

# *Analyse Du Comportement Thermique D'un Bâtiment En Parpaing Dans Un Contexte De Réchauffement Climatique*

RAMANAMPAMONJY Jean Claude<sup>1</sup>, RAMIANDRA Aina Clarc<sup>2</sup>, HERIPINOANARIMANANA Fenomora Evariste<sup>3</sup>, VELOMISAINA Dorissia<sup>4</sup>, VAVIZARA Sylvie<sup>5</sup>, HARY Jean<sup>6</sup>, MAXWELL Djaffard<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
[rabotajc@yahoo.fr](mailto:rabotajc@yahoo.fr)

<sup>2</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
[clarcaina@gmail.com](mailto:clarcaina@gmail.com)

<sup>3</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
[herievariste@gmail.com](mailto:herievariste@gmail.com)

<sup>4</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
[dorissia.aina@gmail.com](mailto:dorissia.aina@gmail.com)

<sup>5</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
[vavizarasyylvie@yahoo.fr](mailto:vavizarasyylvie@yahoo.fr)

<sup>6</sup>Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga

Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
[jjeanhary@yahoo.com](mailto:jjeanhary@yahoo.com)

<sup>7</sup>Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga

Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
[djafmax@yahoo.fr](mailto:djafmax@yahoo.fr)

Auteur correspondant : RAMANAMPAMONJY Jean Claude. E-mail : [rabotajc@yahoo.fr](mailto:rabotajc@yahoo.fr)



**Résumé :** Madagascar, en raison de sa situation géographique dans l’océan Indien, demeure l’un des pays les plus vulnérables face aux aléas climatiques, notamment les cyclones tropicaux, la variabilité pluviométrique et l’élévation progressive des températures. Cette étude se concentre sur la région de Boeny et vise à analyser l’évolution des paramètres climatiques afin d’évaluer leur impact sur la conception architecturale des bâtiments. Les données climatiques annuelles issues du modèle CanESM2, corrigées par une méthode de réduction de biais, ont été exploitées pour la période 2006–2100. Trois approches de modélisation complémentaires ont été mises en œuvre : la modélisation stationnaire des gradients thermiques dans les murs, le modèle simplifié Résistance-Capacité (RC) pour analyser la dynamique thermique annuelle, et (iii) la simulation transitoire numérique (1D et 2D) afin de capturer l’inertie thermique du parpaing. Les résultats indiquent une tendance générale à l’augmentation des précipitations et des températures, associées à une variabilité accrue de la vitesse du vent. Sur le plan thermique, il est démontré que le parpaing présente une certaine inertie, réduisant et retardant les pics de chaleur, mais reste insuffisant pour garantir un confort durable : la température intérieure dépasse le seuil de confort de 28 °C durant environ 23 années sur 95, soit près de 24 % de la période simulée. Ces constats soulignent la nécessité d’adopter des stratégies d’adaptation architecturale telles que la ventilation naturelle optimisée, l’ajout d’isolants et l’intégration de protections solaires, afin d’accroître la résilience du bâti face au changement climatique.

**Mots-clés :** climat, parpaing, confort, thermique, inertie, adaptation

**Abstract:** Madagascar’s location in the Indian Ocean makes it highly vulnerable to climatic hazards, including tropical cyclones, rainfall variability, and rising temperatures. This study focuses on the Boeny region and investigates the evolution of climate parameters and their impact on architectural design. Annual climate data from the CanESM2 model, corrected through bias-adjustment methods, were analyzed for the period 2006–2100. Three complementary modeling approaches were employed: (i) steady-state modeling of thermal gradients through walls, (ii) the simplified Resistance–Capacitance (RC) model to capture annual thermal dynamics, and (iii) transient numerical simulations (1D and 2D) to assess the thermal inertia of hollow concrete blocks. Results reveal a progressive increase in both precipitation and temperature, along with high variability in wind speed. From a thermal perspective, hollow concrete blocks provide moderate inertia that reduces and delays heat peaks, but this remains insufficient to ensure long-term comfort. The simulations show that indoor temperature exceeds the 28 °C comfort threshold in about 23 out of 95 years (≈24%), demonstrating the limitations of passive thermal regulation. These findings highlight the urgent need for adaptive architectural strategies, including optimized natural ventilation, additional insulation, and solar protections, to strengthen building resilience under future climate conditions in Boeny.

**Keywords:** climate, hollow block, thermal comfort, inertia, adaptation

## I. INTRODUCTION

Le changement climatique, marqué par une tendance progressive à l’élévation des températures, soulève de nouveaux défis pour le confort thermique et la performance énergétique des bâtiments. Dans la région de Boeny, limitée par les longitudes entre 46° E et 47° E et latitudes entre 15° S et 16° S., où le parpaing est le matériau de construction le plus couramment utilisé, il est essentiel de comprendre le comportement thermique des parois afin d’évaluer leur capacité à atténuer les effets du réchauffement climatique. La problématique centrale de cette étude est de déterminer si un bâtiment en parpaing peut assurer un confort thermique intérieur suffisant, dans un contexte où les températures extérieures sont appelées à évoluer significativement au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. L’hypothèse posée est que l’inertie thermique du parpaing permet de limiter les variations de température intérieure et de retarder la propagation de la chaleur, mais que cette capacité reste partiellement insuffisante face aux conditions climatiques futures. Pour vérifier cette hypothèse, une approche de modélisation numérique a été adoptée, reposant sur trois volets méthodologiques complémentaires :

- la modélisation stationnaire des profils de température à travers un mur,
- la méthodologie du modèle Résistance-Capacitance (R-C) pour représenter les transferts thermiques simplifiés,
- et la modélisation transitoire 1D des transferts thermiques afin de simuler l’évolution dynamique des températures dans la paroi ainsi que la méthodologie de simulation thermique 2D d’un mur en parpaing.

