

# Évaluation expérimentale de l'atténuation et du déphasage thermique d'une paroi en terre crue sous divers climats : analyse comparative de plusieurs méthodes

**Yassine Elias BELARBI**

*Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F- 44600 Saint-Nazaire, France*

**RESUME** Dans le contexte actuel de transition énergétique et environnementale, les matériaux géosourcés et biosourcés suscitent un intérêt grandissant. La bauge, mode constructif composée de terre crue et de fibres végétales, illustre bien cette tendance et se distingue par ses qualités thermiques et écologiques. Toutefois, l'évaluation rigoureuse de son comportement en régime variable soulève encore plusieurs interrogations, en particulier lorsqu'il s'agit de déterminer les propriétés dynamiques comme le déphasage et l'atténuation du signal thermique (température). Dans cette étude, un mur en bauge a été soumis à des conditions climatiques contrôlées au sein d'une enceinte bi-climatique. Les températures ont été enregistrées à différentes profondeurs, puis analysées à l'aide d'une méthode expérimentale reposant sur la décomposition en série de Fourier – méthode qui avait été validée au préalable. Les résultats ainsi obtenus ont été comparés à ceux d'une approche analytique conforme à la norme NF EN ISO 13786. Les divergences observées entre ces deux méthodes mettent en évidence l'importance de certains facteurs, dont le couplage HAM, ainsi que les variations de teneur en eau qui peuvent influencer sur les propriétés thermiques réelles de la bauge. Ces constats invitent à une certaine prudence face aux données parfois diffusées par certains fournisseurs de matériaux, et soulignent la nécessité d'intégrer de manière précise la dynamique hygrothermique dans l'évaluation des matériaux géosourcés et biosourcés. Ainsi il a pu être montré la norme NF EN ISO 13786 surestime le déphasage thermique, avec 4,64 heures pour la norme contre 1,08–1,12 heures pour la décomposition en série de Fourier à 2,5 cm de profondeur, L'atténuation présente aussi également des écarts selon la méthode de détermination, avec 0,86 pour la norme contre 0,60–0,63 pour la décomposition en séries de Fourier à 2,5 cm de profondeur.

**Mots-clés** Terre crue, propriétés hygrothermiques, propriétés dynamiques, chambre bi-climatique, déphasage, atténuation

## Nomenclature

A	Amplitude	[-]	$\varphi$	Humidité Relative	[%]
$a_0, a_n$ et $b_n$	Coefficients de Fourier	[°C]	$\lambda$	Conductivité Thermique	[W/m.K]
e	Épaisseur de la couche du mur	[m]	$\sigma$	Ecart-Type	[-]
f	Atténuation	[-]	$\tau$	Déphasage	[h]
M	Valeur Moyenne	[-]	$\varepsilon$	Erreur relative	[-]
$P_v$	Pression de vapeur	[Pa]	$\omega_n$	Pulsation	[rad/s]
$P_{vsat}$	Pression de vapeur saturante	[Pa]			
$\mu$	Facteur de résistance e à la diffusion de vapeur d'eau	[-]			

$R_s$	Résistance thermique des couche d'air	[m <sup>2</sup> K/W]	<b>Indice</b>	
$T$	Temperature	[°C]	$i$	Intérieur
$t$	Temps	[s]	$e$	extérieur
$w$	Teneur en eau	[kg/kg]	$s$	Surface
$Y_{12}$	Transmission thermique périodique	[W/m <sup>2</sup> K]	$t$	Thermique
$Z$	Matrice de transfert		$w$	Hydrique
$\Phi$	Déphasage	[h]	$n$	harmonique $n$

