

Analyse du comportement énergétique de divers matériaux de construction biosourcés à l'échelle du bâtiment

Amer Bakkour¹, Salah-Eddine Ouldboukhitine¹, Pascal Biwole², Sofiane Amziane¹

¹ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

² California State Polytechnic University, Humboldt, School of Engineering, Arcata, CA 95521, USA

RESUME Les matériaux biosourcés sont de plus en plus utilisés dans le bâtiment pour leurs propriétés isolantes et leur faible impact environnemental. Néanmoins, leur faible inertie thermique soulève des questions quant à leur performance énergétique globale, notamment dans des contextes climatiques variés. Cet article propose une comparaison à l'échelle du bâtiment de trois parois biosourcées — béton de chanvre, béton de bois et bottes de paille — simulées sous deux climats contrastés : chaud-aride (Doha, Qatar) et océanique (Vichy, France). Deux scénarios ont été évalués : (i) murs à valeur U équivalente pour isoler l'effet de l'inertie thermique, et (ii) augmentation de l'épaisseur pour refléter les pratiques constructives réelles. Les résultats montrent que, bien que très isolants, les matériaux biosourcés présentent des besoins supérieurs à ceux des bâtiments en béton C12/15 isolé, en raison de leur faible inertie thermique. L'augmentation de l'épaisseur améliore les performances en chauffage mais accroît les charges de refroidissement, notamment à Vichy. L'augmentation des besoins en climatisation s'explique par la faible conductivité et la capacité des matériaux biosourcés à piéger la chaleur intérieure. Parmi les matériaux étudiés, la paille montre les meilleures performances en isolation hivernale, tandis que le béton de bois, plus dense, modère mieux les surchauffes estivales. L'étude souligne l'importance d'un dimensionnement adapté au climat, intégrant des stratégies passives pour optimiser l'équilibre entre inertie et isolation dans les bâtiments biosourcés.

Mots-clefs Matériaux biosourcés ; Inertie thermique ; Efficacité énergétique ; Construction durable

I. INTRODUCTION

La consommation mondiale d'énergie a connu une accélération notable, atteignant 2,2 % en 2023, bien au-delà du taux moyen annuel de 1,5 % observé entre 2010 et 2019 (World Energy Consumption Statistics, 2024). Près d'un tiers de cette énergie, environ 34 %, est destinée à assurer le confort thermique, selon le Programme des Nations Unies pour l'environnement (United Nations Environment Programme, 2024). Dans ce cadre, le secteur du bâtiment apparaît comme un acteur majeur de la consommation énergétique et des émissions polluantes. Pour répondre à ces enjeux, des initiatives importantes sont mises en œuvre afin de réduire les besoins énergétiques des constructions, d'améliorer la qualité de l'air intérieur et de limiter leur impact environnemental.

Les solutions qui intègrent des concepts inspirés de la nature dans la conception urbaine, jouent un rôle central dans ces avancées. Parmi les approches clés figurent les toitures végétalisées (Ouldboukhitine et al., 2024), qui offrent une isolation naturelle et réduisent l'effet d'îlot de chaleur urbain ; les systèmes de végétalisation verticale, comme les murs végétaux (Ouldboukhitine et al., 2025), qui améliorent la régulation thermique et l'esthétique ; et les matériaux de construction biosourcés, reconnus pour leur faible énergie grise, leurs excellentes propriétés isolantes et leur bonne capacité à réguler l'humidité (Bakkour et al., 2024).

Par ailleurs, les matériaux biosourcés se distinguent par leurs avantages écologiques, notamment leur caractère renouvelable, recyclable et biodégradable, ce qui en fait des éléments essentiels pour des pratiques constructives durables. Selon leur composition, ils peuvent être employés en tant que panneaux isolants ou incorporés dans des bétons composites. De nouveaux matériaux hybrides combinant fibres et granulats végétaux ont émergé dans le domaine, comme le béton de chanvre (Bardouh et al., 2024), la paille (Tlaji et al., 2022), ou le béton de bois (Bakkour et al., 2023).

Cependant, à l'échelle du bâtiment, de nombreuses études comparatives dans ce domaine restent limitées, se concentrant souvent sur la comparaison de bâtiments biosourcés avec des systèmes conventionnels présentant une même épaisseur équivalente de murs extérieurs. Ces approches négligent le double rôle de l'isolation thermique et de l'inertie thermique — des facteurs particulièrement importants dans les climats présentant une forte variabilité quotidienne ou saisonnière. De plus, les comparaisons croisées entre différents types de murs biosourcés à l'échelle du bâtiment complet et à travers divers climats demeurent encore rares.