Cet article est structuré en trois parties. La première présente les fondements théoriques et la méthodologie de modélisation adoptée. La deuxième expose les résultats obtenus à partir des simulations stationnaires et transitoires. Enfin, la troisième partie discute les implications de ces résultats en termes de confort thermique et d'adaptation des bâtiments aux conditions climatiques futures dans la région de Boeny.

## II. METHODE

### A. Modélisation des profils de température stationnaires dans un mur

Cette modélisation a pour objectif de visualiser l'évolution du gradient thermique à travers un mur soumis à différentes températures extérieures projetées par un modèle climatique. L'analyse se concentre sur une configuration de régime stationnaire, permettant d'isoler et de comparer l'effet pur de la hausse des températures extérieures sur le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment.

#### 1. Hypothèses et modèle physique

Le modèle repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les températures intérieure et extérieure sont constantes dans le temps pour chaque simulation annuelle. Cette hypothèse permet de s'affranchir de l'inertie thermique et d'étudier le cas d'équilibre théorique.
- Le transfert de chaleur se fait uniquement perpendiculairement à la surface du mur (direction(x), négligeant les effets de bords et les ponts thermiques.
- La conductivité thermique (k) du matériau est supposée constante et homogène dans tout le mur.
- Les températures des surfaces intérieures  $T_{int}$  et extérieure  $T_{ext}$  sont imposées et constantes.

Sous ces hypothèses, la distribution de température dans le mur est régie par l'équation de la chaleur en régime permanent sans génération de chaleur interne [1] :

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (1)$$

Comme k est constant, cette équation se simplifie en  $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$ , ce qui implique un profil de température linéaire à travers l'épaisseur du mur.

La solution analytique est donnée par :

$$T(x) = T_{int} + (T_{ext} - T_{int}) \cdot \left( 1 - \frac{x}{e} \right) \quad (2)$$

où :

$T(x)$  est la température à la position x [°C],

$T_{int} = 26$  °C est la température intérieure fixée (condition aux limites en x=0),

$T_{ext}$  est la température extérieure annuelle moyenne [°C] (condition aux limites en x=e),

e = 0.25 , m est l'épaisseur du mur [m],

x est la coordonnée spatiale variant de 0 (face intérieure) à e (face extérieure) [m].

## B. Modélisation des transferts thermiques : Méthodologie du modèle Résistance-Capacitance (R-C)

Afin d'évaluer l'impact des projections climatiques sur le comportement thermique du bâtiment à long terme, une modélisation simplifiée mais physiquement fondée a été retenue. Cette approche, basée sur l'analogie électrothermique, permet de capturer la dynamique principale des échanges énergétiques à l'échelle annuelle.

### 1. Principe du modèle R-C

Le bâtiment est schématisé comme une zone thermique unique, caractérisée par deux grandeurs physiques principales :

- Sa Résistance thermique globale  $R$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ), qui modélise la capacité de l'enveloppe (murs, toiture, menuiseries) à s'opposer aux transferts de chaleur par conduction entre l'intérieur et l'extérieur. Une valeur de  $R = 2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , représentative d'une enveloppe moyennement isolée, a été utilisée pour cette étude.
- Sa Capacitance thermique globale  $C$  ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ), qui représente la capacité des matériaux constitutifs (murs, planchers, cloisons) à stocker l'énergie thermique, conférant ainsi au bâtiment son inertie. Elle est calculée par :

$$C = m \cdot c_p \quad (3)$$

où  $m = 10\,000 \text{ kg}$  est une masse thermique effective et  $c_p = 880 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  est la chaleur massique des matériaux. Cette modélisation repose sur l'hypothèse que la température intérieure est spatialement uniforme [3].

### 2. Formulation mathématique

Le bilan d'énergie du système, régi par le premier principe de la thermodynamique, s'écrit [2]:

$$C \frac{dT_{int}(t)}{dt} = \frac{T_{ext}(t) - T_{int}(t)}{R} \quad (4)$$

où :

$T_{int}(t)$  est la température intérieure ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{ext}(t)$  est la température extérieure ( $^{\circ}\text{C}$ ), issue des projections climatiques,

Le terme de droite  $\frac{T_{ext}(t) - T_{int}(t)}{R}$  représente le flux de chaleur net entrant par conduction à travers l'enveloppe (analogie de la loi d'Ohm).

Cette équation différentielle ordinaire du premier ordre décrit l'évolution temporelle de  $T_{int}(t)$  en réponse à l'excitation  $T_{ext}(t)$ .