## I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment reste à ce jour un grand consommateur de ressources naturelles et d'énergie, représentant environ 37 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (United Nations Environment Programme, 2024). Des initiatives internationales, comme les engagements renforcés discutés lors de la COP28 (United Nations, 2023), visent à limiter ces émissions en réduisant notamment l'empreinte carbone liée à la production et à l'utilisation des matériaux (ciment, acier, aluminium, etc.). Sur le plan opérationnel, les efforts de décarbonation portent de plus en plus sur l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments, avec une attention particulière aux déperditions thermiques par les parois, qui peuvent représenter de 15 % à 40 % des pertes (United Nations, 2023). À cet égard, la France a lancé l'initiative « Building Breakthrough » durant la COP28 (Environment, 2023), afin de tendre vers des bâtiments zéro émission d'ici 2030. De nombreuses études ont déjà exploré le comportement thermique des parois, en particulier des parois multicouches, en évaluant des indicateurs dynamiques tels que le déphasage et l'atténuation (Jin et al., 2012; Larsen et al., 2009). Plus récemment, la littérature s'est également focalisée sur les parois intégrant des produits isolants multicouches (Mavromatidis et al., 2012), ou encore sur les variations de paramètres thermophysiques (capacité thermique, masse surfacique, résistance thermique) influençant la performance globale du bâtiment. L'intérêt pour les matériaux géosourcés et biosourcés, comme le béton de chanvre ou la terre crue, traduit une volonté de limiter l'impact carbone du bâtiment tout en améliorant son efficacité énergétique. Les propriétés thermiques dynamiques telles que le déphasage et l'atténuation sont importantes pour évaluer le comportement dynamique des murs des bâtiments. Ces caractéristiques déterminent la capacité d'un matériau à réguler le transfert de chaleur en réponse aux fluctuations de la température extérieure, exerçant ainsi une influence sur le confort thermique intérieur et l'efficacité énergétique des bâtiments. Ces propriétés peuvent être définies comme suit :

- le déphasage correspond au décalage temporel des fluctuations des températures et de densité de flux thermique observables de part et d'autre d'une paroi sollicitée par un signal purement sinusoïdal
- L'atténuation thermique se réfère à la réduction de l'amplitude des variations de température à travers un matériau. Il correspond au rapport entre les amplitudes des températures intérieure et extérieure pour une période donnée.

Les fiches techniques des fabricants de matériaux biosourcés et/ou géosourcés mettent souvent en avant des valeurs de propriétés thermiques dynamiques prometteuses (déphasage, atténuation...) obtenues via la norme NF EN ISO 13786 ("AFNOR," 2017). Toutefois ces dernières peuvent différer

des mesures *in situ* ou des résultats de simulation selon les valeurs des propriétés utilisées pour les calculer.

Dans ce contexte, notre étude porte sur un mur en bauge (terre crue + paille) soumis à des sollicitations thermo-hygro-métriques dans une enceinte bi-climatique contrôlée. Nous nous sommes tout particulièrement intéressés à quantifier le déphasage et le facteur d'atténuation. Pour ce faire, deux approches de calcul sont comparées :

- la méthode analytique issue de la norme NF EN ISO 13786 ("NF EN ISO 13786," 2017),
- une méthode de décomposition en série de Fourier appliquée aux températures mesurées expérimentalement.

L'objectif est de souligner les éventuelles divergences entre ces méthodes et de mettre en relief l'importance d'une caractérisation dynamique adaptée aux matériaux terre ainsi que dans une plus vaste mesure aux matériaux biosourcés et géosourcés. La littérature fait état de méthodes expérimentales (souvent méthode d'Asan et Sancaktar.) appliquées à des profils de température issus de simulations pour déterminer les propriétés dynamiques (Asadi et al., 2023; Asan et Sancaktar, 1998; Fathipour and Hadidi, 2017; Quagraine et al., 2020). Cette étude présente comme originalité l'usage d'une méthode expérimentale directement sur des profils de température mesurés, permettant une confrontation avec la méthode analytique de la norme NF EN ISO 13786. Les résultats obtenus permettront de mieux appréhender le potentiel de la bauge pour la construction mais aussi les méthodes de caractérisations des propriétés thermiques dynamiques qui traduisent en partie le confort intérieur.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériaux

Dans cette étude, un mur en bauge (terre crue et fibres de paille) de 10 cm d'épaisseur a été élaboré et testé en conditions contrôlées. La terre provient du quartier éco-responsable de Guérande, près de Saint Nazaire (France), et a déjà fait l'objet de recherches antérieures (Ji et al., 2023; Tchiotsop et al., 2022).

Les propriétés thermiques et hydriques de la bauge ont été caractérisées lors d'une campagne antérieure et sont présentées dans le Tableau 1 (Belarbi et al., 2022). Les mesures montrent notamment une conductivité thermique de 0,18 W/(m.K) pour un matériau sec, une capacité calorifique de 870 J/(kg.K) à 23 °C et une valeur de tampon hydrique (MBV) de 1,4 g/(m<sup>2</sup>.%HR). Plus de détails sur les dispositifs de mesures et la formulation du composite terre/paille sont donnés dans le travail de (Belarbi et al., 2022)

