

Béton de balle de riz : une solution innovante pour le confort hygrothermique et la réduction énergétique dans le bâtiment

Kibalo Georges TCHAMIE^{a,b}, Césaire HEMA^a, Adamah MESSAN^a and Yawovi M. X. Dany AYITE^c

Kibalo Georges TCHAMIE^{a,b}; Césaire HEMA^a; Adamah MESSAN^a and Yawovi M. X. Dany AYITE^c

1. ^aLaboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD), Institut 2iE, Rue de la Science, Ouagadougou 01 BP 594, Burkina Faso,

2. ^bCentre d'Excellence Régional pour la Maîtrise de l'Electricité (CERME), Université de Lomé, 01BP1515 Lome, Togo;

3. ^cLaboratoire de Recherche en Sciences de l'Ingénieur, Université de Lomé, 01 BP 1515, Lome 01, Togo.

Email 1 - georges.tchzmie@2ie-edu.org

Email 2 - adamah.messan@2ie-edu.org

Email 3 - cesaire.hema@2ie-edu.org

Résumé :

Cette étude, basée sur une modélisation hygrothermique rigoureuse, démontre que le béton de balle de riz (BBR) réduit significativement la consommation énergétique liée au refroidissement dans les bâtiments en climat tropical. Le BBR limite efficacement les surchauffes grâce à ses propriétés thermiques et hygroscopiques, bien qu'il ne favorise pas des températures minimales plus basses. L'analyse souligne également l'importance stratégique de son usage en toiture, où il optimise la réduction des gains solaires et les besoins en refroidissement. Enfin, l'augmentation de l'épaisseur de l'enveloppe et la présence d'une cavité améliorent encore la performance thermique du BBR. Ces résultats confirment le potentiel du BBR comme matériau biosourcé performant et durable pour les constructions tropicales, contribuant à des bâtiments plus confortables et économes en énergie.

1 Introduction :

Face aux défis croissants du changement climatique [1], de la précarité énergétique et de l'amélioration du confort thermique, le secteur du bâtiment, responsable d'environ un tiers de la consommation énergétique mondiale et des émissions de gaz à effet de serre [2], se trouve au cœur des préoccupations en matière de transition durable. La dépendance aux systèmes de climatisation, ventilation et chauffage (CVC) pour assurer le confort hygrothermique, qui intègre température, humidité relative, activité métabolique et habillement [3,4], accroît la demande énergétique, particulièrement dans les zones tropicales où les conditions climatiques sont extrêmes et variables. Dans ce contexte, les matériaux de construction éco-innovants apparaissent comme une réponse prometteuse. Les bétons biosourcés, notamment ceux intégrant des granulats végétaux comme le chanvre, le lin, le bois ou la balle de riz en substitution aux agrégats conventionnels, associés à des liants minéraux ou biosourcés [5–9], permettent une réduction significative de l'énergie grise, une valorisation des déchets agricoles et une bio-séquestration du carbone [10,11]. En particulier, la balle de riz, déchet agricole abondant dans de nombreuses régions, suscite un intérêt croissant pour son potentiel en tant qu'isolant thermique, sa disponibilité locale, et sa faible empreinte carbone.

En Afrique de l'Ouest, où l'urbanisation rapide s'accompagne souvent d'une absence de régulation thermique adaptée, ces matériaux peuvent jouer un rôle clé dans l'amélioration de la résilience thermique des bâtiments. Toutefois, bien que l'utilisation des cendres de balle de riz comme additif cimentaire soit relativement bien documentée, peu d'études se sont intéressées à la performance hygrothermique et énergétique des bétons de balle de riz à l'échelle du bâtiment dans des contextes tropicaux. Ces lacunes limitent leur pertinence pour la conception architecturale adaptée aux réalités régionales.

Ainsi, cette étude vise à déterminer dans quelle mesure l'usage du béton de balle de riz impacte la consommation énergétique nécessaire au maintien du confort hygrothermique dans un bâtiment.

Pour ce faire, la méthodologie adoptée repose sur une modélisation hygrothermique transitoire d'un bâtiment dont l'enveloppe est entièrement réalisée en parpaings de béton de balle de riz, à l'aide de l'outil de simulation hygrothermique WUFI Plus, intégrant les propriétés thermophysiques mesurées du matériau. Une calibration rigoureuse du modèle sera effectuée à partir de mesures in situ de température et d'humidité intérieure du bâtiment, en conditions réelles. Une analyse paramétrique permettra ensuite d'étudier l'effet de l'épaisseur du matériau dans la paroi.