Pour répondre à ces besoins, cette étude réalise une évaluation approfondie des performances énergétiques de trois systèmes de murs biosourcés — béton de chanvre, béton de bois et botte de paille — à l'échelle du bâtiment. Deux scénarios de simulation sont analysés. Le premier compare ces bâtiments biosourcés à une structure en béton conventionnel isolée, en maintenant une valeur de transmission thermique (U) identique pour tous les éléments de l'enveloppe (murs, toiture, plancher), afin d'isoler l'effet de l'inertie thermique sur la demande énergétique. Le second scénario étudie l'impact de la variation de l'épaisseur des murs biosourcés sur la performance globale. Ces simulations couvrent deux climats distincts : chaud-aride (Doha, Qatar) et océanique (Vichy, France). Cette recherche vise à démontrer l'importance d'un équilibre entre isolation et inertie thermique pour optimiser le confort et réduire la consommation énergétique.

II. METHODOLOGIE

Cette recherche analyse l'effet de l'inertie thermique sur la performance énergétique de bâtiments biosourcés. Trois structures—en bottes de paille, béton de chanvre et béton de bois—sont comparées à une structure conventionnelle en béton C12/15.

Les matériaux biosourcés étudiés, déjà caractérisés dans des travaux antérieurs, présentent des propriétés hygrothermiques intéressantes. Le béton de bois, structurel, est composé d'agrégats de bois certifiés PEFC et de ciment (CEM I 42.5R) (Bakkour et al., 2025). Les bottes de paille sont formées à partir de paille de blé comprimée (Tlaji et al., 2023), tandis que le béton de chanvre résulte d'un mélange de chènevotte, chaux et eau (Lelievre et al., 2014).

Pour évaluer la performance énergétique des bâtiments à base de matériaux biosourcés, une méthode de co-simulation est adoptée, associant un modèle thermique dynamique sous TRNSYS à un modèle de transfert hygrothermique développé sous MATLAB. Cette approche permet d'évaluer précisément les besoins en chauffage et en refroidissement. Le modèle de transfert de chaleur et de masse utilisé dans cette étude repose sur le modèle réduit (R-HAM) développé par (Benkhaled et al., 2022), formulé comme suit :

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda \nabla T] + L_v \rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}[K_m \nabla P_v] \quad (2)$$

où ρ_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] représente la densité, C_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] la capacité calorifique spécifique, λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] la conductivité thermique, $L_v = 2,5 \times 10^6$ [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] la chaleur latente, $C_m = \left(\frac{\partial \omega}{\partial \varphi}\right) \left(\frac{1}{P_{vsat}}\right)$ [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] la capacité de stockage d'humidité, φ [%] l'humidité relative, ω [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$] la teneur en eau du matériau, et K_m [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] la perméabilité totale à l'humidité.

Le model HAM est intégré dans TRNSYS via le module Type 155, qui facilite l'échange de données entre ces deux logiciels, comme illustré sur la [FIGURE 1](#).

À chaque pas de temps, TRNSYS détermine les conditions aux limites des faces internes et externes du mur. Ces données sont ensuite transmises à MATLAB afin de résoudre le modèle HAM. Dans ce processus, les températures des surfaces intérieure et extérieure (T_{si} et T_{se}), ainsi que les pressions partielles de vapeur (P_{vi} et P_{ve}), sont utilisées comme conditions aux limites pour les murs hygroscopiques.

Le flux de chaleur conductif, évalué à l'aide de TRNSYS, regroupe plusieurs composantes essentielles. Il inclut le flux convectif entre la surface intérieure du mur et la zone (Q_c), le flux radiatif du mur vers la zone (Q_r), une contribution énergétique spécifiée par l'utilisateur appliquée à la surface intérieure du mur ($Q_{utilisateur}$), ainsi que les apports de chaleur radiative (S). Ces apports radiatifs correspondent au rayonnement solaire traversant les fenêtres et absorbé par le mur, ainsi qu'aux gains thermiques internes (rayonnement à ondes longues) produits par des sources telles que les occupants ou les équipements.