**TABLEAU 1.** Propriétés de la formulation de bauge (terre+paille) (Belarbi et al., 2022)

Propriété	Unités	Valeurs	
Densité	[kg/m <sup>3</sup> ]	1654	
Conductivité thermique sèche à 23°C	[W/(m·K)]	0,18	Lambda Meter e500 (Plaque chaude gardée)

Chaleur spécifique sèche à 23°C	[J/(kg K)]	870	Calorimètre Calvet
Perméabilité à la vapeur d'eau $\delta_p$	[ $10^{-11}$ kg/(m.s.Pa)]	1,08	Gravitest
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	[-]	17,6	Gravitest
MBV	[g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	1.4	Enceinte climatique



**FIGURE 1.** Image du mur en bauge entre les 2 enceintes climatiques

### B. Procédure expérimentale

Afin d'étudier la réponse hygrothermique de ce mur, deux chambres climatiques bi-ambiance (Figure 1) ont été utilisées. Elles permettent de simuler, d'un côté, un climat extérieur variable (température et humidité imposées) et, de l'autre, un espace intérieur maintenu à 25 °C et 50 % d'humidité relative.

Des capteurs de température et d'humidité relative (FHA 646 R), positionnés en diagonale, enregistrent les évolutions temporelles de température et d'humidité relative : en surface à 2,5, 5 et 7,5 cm de profondeur de la paroi ainsi que dans chaque ambiance. Leur précision varie entre  $\pm 0,2$  K et  $\pm 0,6$  K pour la température, et  $\pm 2$  % pour l'humidité relative. Les données sont recueillies par des modules d'acquisition Almemo®.

Trois climats ont été simulés sur des cycles journaliers de 24 h durant 5 jours, après 2 jours de stabilisation thermique : un climat tropical (Douala, Cameroun) avec des températures allant de 25 à 33°C et des humidités relatives allant de 45 à 88%, un climat désertique (Riyad, Arabie Saoudite) avec des températures allant de 35 à 42°C et des humidités relatives comprises entre 8 et 15% et enfin un climat océanique (Nantes, France) avec des températures allant de 13 à 21°C et des humidités relatives comprises entre 32 et 72%. L'objectif est d'évaluer l'influence des conditions climatiques extérieures sur le déphasage et l'atténuation thermique, tout en soulignant

l'importance de l'humidité relative. En effet, la norme NF EN ISO 13786 ne prend pas en compte le transfert de vapeur d'eau à travers la paroi.

Les analyses menées à partir de ces données expérimentales permettront de comparer, sur une période de 24 h, les propriétés thermiques dynamiques du mur en bauge et d'évaluer les différences entre la méthode de la norme (analytique) avec une méthode basée sur les résultats expérimentaux.

### III. DETERMINATION DU DEPHASAGE ET DE L'ATTENUATION

Dans cette partie, les 2 méthodes de détermination du déphasage et de l'atténuation thermique sont présentées plus en détails.

#### A. Méthode de la norme NF EN ISO 13786

La norme NF EN ISO 13786 s'appuie sur la méthode proposée par Carslaw et Jaeger 1959 et suppose des conditions aux limites sinusoïdales. Elle ne prend pas en compte le transfert d'humidité ni l'évolution des propriétés hygrothermiques du matériau lié à la teneur en eau.

La matrice  $Z$  décrit le comportement d'une couche de matériau homogène. Pour une paroi multicouche, la matrice de transfert globale  $Z_{total}$  résulte du produit matriciel des matrices de transfert de chacune des couches ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ ) ainsi que des matrices de transfert pour les échanges en surfaces intérieure ( $Z_{si}$ ) et extérieure ( $Z_{se}$ ) (Eq. (1)). En particulier,  $Z_s$  dépend de la résistance thermique  $R_s$  de la couche d'air, qui inclut la convection et le rayonnement. Les termes  $R_{si}$  et  $R_{se}$  peuvent être calculés ou pris directement dans la norme NF EN ISO 6946.

$$Z_{total} = Z_{se}Z_nZ_{n-1} \dots Z_1Z_{si} \text{ avec } Z_s = \begin{bmatrix} 1 & -R_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

L'**atténuation thermique**  $f_T$  est définie comme le rapport entre la transmittance périodique ( $Y_{12}$ ) et la transmittance thermique globale ( $U_{total}$ ) (Eq. (2)). Le **déphasage**  $\Phi_T$  (Eq. (3)) est calculé sur la base de la variation d'amplitude de la température entre l'intérieur et l'extérieur sur 24 h permettant ainsi d'apprécier les fluctuations quotidiennes (alternance jour/nuit). Ces deux propriétés dynamiques dépendent aussi de la période des fluctuations qui impactera les valeurs obtenues.