La première partie présentera l'état des connaissances sur le béton de balle de riz utilisé pour construire le bâtiment. La deuxième décrira la méthodologie de modélisation et de calibration. La troisième analysera les résultats des simulations paramétriques, avant de discuter leurs implications pour la conception architecturale et la performance énergétique.

2 Méthodologie

La présente étude a pour objectif d'évaluer la performance énergétique d'un local construit en béton de balle de riz (BBR) à travers une approche de simulation numérique hygrothermique. Plus précisément, cette méthodologie vise à modéliser le comportement hygrothermique d'un local en BBR, calibrer le modèle numérique à l'aide de données expérimentales, simuler et comparer la demande d'énergie de refroidissement entre ce local en BBR et un local de référence en parpaings de ciment conventionnel pour une zone de confort préalablement définie, et enfin, déterminer par simulation l'épaisseur optimale des parois en béton de balle de riz pour minimiser la consommation énergétique. La démarche adoptée s'articule autour des sections détaillées ci-après.

2.1 1. Modélisation Numérique

La modélisation détaillée du local en béton de balle de riz a été réalisée à l'aide du logiciel **WUFI Plus**. Ce programme, reconnu pour ses capacités de simulation hygrothermique dynamique, est capable de prendre en compte les transferts couplés de chaleur et d'humidité à travers les enveloppes du bâtiment, permettant ainsi une analyse précise de leur comportement énergétique.

2.1.1 Description du Local d'Étude

Le local étudié est une salle expérimentale (voir Figure 4) située sur le campus de l'Université de Lomé. Ses dimensions intérieures sont de 4,35 m de longueur, 4,35 m de largeur et 2,90 m de hauteur. Les éléments constructifs du local se composent comme suit : les murs sont réalisés en blocs creux de béton de balle de riz de 15 cm d'épaisseur ; la toiture est une toiture plate constituée de dalles alvéolaires composées de blocs en béton de balle de riz de 15 cm d'épaisseur, de nervures, et surmontée d'une dalle de compression en béton armé de 5 cm d'épaisseur ; les menuiseries incluent deux fenêtres à simple vitrage orientées respectivement au Sud et à l'Est, ainsi qu'une porte en aluminium ; l'ossature structurelle du

bâtiment est en béton armé conventionnel. Parallèlement, un local de référence aux dimensions et caractéristiques similaires, mais construit en parpaings de ciment conventionnel, a été modélisé pour permettre une comparaison directe des performances.



Figure 1 : local en parpaings creux de béton de balle de riz

2.1.2 Données Climatiques et Propriétés des Matériaux

Le fichier climatique utilisé pour les simulations est le fichier climatique type (TMY) de la ville de Lomé. Ce fichier fournit les données météorologiques horaires nécessaires pour une simulation représentative des conditions environnementales locales. Les propriétés hygrothermiques détaillées de la toiture et de la paroi du local en BBR simulé sont récapitulées dans le Tableau 1.

Tableau 1: propriétés hygrothermiques de l'enveloppe du bâtiment simulé

Propriétés hygrothermiques	Toiture	Paroi	
	Dalle en béton	Hourdis BBR	Parpaings BBR
Densité apparente [Kg·m ⁻³]	1990	647,7	636,6
Chaleur spécifique [J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	850	1084	1340
Conductivité thermique [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	1,6	0.418	0,230
Porosité [-]	0,175	0,46	0,46
Facteur de résistance à la vapeur [-]	99	10	10
Epaisseur [m]	0,15	0,05	0,15

2.2 Calibration du Modèle

Afin d'assurer la validité et la précision du modèle numérique, une phase de calibration a été menée. Cette étape a consisté à comparer les résultats de simulation issus de WUFI Plus avec les données hygrothermiques mesurées *in situ* dans le local expérimental en béton de balle de riz. Les paramètres du modèle ont été ajustés itérativement jusqu'à ce qu'une concordance satisfaisante soit obtenue entre les valeurs simulées et les mesures expérimentales. Les critères de calibration utilisés, essentiels pour garantir la représentativité du modèle pour les analyses ultérieures, incluent le NMBE (erreur moyenne normalisée) avec une valeur recommandée inférieure à 10%, le CV(RMSE) (coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne normalisée) avec une valeur recommandée inférieure à 30%, et le coefficient de détermination R² avec une valeur recommandée supérieure à 0,9.