En outre, un flux de chaleur supplémentaire, positif ou négatif, est introduit pour représenter la dissipation de la chaleur latente à l'intérieur du mur. Ce flux est déterminé par le modèle R-HAM couplé à TRNSYS, ajusté au début de chaque pas de temps, et défini conformément à l'équation 3.

$$Q_{utilisateur} = Q_{HAM} - (Q_c + Q_r + S) \quad (3)$$

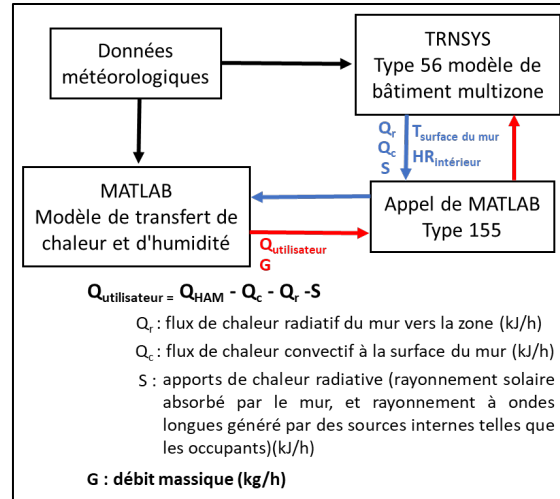


FIGURE 1. Co-simulation entre MATLAB et TRNSYS

Le bâtiment de référence (**FIGURE 2**) est basé sur la géométrie BESTEST (IEA Annex 41), avec une surface de 48 m², deux fenêtres orientées sud, une ventilation constante de 36 m³/h pendant deux heures par jour, et des gains internes simulant un occupant.

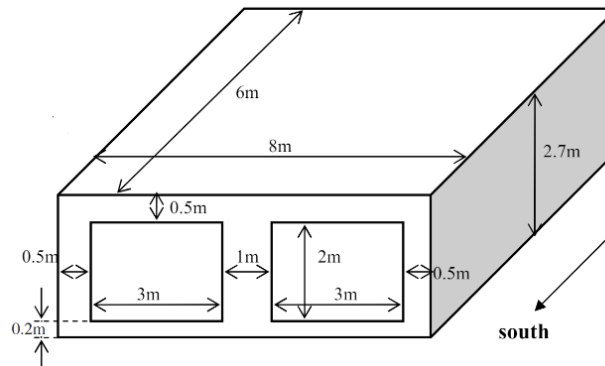


FIGURE 2. Configuration du bâtiment BESTEST.

La pièce est modélisée comme une zone thermique unique. Les températures de consigne sont de 21 °C en chauffage et 26 °C en refroidissement, avec une humidité relative maintenue entre 40 % et 60 %.

Deux analyses comparatives sont menées : (1) l'impact de l'inertie thermique sur la performance énergétique des bâtiments biosourcés en fixant les U-values des parois, et (2) l'effet de l'épaisseur des parois sur la performance thermique.

Première étude de cas. Les quatre bâtiments (béton conventionnel, paille, béton de chanvre, béton de bois) sont conçus avec des valeurs de transmission thermique (U-values) équivalentes pour murs (0,40 W·m⁻²·K⁻¹), toitures (0,33 W·m⁻²·K⁻¹) et planchers (0,41 W·m⁻²·K⁻¹), afin d'évaluer l'effet de l'inertie thermique indépendamment du niveau d'isolation. L'inertie thermique, mesurée par la capacité thermique volumique (produit de la capacité calorifique massique et de la densité), joue un rôle clé dans le confort et la demande énergétique.

Les propriétés hygrothermiques du mur conventionnel proviennent de la base WUFI ; celles des matériaux biosourcés sont issues de la littérature. Les compositions des parois sont résumées dans le **Tableau 1**. Le bâtiment en béton C12/15 comprend 20 cm de béton et 9 cm de laine de verre. Les murs en paille, béton de chanvre et béton de bois ont respectivement des épaisseurs de 18, 27 et 39 cm. Les épaisseurs de toiture et de plancher varient selon le matériau, mais les valeurs d'absorption solaire (0,6) et d'émissivité (0,9) sont constantes.