Il est possible de déterminer ces deux grandeurs pour une période donnée ( $T$ ) des fluctuations sinusoïdales.

$$f_T = \frac{|Y_{12}|}{U_{total}} \text{ où } Y_{12} = -\frac{1}{Z_{12}} \text{ et } \frac{1}{U_{total}} = R_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se} \quad (2)$$

$$\Phi_T = \frac{T}{2\pi} \arg Z_{12} \quad (3)$$

Les caractéristiques thermiques ainsi obtenues sont indépendantes du climat : la matrice de transfert ne dépend que des propriétés physiques des couches constitutives de la paroi et de la période considérée. Elle ne dépend ni de la valeur absolue de la température ni de l'amplitude de ses variations.

### B. Décomposition en séries de Fourier

L'emploi de la décomposition en séries de Fourier pour déterminer le déphasage et l'atténuation est moins fréquemment évoqué dans la littérature, bien que certaines études la mentionnent (Mazzeo et al., 2016). Selon la théorie de Fourier, tout signal périodique  $X(t)$  peut se décomposer en une somme unique de fonctions sinusoidales (Eq. (4)), chacune caractérisée par une amplitude, un déphasage et une pulsation liée à la fréquence de la composante harmonique  $n$ .

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cos[\omega_n(t - \tau_n)] \quad (4)$$

$$\text{Où } a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} X(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} X(t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} X(t) \sin(\omega_n t) dt \quad \omega_n = \frac{2\pi n}{T}$$

$$\text{Et } \cos \tau_n = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad \sin \tau_n = \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}$$

Si l'on impose une excitation périodique de la température dans une des ambiances dans laquelle la paroi est comprise, les températures mesurées à la surface extérieure et à la surface intérieure restent périodiques de même période. Le calcul par séries de Fourier (appliqué séparément aux deux signaux) permet d'identifier, pour chaque harmonique, l'amplitude  $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  et le déphasage  $\tau_n$ . La différence de déphasage entre deux signaux (extérieur/intérieur) pour la même harmonique  $n$  fournit le déphasage thermique  $\Phi_T$ . L'atténuation  $f_T$  s'obtient en prenant le rapport des amplitudes pour la même harmonique.

Nous avons voulu vérifier la fiabilité de la méthode de Fourier pour estimer le déphasage et l'atténuation d'un mur en terre crue de 20 cm d'épaisseur. Nous avons réalisé une étude indépendante de celle réalisée pour la bauge. En effet, nous avons modélisé par différences finies, une paroi qui a été soumise à trois excitations sinusoidales de 24 h, 6 h et 1 h. La température intérieure reste fixée à 20 °C, tandis que la température extérieure suit l'Équation 4. Les échanges convectif-radiatifs sont décrits par ( $h_i = 7,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  et  $h_e = 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ), appliqués avec la méthode des nœuds fictifs ("Frontmatter," 2012).

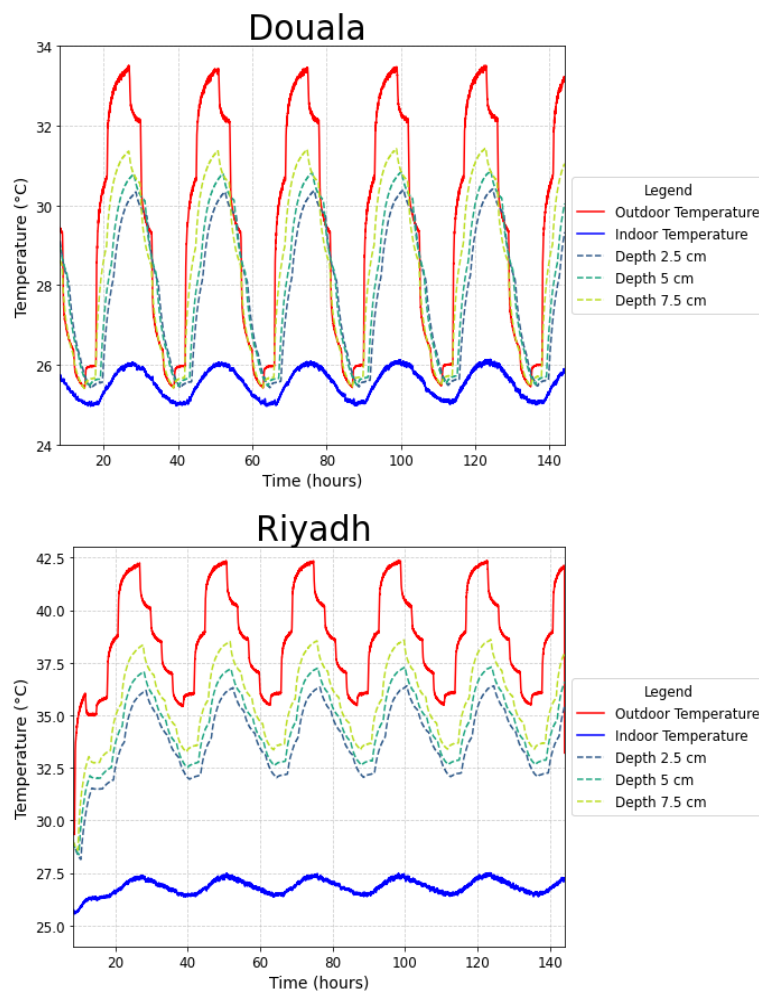
$$T(x; t) = 10 + 5 \sin\left(\frac{2\pi t}{24 \times 3600}\right) + \sin\left(\frac{2\pi t}{6 \times 3600}\right) + 0.2 \sin\left(\frac{2\pi t}{1 \times 3600}\right) \quad (5)$$