$$NMBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{is} - t_{im})}{n - 1} \times \frac{1}{t_m} \times 100 \tag{1}$$

$$CV(RMSE)(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (t_{is} - t_{im})^2}{n - 1}} \times \frac{1}{\bar{t}_m} \times 100 \tag{2}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (t_{im} - \bar{t}_m)(t_{is} - \bar{t}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{im} - \bar{t}_m)^2 \sum_{i=1}^n (t_{is} - \bar{t}_s)^2}} \right)^2 \tag{3}$$

2.3 Simulation de la Demande Énergétique et Optimisation

Une fois le modèle calibré, des simulations ont été réalisées pour évaluer la demande d'énergie de refroidissement des deux configurations de local (BBR et parpaings conventionnels) sous des conditions de confort thermique intérieures bien définies. Les zones de confort thermique observées en climat tropical humide et intertropical au Nigeria (Jos) et au Cameroun (Douala, Yaoundé) se situent typiquement entre ≈24,7 °C et 28,3 °C [12,13] [18], avec des températures préférées autour de 26 °C [16,17] dans les environnements naturellement ventilés. L'humidité relative adéquate peut atteindre 60–70 %, surtout dans les climats humides comme Douala.

Bien que la base de données du logiciel de simulation hygrothermique WUFI Plus propose des propriétés pour le parpaing en mortier de ciment conventionnel, nous avons opté pour des valeurs hygrothermiques issues d'un travail de recherche local (Tableau 2). Ce choix vise à mieux refléter les caractéristiques thermiques réelles des matériaux couramment utilisés dans le contexte ouest-africain, afin d'assurer une plus grande représentativité des simulations.

Par la suite, une série de simulations paramétriques a été entreprise pour déterminer l'épaisseur optimale des parois en béton de balle de riz. L'objectif étant d'identifier l'épaisseur qui permet de minimiser la demande énergétique de refroidissement tout en maintenant le confort thermique intérieur, et ce, sans compromettre les performances structurelles ou constructives.

Tableau 2 : propriétés hygrothermiques de la paroi en parpaings de ciment conventionnel

	Paroi
Propriétés hygrothermiques	Parpaing de ciment conventionnel [18]
Densité apparente [Kg·m ⁻³]	2100
Chaleur spécifique [J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	600
Conductivité thermique [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,9
Porosité [-]	0,45
Facteur de résistance à la vapeur [-]	150
Epaisseur [m]	0,15

3 Résultats :

3.1 Calibration

L'évaluation de la performance de notre modèle par une phase de calibration rigoureuse a été fructueuse, comme en témoignent les indices de calibration présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable..** Les résultats pour la température du milieu intérieur sont particulièrement solides : un NMBE de 1,5% indique un biais quasi négligeable, tandis qu'un CV(RMSE) de 2,4% démontre une grande précision. De plus, le coefficient de détermination (R²) de 0,91 atteste d'une très forte corrélation entre les valeurs simulées et mesurées. Concernant l'humidité du milieu intérieur, les indices sont également excellents avec un NMBE de 6,6%, un CV(RMSE) de 6,4%, et un R² de 0,93, confirmant la capacité de notre modèle à capturer fidèlement les dynamiques d'humidité.

Ces excellents résultats numériques sont visuellement confirmés par la Figure 2, qui illustre de manière éloquent la parfaite concordance entre les températures et humidités intérieures mesurées et simulées sur la période de calibration.

En somme, ces données prouvent que notre modèle est extrêmement fiable et représente avec précision la réalité des conditions thermo-hygrométriques intérieures.