### 3. Discrétisation et résolution numérique

L'équation (1) est résolue numériquement à l'aide de la méthode d'Euler explicite. En discrétisant le temps avec un pas annuel  $\Delta t = 365 \times 24 \times 3600$ , la dérivée est approximée par :

$$\frac{dT_{int}}{dt} \approx \frac{T_{int}(t_i) - T_{int}(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (5)$$

En substituant dans (4), on obtient le schéma de récurrence suivant permettant de calculer itérativement la température intérieure à chaque pas de temps :

$$T_{int}(i) = T_{int}(i-1) + \frac{\Delta t}{C} \cdot \frac{T_{ext}(i-1) - T_{int}(i-1)}{R}$$

La simulation est initialisée avec une condition initiale  $T_{int}(t_0) = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour l'année de référence 2006.

#### 4. Post-traitement et critère de performance

L'output du modèle est la série temporelle complète des températures intérieures annuelles  $T_{int}$  sur la période 2006-2100. Pour quantifier la résilience thermique du bâtiment face au changement climatique, un indicateur de performance est défini : le dépassement d'un seuil critique de confort d'été. Le nombre et le pourcentage d'années où  $T_{int}$  excède un seuil  $T_{seuil} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  sont calculés, fournissant une métrique simple pour évaluer le risque d'inconfort et de surchauffe à long terme.

Cette méthodologie, bien que simplifiée, offre un cadre robuste pour une analyse prospective de l'évolution thermique d'un bâtiment, en mettant l'accent sur la tendance pluriannuelle induite par l'évolution du climat.

#### C. Modélisation transitoire 1D des transferts thermiques dans un mur

Cette modélisation a pour objectif de simuler finement le comportement dynamique d'un mur soumis aux sollicitations climatiques annuelles projetées. Contrairement à une approche stationnaire, cette méthode permet de quantifier l'inertie thermique du mur et d'évaluer comment la température en son cœur évolue et répond avec un déphasage aux variations de la température extérieure, sur une base horaire puis agrégée annuellement [2][3].

##### 1. Hypothèses et Modèle Physique

Le modèle repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le transfert de chaleur se fait uniquement perpendiculairement à la surface du mur (direction  $x$ ). La température varie donc dans le temps et dans l'espace :  $T(x, t)$ .
- Le matériau (parpaing aggloméré) est caractérisé par une conductivité thermique  $k$ , une masse volumique  $\rho$  et une chaleur spécifique  $c_p$  constantes.
- Les températures des surfaces intérieure  $T_{int} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$  et extérieure  $T_{ext}$  sont imposées.  $T_{ext}$  est la valeur annuelle moyenne issue des projections climatiques pour une année donnée.

La physique du système est régie par l'équation de la chaleur en régime transitoire :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6)$$

On définit la diffusivité thermique du matériau, qui caractérise la vitesse de propagation de la chaleur :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (7)$$

L'équation devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

##### 2. Discrétisation et Résolution Numérique (Schéma explicite)

L'équation aux dérivées partielles est résolue numériquement par la méthode des différences finies.

- Discrétisation spatiale : Le mur d'épaisseur  $e = 0.2\text{ m}$  est maillé en  $N_x = 20$  nœuds  $dx = 0.01\text{ m}$ .

- Discrétisation temporelle : Le temps est discrétisé avec un pas  $dt = 100s$ . La condition de stabilité de Fourier pour le schéma explicite doit être respectée pour éviter les divergences numériques :

$$Fo = \frac{\alpha dt}{dx^2} \leq 0.5 \quad (8)$$

Le code vérifie ce critère. La simulation est exécutée sur une durée de  $t_{\{max\}} = 30 \text{ jours}$  pour chaque année, temps suffisant pour atteindre un quasi-équilibre et obtenir une valeur annuelle représentative de la température au centre du mur.

- Schéma aux différences finies explicite : Le schéma itératif utilisé pour calculer la température au pas de temps  $n+1$  est :

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\alpha dt}{dx^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) \quad (9)$$

où  $T_i^n$  est la température au nœud  $i$  au pas de temps  $n$  ;

- Conditions initiales et aux limites :

Condition initiale ( $t = 0$ ) :  $T(x, 0) = T_{int}$

Condition à la limite intérieure ( $x = 0$ ) :  $T(0, t) = T_{int}$ .

Condition à la limite extérieure ( $x = e$ ) :  $T(e, t) = T_{ext}$ .

#### D. Méthodologie de simulation thermique 2D d'un mur en parpaing

Dans le cadre de cette étude, le transfert de chaleur au sein d'un mur en parpaing a été modélisé à l'aide de l'équation de la conduction non-stationnaire en deux dimensions. Ce choix se justifie par la nature du problème, où le flux thermique s'effectue principalement à travers l'épaisseur du mur, tout en considérant une variation possible le long de sa hauteur.

##### 1. Modèle physique

Le comportement thermique du matériau est régi par l'équation de la chaleur [4] :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

où  $\rho$  désigne la masse volumique [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $c$  la capacité thermique massique [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ], et  $\lambda$  la conductivité thermique [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Afin de simplifier l'écriture, on introduit la diffusivité thermique du matériau :

$$\alpha = \lambda / (\rho c) [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

Dans le cas du parpaing considéré, les propriétés physiques adoptées sont :

$$\rho = 2300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c = 900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda = 1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Ce qui conduit à une diffusivité thermique :  $\alpha \approx 6.76 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Le domaine étudié correspond à un mur vertical de parpaing d'épaisseur  $e = 0,25 \text{ m}$  et de hauteur  $H = 3,0 \text{ m}$ .