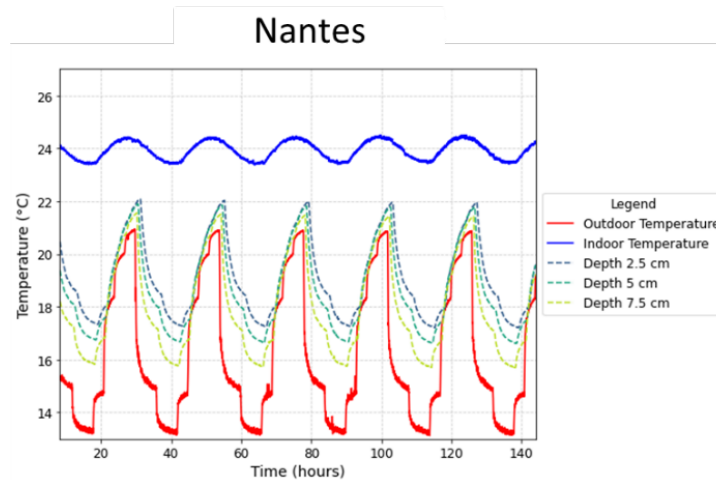
La méthode de Fourier a ensuite été mise en œuvre sur les températures calculées. Pour simuler des incertitudes de mesure, une erreur absolue ( $\epsilon$ ) comprise entre 0 °C et 2 °C a été ajoutée de manière aléatoire à la température. Mille tests ont été générés pour chaque niveau d'incertitude, offrant un échantillon statistique des valeurs obtenues pour le déphasage l'atténuation. Cette étude, disponible dans le manuscrit de thèse détaille cette partie confirmant la robustesse de la méthode de Fourier pour des mesures dont l'incertitude demeure inférieure à 1 °C.

## IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### A. Résultats

L'évolution temporelle des températures ont été obtenus pour les 3 climats étudiés (Figure 3). Ainsi nous avons pu constater que, dans le cas de Riyad, avec un climat désertique et des températures extrêmes, la chaleur pénètre davantage dans la paroi. Pour les trois profondeurs, on observe des températures maximales atteignant entre 36 °C et 38°C, Pour Douala, la température dans paroi atteint des valeurs maximales autour de 30-31°C. Enfin, sous le climat océanique de Nantes (14 °C à 22 °C à l'extérieur), la paroi maintient des températures proches de l'intérieur (23 °C à 26 °C), durant la journée mais des valeurs minimales variant entre 16 et 18°C sont constatés pour les trois profondeurs