TABLEAU 1. Propriétés des parois extérieures selon les cas étudiés ($U = 0,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

Mur extérieur	Matériau	Épaisseur [m]	Masse volumique [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Conductivité thermique [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Capacité thermique [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Mur conventionnel	A : laine de verre	0,09	30	0,035	0,84
	B : béton C12/15	0,2	2200	1,60	0,85
Mur en paille	C : botte de paille	0,175	120	0,065	1,50
Mur en chanvre	D : béton de chanvre	0,27	360	0,085	1,185
Mur en bois	E : béton de bois-ciment	0,39	612	0,145	1,007

Deuxième étude de cas. Contrairement à la première qui maintenait des U-values constantes, cette analyse examine l'effet de l'épaisseur des parois sur la performance énergétique des bâtiments biosourcés. L'objectif est d'évaluer si l'augmentation uniforme de l'épaisseur des murs, toitures et planchers (de 20 à 36 cm par pas de 4 cm) améliore sensiblement l'inertie thermique et donc l'efficacité énergétique globale.

Les deux études sont menées sous deux climats contrastés selon la classification de Köppen-Geiger :

- Climat océanique tempéré et humide (Cfb) à Vichy (France)
- Climat désertique chaud (BWh) à Doha (Qatar)

III. RESULTATS

(a) Effet de l'inertie thermique

L'inertie thermique désigne la capacité d'un matériau à stocker et restituer la chaleur sous forme sensible ou latente. Pour isoler cet effet, les U-values des parois sont maintenues constantes. Quatre configurations de murs (béton C12/15, chanvre, bois, paille) sont comparées sous deux climats : Cfb (Vichy, France) et BWh (Doha, Qatar).

Les résultats montrent que les murs biosourcés induisent systématiquement des besoins énergétiques plus élevés pour le chauffage (FIGURE 3.a) et le refroidissement (FIGURE 3.b) par rapport à la configuration en béton C12/15 isolé. En ce qui concerne les besoins de chauffage à Vichy, le bâtiment en béton présente une consommation de 38 kWh/m². Cette valeur augmente respectivement de 76 %, 37 % et 26 % pour les murs en paille, chanvre et bois. Pour la climatisation, à Doha, la consommation du bâtiment en béton s'élève à 99 kWh/m², contre des hausses de 20 %, 9 % et 6 % pour les mêmes matériaux. À Vichy, la consommation de 13 kWh/m² pour le béton augmente de 254 %, 115 % et 69 % pour les mêmes murs biosourcés.

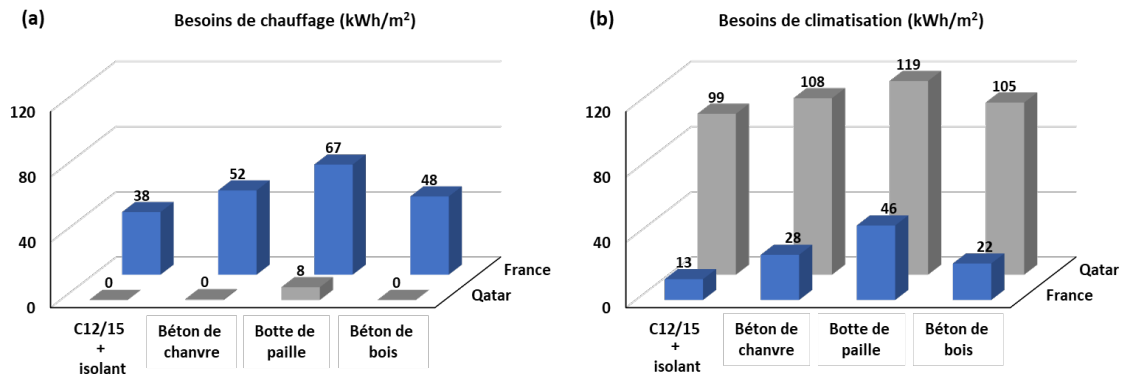


FIGURE 3. Besoins annuels en chauffage (a) et en refroidissement (b) selon les parois et les climats.

Ces écarts soulignent que l'efficacité thermique des matériaux est fortement conditionnée par le climat. Dans les zones arides comme Doha, l'effet bénéfique de l'inertie thermique est atténué par les gains solaires directs, notamment sur des parois non ombragées, limitant leur capacité à atténuer les charges internes. À l'inverse, dans des climats océaniques comme Vichy, l'inertie thermique permet d'absorber les fluctuations thermiques journalières et saisonnières, en stockant la chaleur solaire le jour et en la restituant la nuit en hiver, ou en absorbant la chaleur interne en été pour la dissiper la nuit par ventilation naturelle.