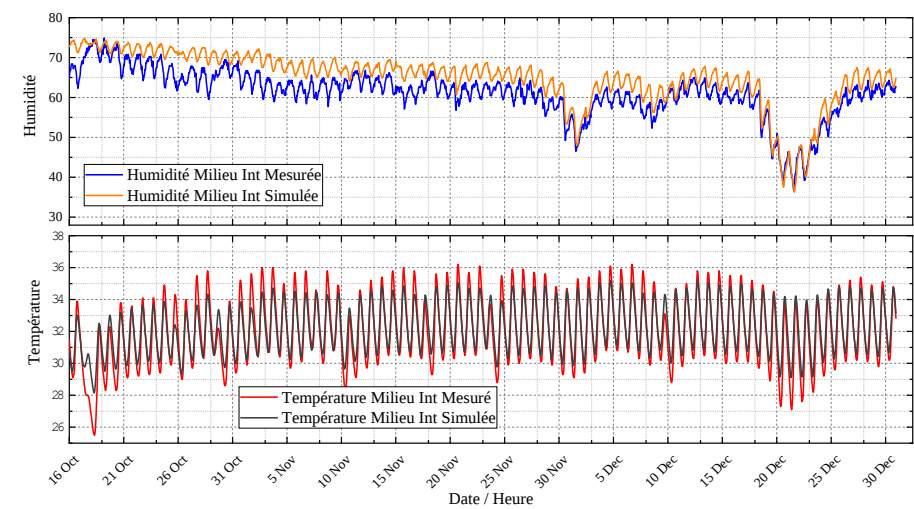


Figure 2 : a) humidité relative mesuré et simulé b) température simulée et mesuré

Tableau 3 : calibration de la simulation

	NMBE(%)	CV(RMSE)(%)	R ²
Valeur visée et recommandée	<10%	<30%	>0.9
Temp Milieu Int (°C)	1.5%	2.4%	0.91
Hum Milieu Int (%HR)	6.6	6.4%	0.93

3.2 Consommation énergétique pour le maintien de confort

La Figure 3 présente le profil de température simulé sur une année dans le local étudié. L’analyse des températures intérieures met en évidence des dynamiques thermiques contrastées selon les types d’enveloppes : béton de balle de riz (BBR) murs et toiture, parpaing de ciment pour les murs seuls (Parpaing1_Mur), et parpaing de ciment pour murs et toiture (Parpaing1_Mur+Toit).

Le béton de balle de riz, bien que présentant des températures minimales plus élevées que les configurations en parpaing de ciment, se distingue par ses pics de température maximale nettement plus bas tout au long de l’année. Cette performance traduit une capacité notable à limiter les surchauffes, qualité particulièrement recherchée dans les climats tropicaux, où les températures extrêmes compromettent fortement le confort thermique. En effet, alors que les enveloppes en parpaing de ciment franchissent régulièrement les 35°C, l’enveloppe en BBR parvient à contenir les hausses thermiques, maintenant les températures maximales autour de 34°C. Cela indique un effet tampon thermique significatif du matériau, lié à ses propriétés thermiques et hygroscopiques. Ce comportement confère au matériau une stabilité thermique accrue, limitant les écarts jour/nuit et créant un environnement intérieur plus homogène, et potentiellement plus confortable pour les occupants.

Ainsi, bien que le béton de balle de riz soit moins performant en termes de température minimale, il joue un rôle essentiel dans la prévention des surchauffes, ce qui en fait une solution prometteuse pour le confort passif, à condition de l’associer à des stratégies complémentaires tel que la ventilation nocturne, inertie additionnelle ou enveloppe plus épaisse. En somme, le béton de balle de riz ne favorise pas nécessairement

la fraîcheur, mais il excelle dans la réduction des excès de température, un enjeu crucial pour l’habitat durable en climat chaud.

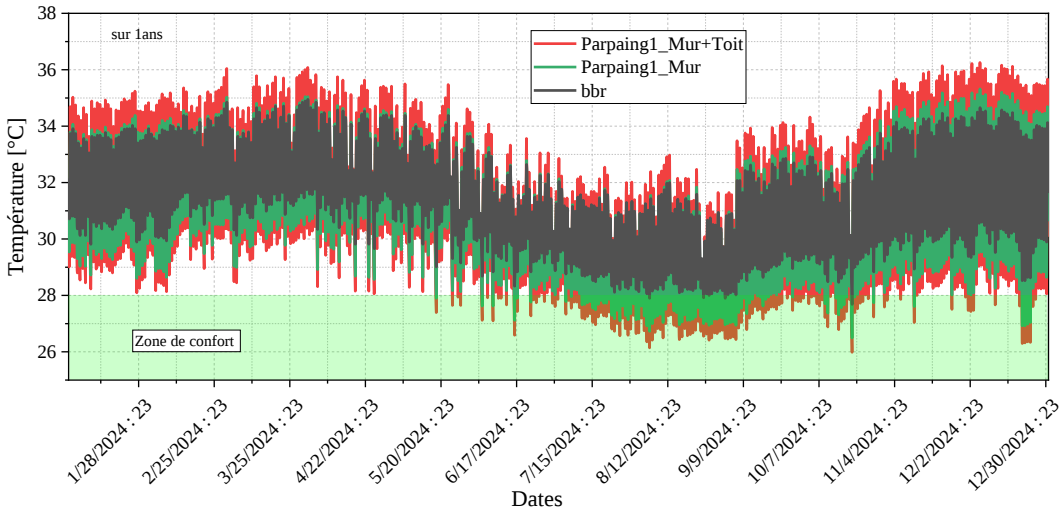


Figure 3 : Températures Intérieures Simulées sur un An : Comparaison enveloppe BBR avec Murs et Enveloppe Complète en Parpaing de Ciment.