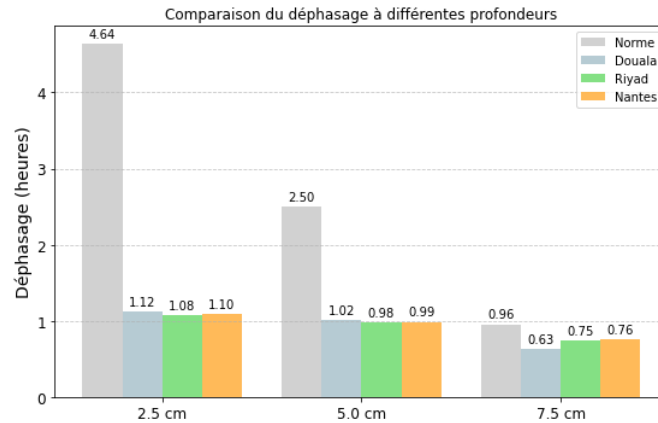




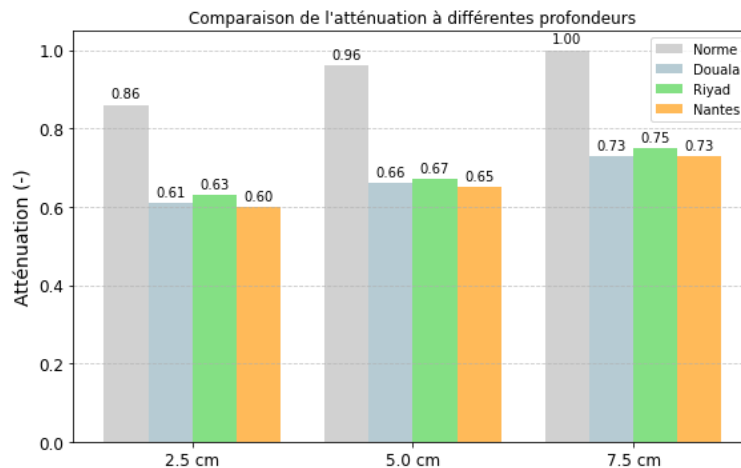
**FIGURE 3.** Réponse thermique de la paroi en bauge pour les sollicitations climatiques de Douala, Riyad et Nantes.

Les résultats obtenus via la norme NF EN ISO 13786 (Figure 4 et Figure 5), indique un déphasage d'environ **6,5 heures** et une atténuation de l'ordre de **0,71** pour toute la paroi de **10 cm**. Lorsque l'on décompose le mur en sous-couches, on constate que ces valeurs évoluent en fonction de la profondeur. Ainsi, à **2,5 cm** depuis la face intérieure, le déphasage atteint **4,64 heures** et l'atténuation s'élève à **0,86** ; à **5 cm**, on observe **2,5 heures** et **0,96** ; enfin, à **7,5 cm**, le déphasage descend à **0,96 heure**, tandis que l'atténuation atteint **1**. Cette progression traduit la simplification retenue par la norme : elle considère des propriétés thermiques fixes sans prise en compte de l'impact de l'évolution de la teneur en eau sur les propriétés hygrothermiques ni le couplage thermique et hydrique.

Les calculs montrent (Figure 4 et Figure 5), à **2,5 cm**, des déphasages compris entre **1,08 h** et **1,12 h** selon le climat, et une atténuation variant entre **0,60** et **0,63**. À **5 cm**, le déphasage s'établit autour de **0,98 h** à **1,02 h**, avec une atténuation avoisinant **0,65** à **0,67**. Enfin, pour la profondeur la plus proche de la face extérieure (**7,5 cm**), les valeurs de déphasage descendent à **0,63 h–0,76 h**, tandis que l'atténuation s'élève entre **0,73** et **0,75**. Par comparaison avec les résultats issus de la norme, le déphasage y est fortement surestimé (parfois d'un facteur quatre), et l'atténuation est souvent en décalage avec l'expérimentation. Cette différence peut être possiblement due à l'absence de prise en compte des transferts d'humidité dans le modèle analytique, alors même que la terre crue est un matériau hygroscopique dont la conductivité et la capacité thermique évoluent selon la teneur en eau (Belarbi et al., 2024). En pratique, la méthode de Fourier rend mieux compte de ces variations, fournissant des valeurs plus basses pour le déphasage et un facteur d'atténuation plus fidèle à la réalité de la paroi. Sur le plan climatique, les tests effectués montrent que la bauge présente des performances relativement similaires dans les trois environnements étudiés, malgré des amplitudes thermiques et des taux d'humidité différents. On observe certes quelques écarts mineurs (par exemple un déphasage légèrement plus élevé à Douala, potentiellement lié à l'humidité accrue), mais ces variations entre climats restent bien en deçà de l'écart constaté avec la norme. L'ensemble de ces observations démontre l'importance d'intégrer une approche expérimentale, ou à minima un modèle numériquement couplé de chaleur-humidité, pour caractériser correctement les propriétés dynamiques d'un mur en bauge



