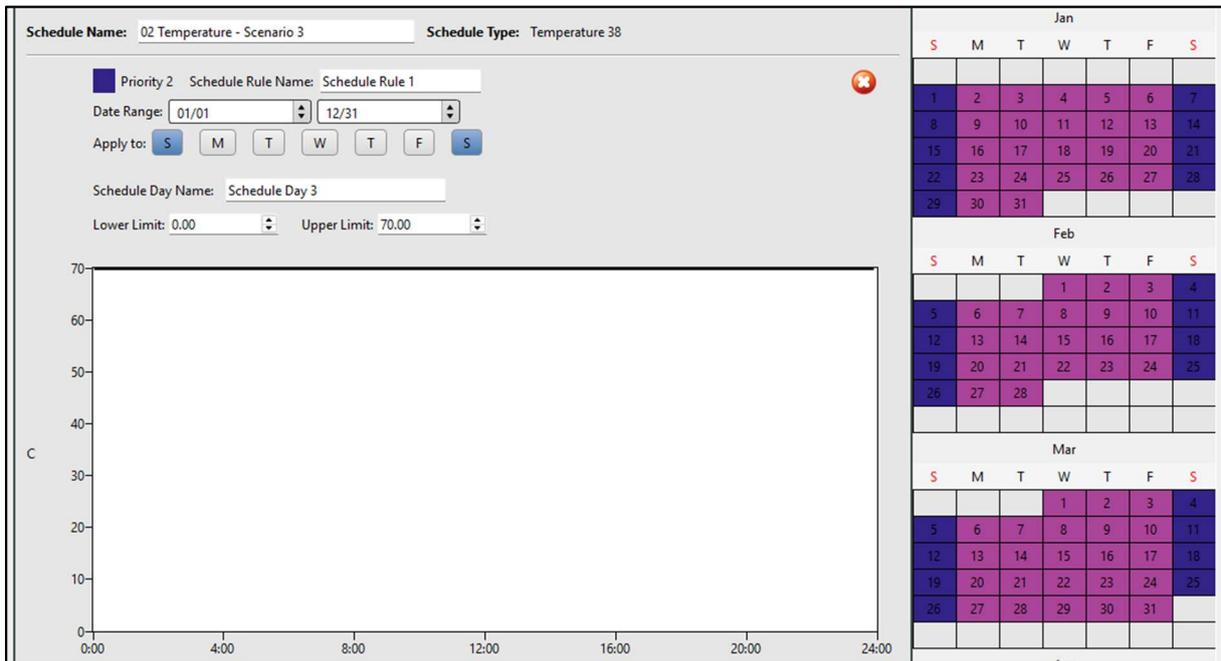
### 2. Scénario 3 : Utilisation de Bureau

Au cours du scénario 3, la climatisation fonctionne entre 7h et 16h, et n'est pas activé durant le Weekend. Pour paramétrer ce planning dans OpenStudio nous modifions la température de

consigne pour quel soit fixée à 27°C durant les heures de fonctionnement du système de climatisation et à 70°C, durant les périodes où elles ne sont pas censées fonctionner, notamment de 16h en soirée à 7h du matin et durant les weekends.