La Figure 4 présente l'évolution de l'énergie de refroidissement (en kW) nécessaire pour maintenir le confort thermique intérieur sur une année complète. Cette analyse compare trois types d'enveloppes : le béton de balle de riz (BBR) pour les murs et la toiture, le parpaing de ciment pour les murs seuls (Parpaing1_Mur), et le parpaing pour les murs et le toit (Parpaing1_Mur+Toit). On observe que les valeurs d'énergie de refroidissement sont systématiquement plus faibles pour la configuration en BBR, ce qui témoigne d'une demande énergétique réduite pour maintenir le confort thermique intérieur. Cette performance est d'autant plus remarquable qu'elle se vérifie durant toutes les saisons de l'année.

En effet, alors que les configurations en parpaing de ciment nécessitent régulièrement des puissances de refroidissement dépassant les -2 kW, notamment pendant la saison chaude (février-avril et octobre-décembre), l'enveloppe en béton de balle de riz reste nettement en deçà de ces besoins extrêmes. Sa courbe d'énergie est plus stable, ce qui indique une forte inertie thermique et une moindre sensibilité aux variations de température extérieure. Ce comportement s'explique par les propriétés du BBR, qui combine une bonne capacité de régulation hygroscopique avec des propriétés isolantes. Ces qualités limitent les gains et les pertes de chaleur excessifs, limitant les fluctuations thermiques, réduisant ainsi les besoins en climatisation.

Ainsi, malgré des températures intérieures légèrement plus élevées en période fraîche (comme mentionné précédemment), le bilan énergétique global de l'enveloppe en béton de balle de riz est plus favorable. Elle nécessite moins d'énergie pour le refroidissement, des puissances plus faibles, et génère par conséquent un impact énergétique et environnemental réduit. Cela positionne le BBR comme une solution biosourcée passive performante, particulièrement adaptée aux régions tropicales où la surchauffe constitue un enjeu majeur. En résumé, le béton de balle de riz, pour un même niveau de confort thermique, minimise les besoins en énergie par rapport au parpaing de ciment conventionnel, ce qui renforce son potentiel dans une démarche de construction durable et résiliente face au changement climatique.

La Figure 5 confirme que l’emploi du "parpaing1" en toiture augmente les besoins en refroidissement de +11,76 %, tandis qu’une enveloppe complète en parpaing génère +9,5 % (murs seuls) et +21,26 % (murs + toiture) par rapport au scénario de référence en BBR. Ces chiffres soulignent le rôle déterminant de la toiture, justifiant l’utilisation préférentielle du BBR sur cette surface pour limiter les surchauffes.

Des études antérieures confirment ces résultats. Adaji & Adler (2015) ont observé une baisse notable des besoins énergétiques dans des habitations en climat chaud et humide en utilisant des matériaux biosourcés[19]. Plus récemment, Ba et al. rapportent une réduction de 31,71% de la demande de refroidissement grâce à l’usage du composite plâtre – fibre de banane[20]. Cette performance correspond à notre constat du gain thermique obtenu avec l’usage du béton de balle de riz. Les gains énergétiques constatés témoignent de l’efficacité des matériaux biosourcés lorsqu’ils sont utilisés de manière stratégique, en particulier en toiture.