**FIGURE 4.** Valeurs de déphasage obtenues avec la méthode de la norme et pour les trois climats avec la décomposition en séries de Fourier



**FIGURE 5.** Valeurs d'atténuation obtenues avec la méthode de la norme et pour les trois climats avec la décomposition en séries de Fourier

### B. Discussions

Cette étude explore la mise en œuvre de différentes méthodes pour déterminer les paramètres dynamiques (déphasage et atténuation) d'une paroi soumise à des fluctuations périodiques de température et de pression de vapeur dans trois climats distincts. Le Tableau 2 récapitule les atouts et limites de chaque approche : la méthode analytique de la norme NF EN ISO 13786, et la méthode de décomposition en séries de Fourier.

En ce qui concerne l'atténuation, la méthode analytique de la norme ne permet pas une estimation satisfaisante dès lors que les transferts d'humidité deviennent déterminants. Les valeurs obtenues diffèrent notablement de celle obtenue avec l'autre méthode, basée sur des mesures réelles. L'impact du transfert de masse sur les échanges thermiques est ainsi pris en compte par la méthode basée sur les résultats expérimentaux de la décomposition de Fourier, expliquant leur plus grande fiabilité.

En ce qui concerne le déphasage, les résultats calculés selon la norme NF EN ISO 13786 s'avèrent, nettement supérieurs à ceux issus des méthodes expérimentales, pouvant aller de deux à quatre fois plus élevés à 2,5 cm et 5 cm de profondeur. Le constat est plus nuancé à 7,5 cm de profondeur. Les valeurs de déphasage calculées par la décomposition en série de Fourier montrent, en revanche, une bonne concordance pour les trois climats, soulignant les limites de l'approche normative dès lors que les interactions hygrothermiques ne sont pas prises en considération.

**TABLEAU 2. Bilan des avantages et inconvénients des méthodes étudiées**

Méthode	Avantages	Inconvénients
Norme NF EN ISO 13786	Analytique	Ignore le couplage HAM Surestime le déphasage Sensible aux incertitudes liées à la mesure des propriétés thermiques Ne considère pas l'évolution des propriétés en fonction de la teneur en eau
Décomposition en séries de Fourier	Analyse de Fréquence Calcul automatique Robuste Expérimental Pas d'influence de l'incertitude de la mesure des propriétés comme dans le cas de la norme Considère les propriétés en fonction de l'évolution de la teneur en eau	Calcul sur un intervalle de temps

## V. CONCLUSIONS

Cette étude a permis d'examiner les différences entre la méthode analytique issue de la norme NF EN ISO 13786 et l'approche expérimentale basée sur la décomposition en séries de Fourier pour l'évaluation des propriétés thermiques dynamiques d'une paroi en bauge soumise à des sollicitations climatiques variées. Les résultats obtenus suggèrent que les valeurs obtenues via la norme offrent des valeurs de déphasage thermique plus importantes, notamment aux faibles profondeurs (proche de l'ambiance intérieure), et ne reflète pas toujours les valeurs du facteur d'atténuation observées expérimentalement. Cette divergence pourrait être liée à l'absence de prise en compte des transferts d'humidité et des variations des propriétés hygrothermiques du matériau en fonction de sa teneur en eau.

La décomposition aux séries de Fourier, appliquée aux mesures de la cinétique de températures expérimentales à différentes profondeurs, semble mieux représenter le comportement thermique du mur dans des conditions réelles. En effet des valeurs similaires de déphasage et d'atténuation ont été obtenues via une autre méthode expérimentale. Toutefois, la robustesse de cette méthode reste conditionnée à la précision des données expérimentales et à la stabilité des mesures sur la durée des essais.

Les résultats obtenus montrent également que les performances thermiques dynamiques du mur en bauge peuvent varier légèrement selon le climat étudié. Dans le cas du climat tropical de Douala, le déphasage légèrement plus élevé pourrait traduire une interaction entre l'humidité ambiante et les propriétés thermiques du matériau. À l'inverse, l'atténuation légèrement supérieure observée sous climat désertique pourrait s'expliquer par les amplitudes thermiques marquées entre le jour et la nuit. Ces observations suggèrent que l'évaluation des performances thermiques dynamiques de la bauge, et plus largement des matériaux hygroscopiques, gagnerait à intégrer explicitement les interactions entre chaleur et humidité.