Les conditions aux limites retenues sont les suivantes :

- face extérieure ( $x=0$ ) : température constante  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

- face intérieure (x=e) : température constante 25 °C,
- bords supérieur et inférieur : isolés thermiquement (flux nul),
- état initial : température uniforme de 20 °C.

## 2. Discrétisation numérique

La géométrie du mur est discrétisée selon deux directions (x et y) et le temps est découpé en pas  $\Delta t$ . Le schéma implicite d'Euler arrière est utilisé afin de garantir la stabilité inconditionnelle du calcul.

Pour un nœud intérieur (i,j), l'équation discrète s'écrit :

$$\frac{(T_{i,j}^{N+1} - T_{i,j}^N)}{\Delta t} = \alpha \left[ \frac{(T_{i+1,j}^{N+1} - 2T_{i,j}^{N+1} + T_{i-1,j}^{N+1})}{\Delta x^2} + \frac{(T_{i,j+1}^{N+1} - 2T_{i,j}^{N+1} + T_{i,j-1}^{N+1})}{\Delta y^2} \right] \quad (12)$$

En posant :

$$r_x = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (13), \quad r_y = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \quad (14)$$

On obtient un système linéaire matriciel :  $A \cdot T^{n+1} = T^n$ .

## 3. Algorithme de simulation

La procédure de calcul adoptée est la suivante :

- Initialiser le champ de température dans le mur à 20 °C,
- Assembler la matrice du système en tenant compte des conditions aux limites,
- Pour chaque pas de temps : appliquer les conditions, résoudre le système  $A \cdot T^{n+1} = T^n$ , et mettre à jour le champ de température,
- Enregistrer et analyser l'évolution temporelle et spatiale de la distribution thermique.

## III. RESULTATS

### E. Évolution du profil thermique du mur entre 2007 et 2100

La Figure 1 illustre l'évolution du gradient thermique à travers un mur en fonction des températures extérieures moyennes projetées pour les années 2007, 2025, 2050, 2075 et 2100. Chaque courbe représente la distribution linéaire de température à travers l'épaisseur du mur, en régime stationnaire, pour une température extérieure donnée issue des projections climatiques corrigées de biais (modèle CanESM2). Les courbes présentent une pente linéaire décroissante, caractéristique d'un transfert thermique par conduction à travers un matériau homogène. Cette linéarité confirme l'hypothèse d'un modèle stationnaire simple, sans accumulation de chaleur, utilisé pour simuler le comportement thermique du mur. L'axe des abscisses représente la position spatiale dans le mur (de l'extérieur vers l'intérieur), tandis que l'axe des ordonnées indique la température. Les températures extérieures utilisées dans la simulation sont respectivement de 26,89 °C (2007), 27,62 °C (2025), 27,32 °C (2050), 27,62 °C (2075) et 27,32 °C (2100). On observe une augmentation générale de la température extérieure moyenne à partir de 2025, ce qui entraîne un accroissement du gradient thermique à travers le mur, visible par des pentes plus prononcées des courbes correspondantes (notamment en 2025 et 2075). Pour une température intérieure supposée constante de 25 °C, l'écart de température ( $\Delta T$ ) s'accroît, traduisant une augmentation du flux de chaleur transmis vers l'intérieur du bâtiment.



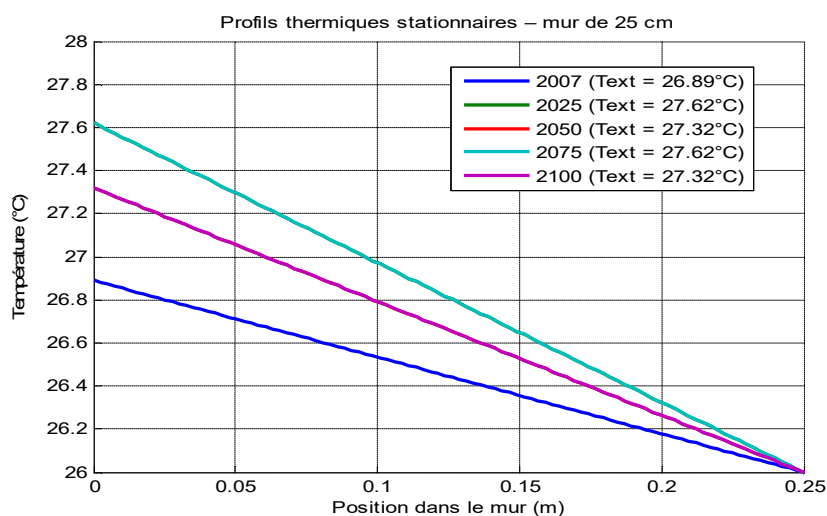


Figure 1 : Évolution du gradient thermique à travers un mur, en fonction des températures extérieures moyennes

#### F. Évolution temporelle du gradient thermique dans un mur en parpaing

La Figure 2 illustre l'évolution de la distribution de température au sein d'un mur en parpaing d'épaisseur 0,25 m et de hauteur 3 m, soumis à une température extérieure constante de 33 °C et à une température intérieure maintenue à 25 °C. Les cartes de couleurs représentent le gradient thermique en fonction du temps, pour différentes heures de la journée (1,5 h, 3 h, 7,5 h, 13,5 h, 19,5 h et 25,5 h). Aux premiers instants de la simulation, on observe une pénétration progressive de la chaleur depuis la face extérieure. La température près de la surface externe atteint rapidement la valeur imposée de 33 °C, tandis que le cœur du mur reste proche de la température initiale (20 °C). Cette phase traduit l'inertie thermique du matériau, qui ralentit la diffusion de la chaleur à travers l'épaisseur.