Annexe 3/ Figure 2 : Paramétrage du scénario 3 - Jours ouvrables

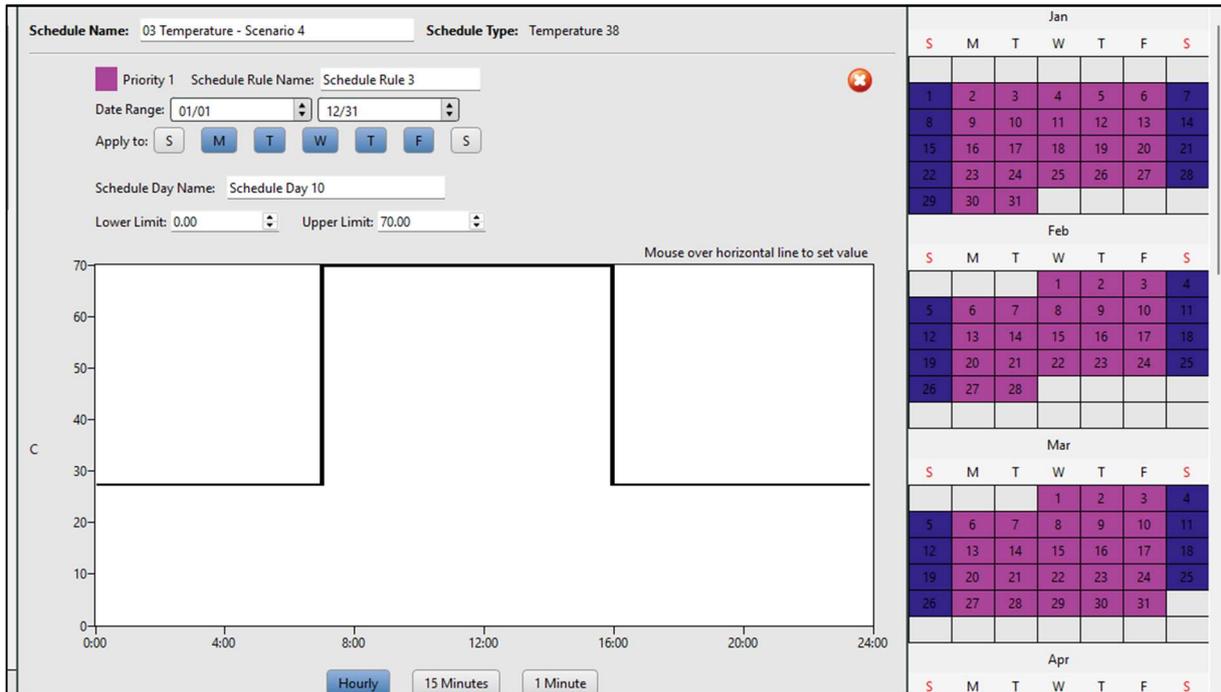


Annexe 3/ Figure 3 : Paramétrage du scénario 3 - Weekends

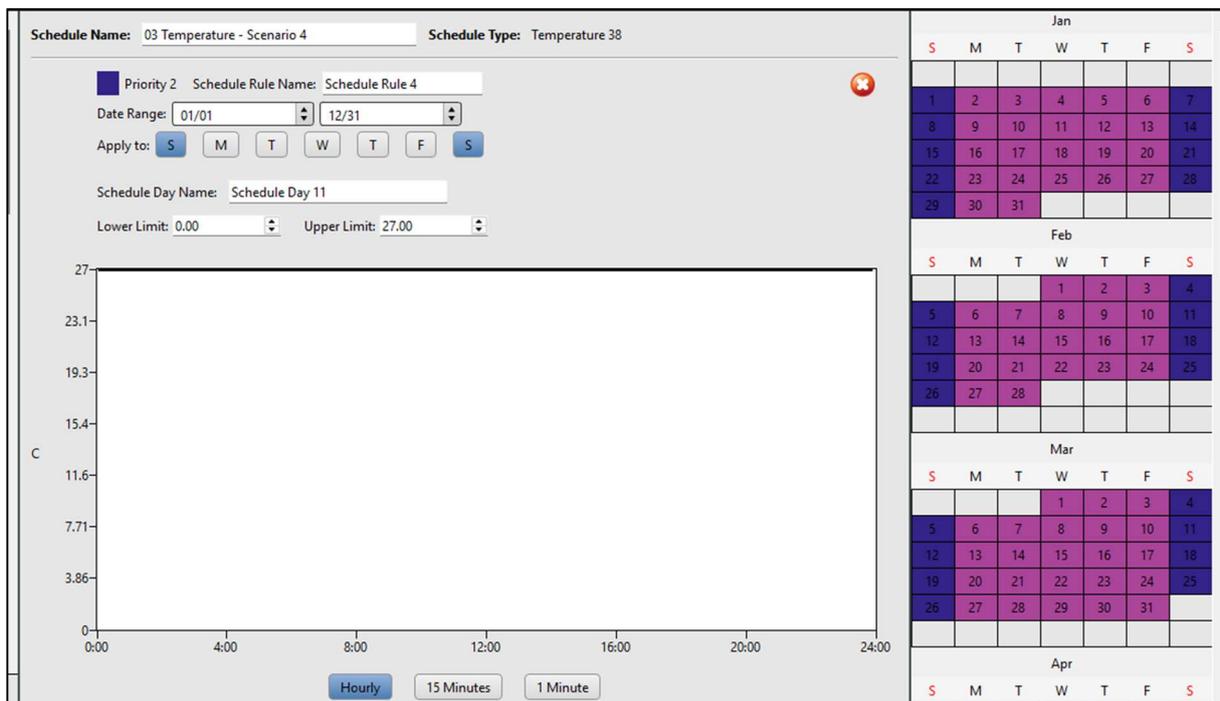
### 3. Scénario 4 : Utilisation résidentielle