En conclusion, si la norme NF EN ISO 13786 fournit un cadre analytique accessible pour l'évaluation des propriétés thermiques dynamiques, son application aux matériaux hygroscopiques comme la bauge pourrait nécessiter des ajustements ou certaines vigilances vis-à-vis des propriétés utilisées. L'utilisation de méthodes complémentaires, telles que la décomposition en séries de Fourier, pourrait ainsi offrir une meilleure compréhension des performances réelles de ces matériaux dans des conditions de fonctionnement variées.

## REFERENCES

- Asadi, I., Hashemi, M., Sajadi, B., Mahyuddin, N.B., Baghban, M.H., Esfandiari, M., Maghfouri, M., Yan, K., 2023. Evaluating the time lag and decrement factor of mortar and concrete containing OPBC as an agricultural by-product lightweight aggregate. *Case Studies in Thermal Engineering* 41, 102609. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102609>
- Asan, H., Sancaktar, Y.S., 1998. Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings* 28, 159–166. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00007-3)
- Belarbi, Y.E., Ferroukhi, M.Y., Issaadi, N., Poullain, P., Bonnet, S., 2024. Assessment of hygrothermal performance of raw earth envelope at overall building scale. *Energy and Buildings* 310, 114119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114119>
- Belarbi, Y.E., Sawadogo, M., Poullain, P., Issaadi, N., Hamami, A.E.A., Bonnet, S., Belarbi, R., 2022. Experimental Characterization of Raw Earth Properties for Modeling Their Hygrothermal Behavior. *Buildings* 12, 648. <https://doi.org/10.3390/buildings12050648>
- Carslaw, H. S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solids*, second edition. ed. Oxford University Press.
- Environment, U.N., 2023. *Building Materials And The Climate: Constructing A New Future* [WWW Document]. UNEP - UN Environment Programme. URL <http://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future> (accessed 12.7.23).
- Fathipour, R., Hadidi, A., 2017. Analytical solution for the study of time lag and decrement factor for building walls in climate of Iran. *Energy* 134, 167–180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.009>
- Frontmatter, 2012. , in: *Heat Conduction*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. i–xxx. <https://doi.org/10.1002/9781118411285.fmatter>
- Ji, Y., Poullain, P., Leklou, N., 2023. The selection and design of earthen materials for 3D printing. *Construction and Building Materials* 404, 133114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133114>
- Jin, X., Zhang, X., Cao, Y., Wang, G., 2012. Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor. *Energy and Buildings* 47, 369–374. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.010>
- Larsen, S.F., Filippin, C., Lesino, G., 2009. Thermal behavior of building walls in summer: Comparison of available analytical methods and experimental results for a case study. *Build. Simul.* 2, 3–18. <https://doi.org/10.1007/S12273-009-9103-6>
- Mavromatidis, L.E., EL Mankibi, M., Michel, P., Santamouris, M., 2012. Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones. *Applied Energy* 92, 480–491. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.007>
- Mazzeo, D., Oliveti, G., Arcuri, N., 2016. Influence of internal and external boundary conditions on the decrement factor and time lag heat flux of building walls in steady periodic regime. *Applied Energy* 164, 509–531. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.076>
- NF EN ISO 13786 [WWW Document], 2017. . Afnor EDITIONS. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iso-13786/performance-thermique-des-composants-de-batiment-caracteristiques-thermique/fa188135/80286> (accessed 1.23.25).

- Quagraine, K.A., Ramde, E.W., Fiagbe, Y.A.K., Quansah, D.A., 2020. Evaluation of time lag and decrement factor of walls in a hot humid tropical climate. *Thermal Science and Engineering Progress* 20, 100758. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100758>
- Tchiotsop, J., Issaadi, N., Poullain, P., Bonnet, S., Belarbi, R., 2022. Assessment of the natural variability of cob buildings hygric and thermal properties at material scale: Influence of plants add-ons. *Construction and Building Materials* 342, 127922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127922>
- United Nations, C.C., 2023. United Nations Climate Change COP 28 [WWW Document]. URL <https://unfccc.int/fr/news/l-accord-de-la-cop28-marque-le-debut-de-la-fin-de-l-ere-des-combustibles-fossiles> (accessed 7.3.24).
- United Nations Environment Programme, 2024. 2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené dans le cadre d'une thèse de doctorat intitulée « *Etude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique et de la performance énergétique des bâtiments en terre crue sous différents climats* » qui a été soutenue le 9 décembre 2024 au GeM et qui a été financée par l'ADEME et la région Pays de la Loire.