Au fil du temps, la diffusion thermique s'accroît :

- le gradient de température s'étend progressivement vers le centre du mur ;
- la zone jaune/orange indique un réchauffement notable du noyau, avec des températures comprises entre 27 °C et 30 °C ;
- le profil vertical reste relativement homogène, confirmant que les transferts dominants s'effectuent dans l'épaisseur du mur et non en hauteur.

Cette évolution correspond à un régime transitoire où le mur accumule de l'énergie thermique sans encore atteindre l'équilibre.

Après environ 20 heures de simulation, la distribution de température tend vers un état quasi stationnaire :

- le profil devient presque linéaire, reliant les conditions aux limites (33 °C à l'extérieur et 25 °C à l'intérieur) ;
- le cœur du mur atteint des températures proches de 29 à 30 °C, indiquant une saturation progressive de l'inertie thermique ;
- la température intérieure reste maintenue à 25 °C, illustrant la capacité du mur à atténuer la propagation du flux de chaleur.



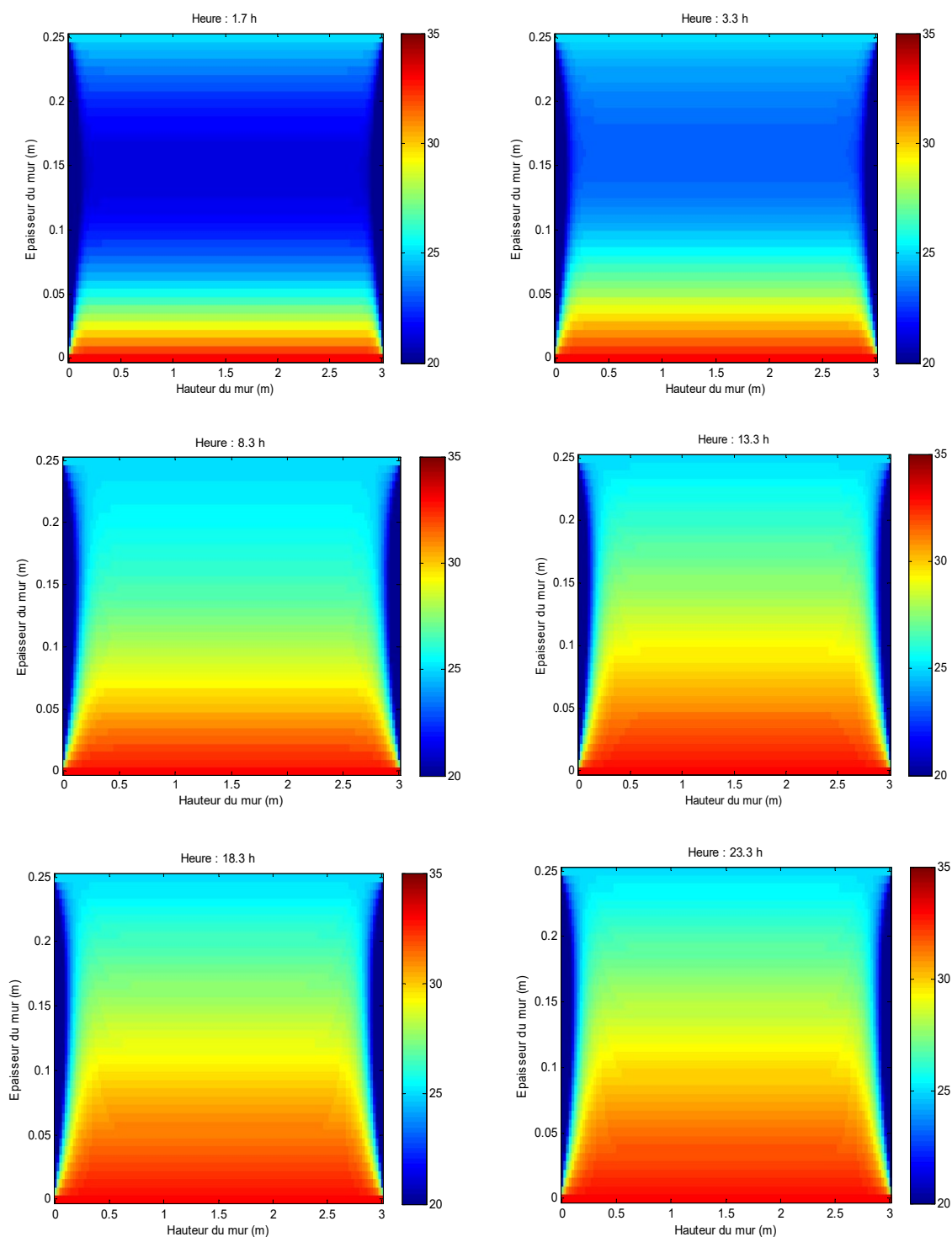


Figure 2 : Évolution de la distribution de température au sein d'un mur en parpaing d'épaisseur 0,25 m et de hauteur 3 m