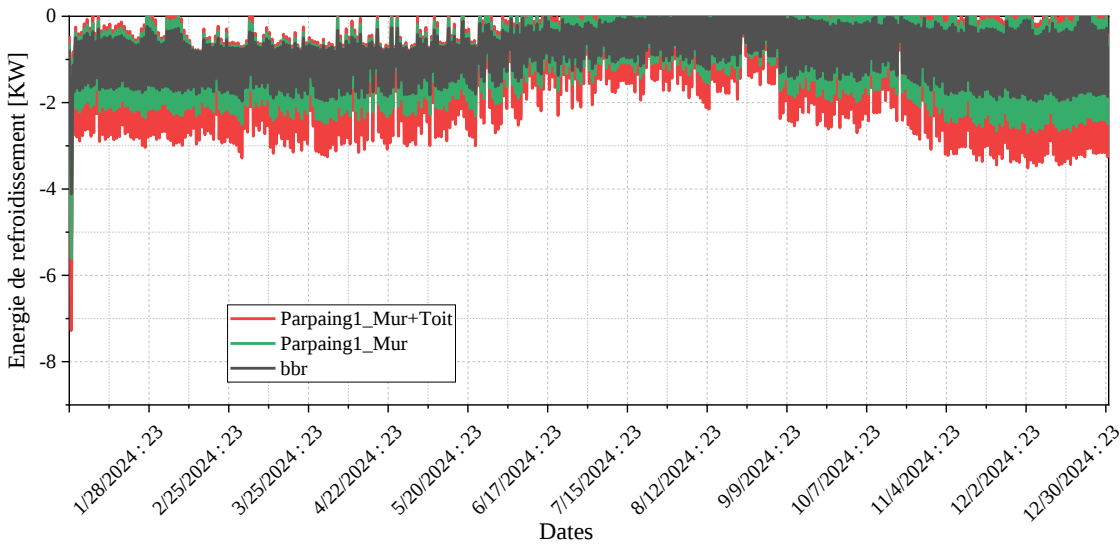


Figure 4 : Profil de l'énergie de refroidissement annuelle pour le confort intérieur : comparaison entre l'enveloppe BBR et le parpaing de ciment (Murs Seuls vs. Enveloppe Complète)

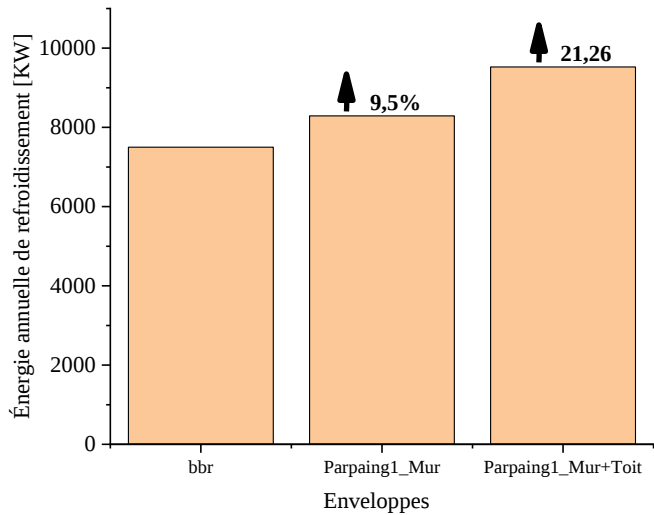


Figure 5 : Energie total de refroidissement annuelle pour le confort intérieur : comparaison entre l'enveloppe BBR et le parpaing de ciment (Murs Seuls vs. Enveloppe Complète)

3.3 Influence de l'épaisseur

La Figure 6 révèle que l'énergie annuelle de refroidissement des bâtiments à enveloppe BBR est significativement influencée par l'épaisseur de l'enveloppe et la présence d'une cavité. On observe une réduction progressive de l'énergie de refroidissement à mesure que l'épaisseur de l'enveloppe BBR augmente, passant d'environ 7 500 kW pour 15 cm à environ 6 800 kW pour 30 cm lorsque la cavité est présente. Cette tendance souligne l'efficacité d'une meilleure isolation grâce à une épaisseur accrue pour réduire la charge de refroidissement.

Parallèlement, la comparaison entre les configurations "bbr_Env" (avec cavité) et "bbr_sans_creux_Env" (sans cavité) met en évidence le rôle crucial de la cavité. Quelle que soit l'épaisseur, les enveloppes sans cavité nécessitent systématiquement plus d'énergie de refroidissement, avec une consommation maximale d'environ 8 000 kW pour 15 cm sans cavité, contre environ 7 500 kW pour son équivalent avec cavité. Cela montre que la cavité agit comme un élément isolant ou ventilant essentiel, contribuant significativement à l'amélioration de la performance thermique et à la réduction des besoins en refroidissement des bâtiments à enveloppe BBR dans le climat de Lomé. Le BBR, associé à une bonne épaisseur et une cavité, constitue une solution biosourcée robuste, capable de réduire la consommation énergétique et les impacts environnementaux tout en assurant un confort thermique performant.