Ces résultats soulignent que, bien que les matériaux biosourcés présentent des avantages en matière de durabilité et de capacité d'isolation, leur inertie thermique reste généralement insuffisante pour réduire la consommation d'énergie dans les conditions testées. Parmi ces matériaux, le béton de bois offre les performances les plus favorables grâce à une inertie thermique plus élevée, suivi du béton de chanvre, tandis que la paille s'avère la moins efficace. La section suivante explore plus en détail l'influence de l'épaisseur des parois sur la performance énergétique de chaque matériau biosourcé, mettant en évidence les compromis entre isolation, inertie thermique et adaptation au climat.

(b) Effet de l'épaisseur des murs sur la performance énergétique

Cette section met l'accent sur l'impact de l'épaisseur des structures biosourcées sur leur performance énergétique. La FIGURE 4 montre que l'augmentation uniforme de l'épaisseur (de 20 à 36 cm) réduit systématiquement les besoins de chauffage pour les murs en chanvre, bois et paille. En climat océanique (Vichy), les réductions atteignent 52,4 kWh/m² (bois), 37,2 (chanvre), et 28,4 (paille). À Doha, les besoins deviennent quasi nuls pour toutes les configurations, soulignant la capacité isolante intrinsèque des matériaux biosourcés.

La paille se distingue par ses meilleures performances en climat froid, suivie du chanvre, puis du bois. Ces résultats confirment que l'épaisseur, couplée à une faible conductivité thermique, est déterminante pour optimiser la performance énergétique des parois biosourcées.

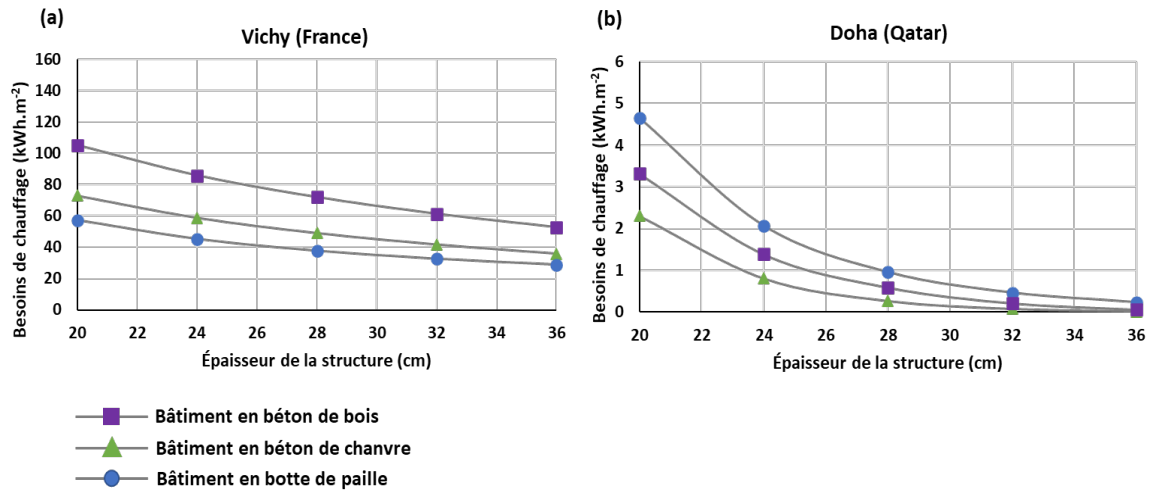


FIGURE 4. Impact de l'épaisseur sur les besoins annuels en chauffage des bâtiments biosourcés.

Concernant les besoins de refroidissement, contrairement à la tendance observée pour le chauffage, l'augmentation de l'épaisseur des structures biosourcées entraîne systématiquement une hausse des besoins de refroidissement dans tous les climats. La FIGURE 5 illustre comment l'épaisseur de la structure influence la consommation annuelle de refroidissement pour les trois bâtiments biosourcés dans les deux climats.