### G. Réponse thermique transitoire du mur face aux variations climatiques

La Figure 3 présente l'évolution temporelle des températures extérieures (courbe rouge) et de la température au centre du mur en parpaing (courbe bleue). Ces résultats proviennent de la simulation numérique transitoire, intégrant les conditions climatiques variables et les propriétés thermophysiques du matériau de parpaing. On observe une amplitude thermique nettement plus élevée à l'extérieur, avec des variations marquées entre les minima nocturnes et les maxima diurnes. En revanche, la température au cœur du mur reste beaucoup plus stable, présentant des fluctuations réduites et un décalage temporel par rapport aux variations extérieures. Ce comportement traduit l'inertie thermique du parpaing : la masse volumique et la capacité thermique du matériau lui permettent d'absorber et de restituer la chaleur lentement, ce qui amortit les variations rapides de température. Ainsi, bien que l'amplitude extérieure atteigne plusieurs degrés, celle observée au centre du mur demeure limitée.

On note également un décalage temporel entre les pics de température extérieure et la réponse thermique **interne**. Ce déphasage correspond au temps nécessaire à la chaleur pour se propager à travers l'épaisseur du mur. Dans le cas du parpaing, ce déphasage est significatif, mais inférieur à celui observé pour des matériaux à plus forte inertie (comme le béton massif). Globalement, le mur en parpaing :

- réduit l'amplitude des variations thermiques perçues à l'intérieur ;
- retarde la transmission des pics de chaleur ;
- stabilise la température interne du bâtiment face aux fluctuations climatiques.

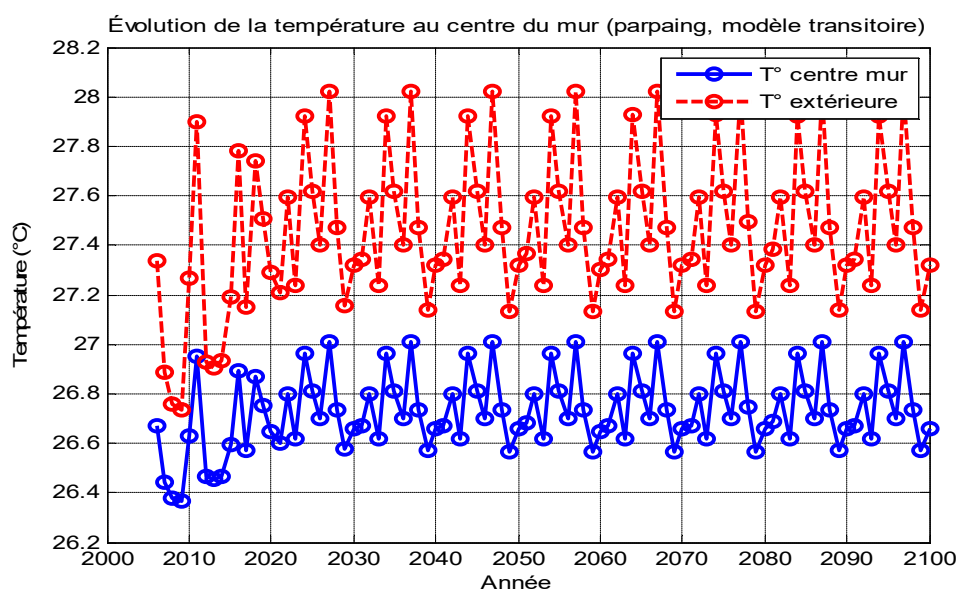


Figure 3 : Evolution temporelle des températures extérieures (courbe rouge) et de la température au centre du mur en parpaing (courbe bleue)

### H. Évaluation du confort thermique passif à l'horizon 2100

La Figure 4 illustre l'évolution comparée de la température extérieure moyenne annuelle, issue du modèle climatique CanESM2 corrigé de biais, et de la température intérieure simulée à l'aide du modèle thermique simplifié (R-C) appliqué à un bâtiment en parpaing. La courbe bleue représente la température extérieure. Elle montre une variabilité interannuelle modérée, avec des valeurs

comprises entre 26,5 °C et 28,0 °C sur la période 2006–2100. Cette stabilité traduit une évolution progressive et régulière du réchauffement climatique dans la région de Boeny. La courbe rouge correspond à la température intérieure simulée. Elle met en évidence une inertie thermique notable du bâtiment. La résistance thermique et la capacité thermique des parois en parpaing entraînent une atténuation des fluctuations et un lissage des variations extérieures. La température intérieure suit la tendance générale de la température extérieure tout en présentant une amplitude plus réduite. L'analyse quantitative indique que la température intérieure dépasse le seuil de confort de 28 °C pendant 23 années sur 95, soit environ 24,2 % de la période étudiée. Le confort thermique intérieur n'est pas garanti pendant ces années, en absence de systèmes actifs tels que la climatisation.