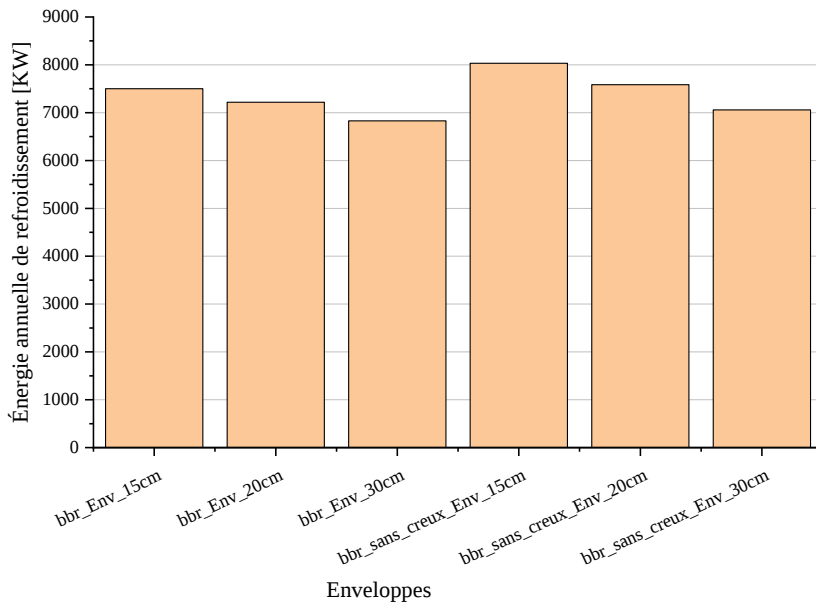


Figure 6 : Influence de l'épaisseur et de la cavité sur l'énergie totale de refroidissement annuelle (confort intérieur) des bâtiments à enveloppe BBR.

4 Conclusion

Cette étude a permis de démontrer, grâce à une modélisation hygrothermique transitoire rigoureuse et calibrée, l'impact significatif du béton de balle de riz (BBR) sur la consommation énergétique nécessaire au maintien du confort hygrothermique dans un bâtiment en climat tropical.

Les résultats de calibration, caractérisés par des NMBE, CV(RMSE) et R^2 excellents pour la température et l'humidité intérieures, confirment la grande fiabilité de notre modèle de simulation. Cette précision a été essentielle pour analyser fidèlement le comportement thermique des différentes enveloppes étudiées.

L'analyse comparative du confort et de la consommation énergétique met clairement en évidence la supériorité du BBR en termes de limitation des surchauffes. Contrairement aux parpaings de ciment, qui voient régulièrement les températures intérieures dépasser les 35 °C, le BBR maintient ces pics autour de 34 °C grâce à ses propriétés thermiques et hygroscopiques conférant une forte inertie thermique. Bien qu'il ne favorise pas des températures minimales plus basses, son rôle dans la réduction des excès de température est crucial pour le confort passif dans les régions chaudes.

Sur le plan énergétique, le BBR se distingue par une demande de refroidissement systématiquement plus faible tout au long de l'année. Alors que les configurations en parpaing nécessitent des puissances de refroidissement élevées, l'enveloppe en BBR présente une courbe d'énergie plus stable, traduisant un bilan énergétique global plus favorable et un impact environnemental réduit.

De plus, nos analyses ont révélé l'importance stratégique de l'application du BBR. Si une enveloppe entièrement en BBR n'est pas réalisable, il est fortement recommandé de privilégier son usage en toiture. Les données montrent que la toiture en parpaing de ciment augmente les besoins en refroidissement de

11,76 % supplémentaires par rapport à une configuration avec des murs seuls en parpaing, soulignant le rôle prépondérant de cette surface dans les gains de chaleur sous un soleil tropical. L'intégration du BBR en toiture permet ainsi de maximiser l'efficacité de la stratégie de refroidissement passif.

Enfin, l'étude de l'épaisseur de l'enveloppe et de la présence d'une cavité a confirmé l'importance de ces paramètres pour optimiser la performance du BBR. Une épaisseur accrue réduit les besoins en refroidissement, tandis que la cavité agit comme un élément isolant ou ventilant crucial, améliorant significativement la performance thermique globale.

En conclusion, le béton de balle de riz s'affirme comme une solution biosourcée hautement performante et durable pour la construction en climat tropical. Il permet de minimiser la consommation énergétique liée au refroidissement tout en maintenant un confort thermique adéquat, renforçant ainsi sa position en tant que matériau clé pour des bâtiments résilients face au changement climatique. Cette étude fournit des arguments solides pour l'adoption et le développement de ce matériau dans les stratégies de construction durable.