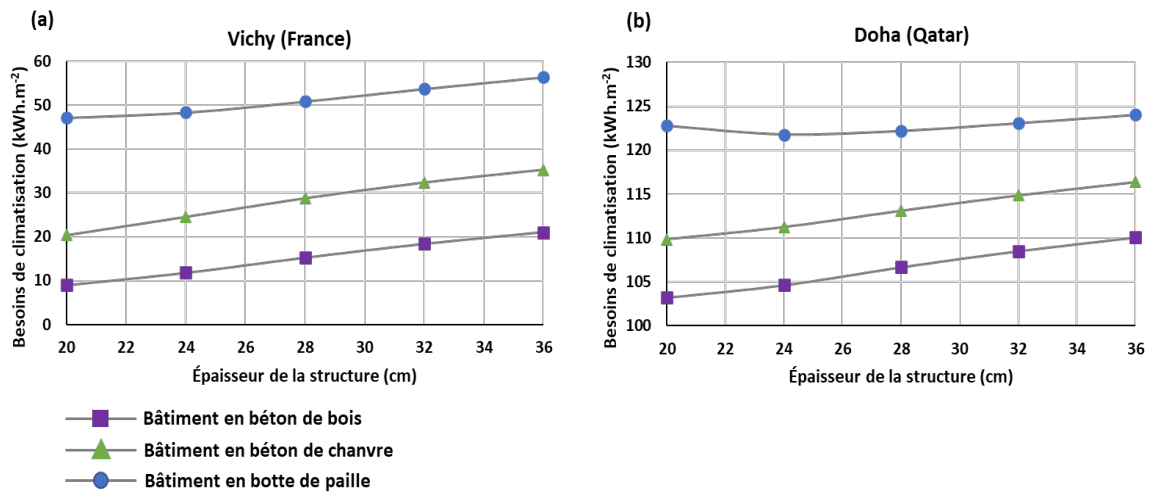


FIGURE 5. Impact de l'épaisseur sur les besoins annuels en climatisation des bâtiments biosourcés.

À Vichy (France), lorsque l'épaisseur passe de 20 à 36 cm, les besoins de refroidissement augmentent de 14,8 kWh/m² pour le chanvre, 12,0 kWh/m² pour le bois et 9,2 kWh/m² pour la paille, tandis qu'à Doha (Qatar), les augmentations sont plus modérées : 6,5 kWh/m² pour le chanvre, 6,8 kWh/m² pour le bois et 1,3 kWh/m² pour la paille.

Bien que l'augmentation de l'épaisseur augmente l'inertie thermique des murs, ce bénéfice ne se traduit pas efficacement par une meilleure performance de refroidissement dans les bâtiments biosourcés. En raison de leur faible conductivité thermique intrinsèque et de leurs fortes propriétés isolantes, ces matériaux peuvent piéger les gains internes de chaleur durant la journée, limitant ainsi la capacité du bâtiment à évacuer la chaleur vers l'extérieur. Ce comportement thermique peut entraîner une accumulation de chaleur à l'intérieur, notamment dans les climats à forts gains solaires, augmentant ainsi les besoins en refroidissement.

Parmi eux, le bois présente systématiquement la meilleure performance en refroidissement, probablement grâce à sa densité relativement plus élevée, qui confère une légère augmentation de l'inertie thermique comparé au chanvre et à la paille.

IV. CONCLUSION

L'utilisation de matériaux biosourcés locaux dans les enveloppes de bâtiments suscite un intérêt croissant en raison de leur potentiel d'économie d'énergie et de réduction de l'impact environnemental. Cependant, de nombreuses comparaisons dans ce domaine restent limitées, négligeant souvent le double rôle de l'isolation thermique et de l'inertie thermique — deux facteurs particulièrement influents dans les climats à forte variabilité journalière ou saisonnière. De plus, les comparaisons croisées entre différents types de murs biosourcés à l'échelle du bâtiment entier et à travers divers climats demeurent rares.

Cette étude compare trois murs biosourcés — béton de chanvre, béton de bois et bottes de paille — dans deux climats contrastés : chaud-aride (Doha) et océanique (Vichy). Deux scénarios sont simulés : (i) une transmittance thermique (valeur U) identique pour tous les types de murs afin d'isoler l'effet de l'inertie thermique, et (ii) une augmentation de l'épaisseur des murs.

À valeur U égale, la structure en béton isolé présente généralement des besoins annuels de chauffage et refroidissement inférieurs à ceux des bâtiments biosourcés. Ce différentiel dépend toutefois fortement du climat : il est faible dans le climat désertique chaud de Doha, où les forts gains solaires et faibles variations de température limitent l'effet de l'inertie thermique, mais plus marqué dans le climat océanique de Vichy, où l'inertie thermique aide à réguler les besoins de chauffage et de refroidissement.