Au cours du scénario 4, la climatisation fonctionne entre 16h et 7h, et est active durant le Weekend. Pour paramétrer ce planning dans OpenStudio nous modifions la température de consigne pour quel soit fixée à 27°C durant les heures de fonctionnement du système de

climatisation et à 70°C, durant les périodes où elles ne sont pas censées fonctionner, notamment de 7h du matin à 16h en soirée durant les Jours ouvrables.



Annexe 3/ Figure 5 : Paramétrage du scénario 4 - Jours ouvrables



Annexe 3/ Figure 4 : Paramétrage du scénario 4 - Weekends

## Annexe IV : Propriétés thermiques des matériaux / parois de l'enveloppe

Il est question dans cette partie de fournir le détail du calcul des propriétés thermiques des parois en fonction du matériau qui constitue tel que exposée au sein du Tableau 1. Afin de caractériser thermique nos parois nous déterminons les propriétés suivantes :

- Epaisseur de la paroi ( $e$ )
- Conductivité thermique ( $\lambda$ )
- La masse volumique du matériau ( $\rho$ )
- La chaleur spécifique du matériau ( $c$ )
- La diffusivité du matériau ( $\alpha$ )
- L'effusivité du matériau ( $E$ )
- La capacité thermique du matériau (CT)
- Le coefficient de transmission thermique du matériau ( $U$ )

### 1. Épaisseurs des parois

Pour ce qui est de l'épaisseur choisi pour les parois extérieures, elle s'inspire des observations effectuées à l'échelle des constructions dans la ville de Ouagadougou. Les épaisseurs retenues sont celles couramment employées par les populations locales dans la réalisation des bâtiments à usage résidentiel et de bureau. Il est question de 14cm pour les BTCs et 15cm pour le parpaing, celui-ci étant recouvert sur ses deux faces d'un enduit de 2 cm d'épaisseur, conduisant à une épaisseur totale de la paroi de 19cm.

### 2. Données de laboratoire

Certaines données n'ont pas été obtenues par calcul, mais après essai en laboratoire. Il est question notamment des valeurs de conductivité thermique (méthode de la plaque chaude gardée), la masse volumique du matériau et la chaleur spécifique du matériau. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

	$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$c$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Parpaing	0.85	1147	1000.00
BTC Géopolymère	0.71	1730	1027.10
BTC Ciment	1.02	1840	975.00

### 3. Effusivité et Diffusivité

L'effusivité est la capacité du matériau à avec l'air ambiant. Une effusivité élevée, traduit la capacité du matériau à rapidement absorber ou rejeter la chaleur accumulée dans l'air ambiant, tandis qu'une valeur d'effusivité plus faible traduit un échange de chaleur plus difficile (plus lent) entre le matériau et l'air ambiant.

La diffusivité est la capacité du matériau à se laisser traverser par la chaleur. Une diffusivité élevée, traduit la capacité du matériau se laisser traverser rapidement par la chaleur. Par contre une valeur de diffusivité plus faible traduit une traverser plus lente du matériau.

Les expressions utilisées pour leurs calculs sont les suivantes :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \qquad \alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

	$\alpha$ [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$E$ [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> .s <sup>0.5</sup> ]
Parpaing	7.40.E-07	986.82
BTC Géopolymère	4.00.E-07	1123.20
BTC Ciment	5.69.E-07	1352.73

### 4. Capacité thermique (CT) et coefficient de transfert thermique (U)

La capacité thermique traduit l'aptitude de la paroi à accumuler de la chaleur. Une valeur élevée de celle-ci signifie que la paroi possède de grande capacité de réserve, quant à la chaleur qu'il peut accumuler.

Le coefficient de transmission thermique quantifie la quantifie de chaleur qui traverse une paroi par unité de surface et de temps.

Les expressions utilisées pour leurs calculs sont les suivantes :

$$CT = e \rho c \qquad U = \frac{1}{h_e} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_i} \text{ (avec } h_e=25 \text{ et } h_i=7,7)$$

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

	CT [kJ.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	U [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Parpaing	218	2.33
BTC Géopolymère	249	2.72
BTC Ciment	251	3.26