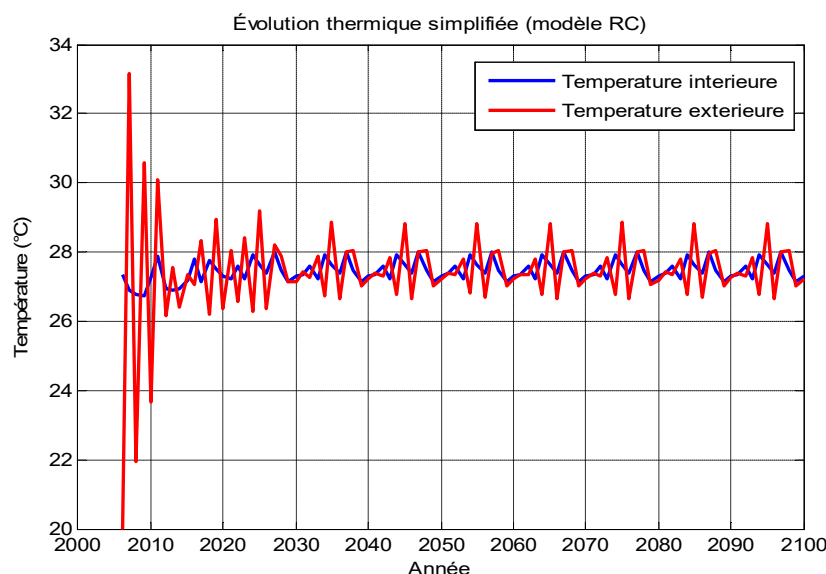


Figure 4 : Évolution comparée des températures extérieure et intérieure simulées (2006-2100) du modèle thermique de type Résistance-Capacité (RC)

#### IV. DISCUSSION

Sur la Figure 1, la simulation met en évidence la sensibilité de la performance thermique des parois face aux changements climatiques. En effet, même une élévation modérée de la température extérieure (de l'ordre de 0,5 à 0,7 °C) induit une augmentation significative du flux thermique traversant le mur. Cette intensification du transfert de chaleur se traduit par une plus forte sollicitation des systèmes de refroidissement ou une diminution du confort intérieur durant les périodes chaudes. L'analyse comparative entre les courbes de 2007 et 2100 montre une tendance à l'augmentation progressive de la charge thermique supportée par le bâtiment. Ce constat est cohérent avec les scénarios de réchauffement climatique projetés à l'horizon 2100 pour la région étudiée. Ces résultats soulignent la nécessité d'adapter les stratégies architecturales et constructives afin de limiter l'impact du réchauffement sur le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments.

Les résultats obtenus sur la Figure 2 mettent en évidence le rôle d'amortisseur thermique joué par le parpaing, grâce à son inertie thermique modérée. Ce matériau parvient à retarder la transmission de la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur, bien que sa conductivité thermique élevée ( $\lambda = 1,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ) favorise une propagation relativement rapide de l'onde thermique comparée à des matériaux plus isolants. Dans le contexte climatique chaud de la région de Boeny, ce comportement traduit une protection thermique temporaire : la paroi en parpaing limite la montée rapide de la température intérieure durant les premières heures d'exposition, mais elle n'assure pas un maintien prolongé du confort thermique en période chaude. La stabilisation du régime thermique après environ 20 heures montre que, même avec des conditions extérieures constantes, le mur finit par transmettre une part importante de la charge thermique vers l'intérieur. Ce phénomène confirme que le parpaing seul ne suffit pas à garantir un confort thermique satisfaisant sous un climat tropical sec ou chaud. Ces résultats soulignent donc la nécessité d'associer le parpaing à des solutions d'isolation

thermique, à une ventilation naturelle efficace, ou à des dispositifs de protection solaire (auvents, brise-soleil, végétalisation des façades). De telles stratégies permettraient d'améliorer la performance thermique globale du bâtiment et de limiter les surchauffes intérieures dues à l'augmentation des températures extérieures.

Dans la Figure 3, les résultats confirment le rôle de régulateur thermique joué par le mur en parpaing. Son inertie modérée permet d'atténuer les écarts journaliers de température et de retarder la pénétration de la chaleur à l'intérieur, deux effets particulièrement bénéfiques dans le climat chaud de la région de Boeny, où les variations diurnes peuvent être importantes. Le phénomène de déphasage observé, bien que limité, constitue un facteur clé de confort thermique : il décale le moment où la chaleur maximale atteint l'intérieur du bâtiment vers des heures plus fraîches, réduisant ainsi la surchauffe diurne. Toutefois, la température au centre du mur demeure influencée par la tendance extérieure, indiquant que la paroi finit par transmettre une partie de la charge thermique au fil du temps. Ainsi, si le parpaing contribue à améliorer la stabilité thermique, il ne garantit pas à lui seul un confort optimal en conditions extrêmes (canicules ou épisodes de chaleur prolongée). Il apparaît donc nécessaire de compléter ce type de paroi par des solutions d'isolation thermique, des protections solaires (auvents, brise-soleil) ou une ventilation naturelle efficace. Ces mesures renforceraient l'effet d'amortissement thermique et participeraient à une meilleure adaptation du bâtiment aux conditions climatiques futures.