L'augmentation de l'épaisseur des murs réduit les besoins de chauffage en améliorant la résistance thermique, mais accroît systématiquement la demande en refroidissement, quel que soit le climat. Les matériaux biosourcés, à faible conductivité et forte capacité isolante, retiennent la chaleur interne et solaire, limitant l'évacuation des excès thermiques et provoquant une surchauffe intérieure. Parmi eux, la paille offre la meilleure isolation, réduisant fortement les besoins de chauffage en climat froid, le béton de bois modère davantage les fluctuations en climat chaud grâce à sa densité plus élevée, tandis que le béton de chanvre affiche une performance intermédiaire.

Ces résultats soulignent la dépendance climatique des performances des murs biosourcés, nécessitant un équilibre fin entre isolation et inertie thermique pour répondre aux besoins de chauffage et de refroidissement. Dans les climats chauds, des solutions de refroidissement passif sont indispensables pour éviter l'accumulation de chaleur liée à une isolation excessive.

Les recherches futures devraient viser à optimiser l'inertie thermique dans les bâtiments biosourcés par des stratégies intégrées, incluant l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP), la conception de murs hybrides combinant biosourcé et matériaux plus denses à forte inertie, la définition d'épaisseurs optimales selon les climats, l'intégration de cavités d'air intérieures pour améliorer le tampon thermique, ainsi que l'évaluation des systèmes d'enveloppe végétalisée (toiture ou mur végétal) pour améliorer la performance estivale. Ces approches permettront de dépasser le compromis chauffage/refroidissement des constructions biosourcées légères et d'en favoriser l'adoption durable.

REFERENCES

Bakkour, A., Ouldboukhitine, S.-E., Biwole, P., Amziane, S., 2025. Hygrothermal performance of wood-cement walls across various climate conditions. *Materials and Structures* 58, 41. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02560-2>

Bakkour, A., Ouldboukhitine, S.-E., Biwole, P., Amziane, S., 2024. A review of multi-scale hygrothermal characteristics of plant-based building materials. *Construction and Building Materials* 412, 134850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134850>

Bakkour, A., Ouldboukhitine, S.-E., Biwole, P., Godi, G., Amziane, S., 2023. Experimental and Numerical Investigation of Hygrothermal Transfer through Bio-Based Materials: An Application to Wood–Cement Walls. *Buildings* 13, 2986. <https://doi.org/10.3390/buildings13122986>

Bardouh, R., Homoro, O., Reboul, N., Saidi, M., Amziane, S., 2024. Enhancing bio-based concrete mechanical properties: a novel approach with composite sandwiches and confined cylinders. *Materials and Structures* 57, 139. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02400-3>

Benkhaled, M., Ouldboukhitine, S.-E., Bakkour, A., Amziane, S., 2022. Sensitivity analysis of the parameters for assessing a hygrothermal transfer model HAM in bio-based hemp concrete material. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 132, 105884. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105884>

Lelievre, D., Colinart, T., Glouannec, P., 2014. Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses. *Energy and Buildings* 84, 617–627. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>

Ouldboukhitine, S.-E., Bakkour, A., Amziane, S., Belarbi, R., 2024. A comparative study of energy performance of Green, White, and gravel roofs in a temperate climate through In-Situ measurement and dynamic simulation. *Energy and Buildings* 320, 114630. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114630>

Ouldboukhitine, S.-E., Bakkour, A., Khiati, S., Belarbi, R., 2025. Modular green walls: A sustainable architectural solution for energy efficiency in oceanic climates. *Energy and Buildings* 342, 115850. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115850>

Tlaji, G., Biwole, P., Ouldboukhite, S., Pennec, F., 2023. Effective thermal conductivity model of straw bales based on microstructure and hygrothermal characterization. *Construction and Building Materials* 387, 131601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131601>

Tlaji, G., Ouldboukhite, S., Pennec, F., Biwole, P., 2022. Thermal and mechanical behavior of straw-based construction: A review. *Construction and Building Materials* 316, 125915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125915>

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>

World Energy Consumption Statistics - Yearbook 2024, Enerdata [WWW Document], n.d. URL <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> (accessed 7.30.24).