Les résultats sur la Figure 4 mettent en évidence les limites de la performance thermique passive du bâtiment en parpaing dans le contexte climatique du Boeny. Bien que le matériau présente une inertie suffisante **pour** lisser les variations interannuelles, il ne parvient pas à maintenir durablement la température intérieure dans la plage de confort. Cette situation risque de s'aggraver à mesure que les températures extérieures augmentent avec le réchauffement global. La fréquence de dépassement du seuil de 28 °C traduit une vulnérabilité thermique croissante du bâti traditionnel en parpaing face aux conditions climatiques futures. Cela suggère que les solutions passives actuelles sont insuffisantes pour garantir le confort intérieur à long terme, en particulier lors des épisodes de chaleur prolongés. Pour renforcer la résilience thermique du bâtiment, plusieurs pistes d'adaptation architecturale peuvent être envisagées :

- l'optimisation de la ventilation naturelle pour favoriser le refroidissement nocturne ;
- l'ajout d'une isolation thermique adaptée, réduisant la conduction de chaleur ;
- l'intégration de protections solaires (casquettes, brise-soleil, végétation, plantations) limitant le rayonnement direct ;
- ou encore l'emploi de matériaux alternatifs présentant une meilleure performance thermo-physique face au climat futur.

En définitive, ces résultats soulignent la nécessité de repenser la conception architecturale dans une perspective d'adaptation au changement climatique. Le bâtiment en parpaing, dans sa configuration actuelle, demeure vulnérable aux hausses de température prévues à l'horizon 2100, confirmant l'urgence d'une approche constructive plus adaptée et durable pour la région de Boeny.

## V. CONCLUSION

Le présent travail a porté sur l'évaluation du comportement thermique d'un bâtiment en parpaing dans le contexte du changement climatique, à partir des projections issues du modèle climatique CanESM2 corrigé de biais appliquées à la région de Boeny. L'objectif principal était d'analyser la capacité de ce matériau, largement utilisé dans le bâti local, à maintenir un confort thermique intérieur satisfaisant face à l'élévation progressive des températures extérieures prévue au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Les simulations numériques réalisées selon plusieurs approches – stationnaire, transitoire 1D et 2D, ainsi que le modèle thermique simplifié R-C – ont permis d'appréhender les mécanismes de transfert thermique à travers les parois et d'évaluer l'impact de l'évolution du climat sur les conditions intérieures du bâtiment. Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs points majeurs. Le gradient thermique stationnaire à travers le mur présente une distribution linéaire caractéristique d'un transfert par conduction dans un matériau homogène, confirmant la validité du modèle simplifié. Les simulations transitoires montrent une pénétration progressive de la chaleur depuis la face extérieure et révèlent le rôle d'inertie thermique du parpaing, qui ralentit la propagation du flux thermique vers l'intérieur. L'évolution temporelle des températures extérieures et internes souligne un effet d'amortissement

et un déphasage thermique significatif, traduisant la capacité du matériau à limiter les variations rapides de température. Sur la période 2006–2100, la température intérieure moyenne simulée suit globalement la tendance du réchauffement climatique, avec un dépassement du seuil de confort de 28 °C dans environ 24 % des années, révélant une vulnérabilité thermique notable du parpaing face aux conditions futures. Ces observations confirment l'hypothèse initiale : le parpaing présente une inertie thermique suffisante pour atténuer les fluctuations climatiques à court terme, mais insuffisante pour maintenir un confort intérieur durable sous l'effet du réchauffement climatique. Cette limite met en lumière la nécessité d'une évolution des pratiques constructives dans la région de Boeny. Pour répondre à ces enjeux, plusieurs stratégies d'adaptation architecturale sont à envisager :

- renforcer l'isolation thermique des parois pour réduire la conduction de chaleur ;
- améliorer la ventilation naturelle afin de favoriser le rafraîchissement nocturne ;
- intégrer des protections solaires (brise-soleil, casquettes, plantations) pour limiter le rayonnement direct
- promouvoir l'usage de matériaux locaux alternatifs à plus forte performance thermo-physique.

L'ensemble de ces mesures permettrait de renforcer la capacité d'adaptation du bâti face aux conditions climatiques futures, tout en préservant la durabilité et le confort thermique des habitations.

En perspective, il serait pertinent d'étendre cette étude à d'autres typologies de matériaux et configurations architecturales (murs composites, toitures ventilées, enduits réfléchissants) et d'y intégrer des données climatiques horaires pour mieux représenter les variations diurnes. Une approche couplée entre simulation énergétique du bâtiment et scénarios climatiques régionaux offrirait une vision plus fine des impacts du réchauffement sur les performances thermiques du bâti dans la région de Boeny.

## REFERENCES

- [1] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., & Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6<sup>e</sup> éd.). John Wiley & Sons.
- [2] Clarke, J.A. (2001). *Energy Simulation in Building Design*. Butterworth-Heinemann.
- [3] Heiselberg, P. (Ed.). (2002). *Principles of Hybrid Ventilation*. IEA Annex 35, Aalborg University.
- [4] Carslaw, H.S., & Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press.