Références :

- [1] Mansouri A, Wei W, Alessandrini JM, Mandin C, Blondeau P. Review on the impact of Climate Change on Indoor Air Quality. 17th Int Conf Indoor Air Qual Clim INDOOR AIR 2022 2022.
- [2] UN UNEP. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi: 2022.
- [3] Gao N, Shao W, Rahaman MS, Zhai J, David K, Salim FD. Transfer learning for thermal comfort prediction in multiple cities. vol. 195. Association for Computing Machinery; 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107725>.
- [4] Nouhaila B, Taoufiq M, Farida B. Role of the solar powered mechanical ventilation and the phase change materials on thermal comfort and electrical energy of buildings envelope. J Pharm Negat Results 2022;13. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.s01.232>.
- [5] Es-sakali N, Charai M, Idrissi Kaitouni S, Ait Laasri I, Mghazli MO, Cherkaoui M, et al. Energy efficiency and hygrothermal performance of hemp clay walls for Moroccan residential buildings: An integrated lab-scale, in-situ and simulation-based assessment. Appl Energy 2023;352:121967. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121967>.
- [6] Collet F, Pretot S. Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. Build Environ 2014;82:459–66. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.018>.
- [7] Viel M, Collet F, Prétot S, Lanos C. Hemp-straw composites: Gluing study and multi-physical characterizations. Materials (Basel) 2019;12:1–13. <https://doi.org/10.3390/ma12081199>.
- [8] Chabannes M, Garcia-Diaz E, Clerc L, Bénézet JC. Effect of curing conditions and Ca(OH)₂-treated aggregates on mechanical properties of rice husk and hemp concretes using a lime-based binder. Constr Build Mater 2016;102:821–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.206>.
- [9] Chabannes M, Garcia-Diaz E, Clerc L, Bénézet JC. Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation. Constr Build Mater 2015;94:105–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.032>.
- [10] Eisenberger P. Renewable Energy and Materials Economy The Path to Energy Security, Prosperity and Climate Stability n.d.
- [11] Zamathula QSN, Ikenna Ilojiana V, Ifeanyi Ibekwe K, Adefemi A, Augustine Etukudoh E, Akpan Umoh A. Advanced Materials for Sustainable Construction: a Review of Innovations and

Environmental Benefits. Eng Sci Technol J 2024;5:201–18. <https://doi.org/10.51594/estj/v5i1.744>.

- [12] Djongyang N, Tchinda R. An investigation into thermal comfort and residential thermal environment in an intertropical sub-Saharan Africa region: Field study report during the Harmattan season in Cameroon. Energy Convers Manag 2010;51:1391–7. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.011>.
- [13] Kemajou A, Tseuyep A, Egbewatt NE. Le confort thermique en climat tropical humide vers un réaménagement des normes ergonomiques. J Renew Energies 2023;15:427–38. <https://doi.org/10.54966/jreen.v15i3.333>.
- [14] Kiki G, Houngan A, Kouchade C, Djossou A, Andre P, Vianou A. Amélioration du confort thermique des bâtiments par utilisation de l'inertie thermique des composites argile-paille de chiendent Improvement of the thermal comfort of buildings by using the thermal inertia of quackgrass-clay composites. Build Energy Monit Simul 2020;1–8.
- [15] Olissan A, Kouchade C, Andre P, Awanou CN. Le confort thermique des batiments en region tropicale : cas de quelques bureaux du rectorat de l'universite d'abomey calavi (cotonou-benin). Cifem2012 – Art-13-53 2012:1–6.
- [16] Ogbonna AC, Harris DJ. Thermal comfort in sub-Saharan Africa: Field study report in Jos-Nigeria. Appl Energy 2008;85:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.06.005>.
- [17] Kiki G, Kouchadé C, Houngan A, Zannou-Tchoko SJ, André P. Evaluation of thermal comfort in an office building in the humid tropical climate of Benin. Build Environ 2020;185. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107277>.
- [18] Seini-Moussa H, Nshimiyimana P, Hema C, Zoungrana O, Messan A, Courard L. Comparative Study of Thermal Comfort Induced from Masonry Made of Stabilized Compressed Earth Block vs Conventional Cementitious Material. J Miner Mater Charact Eng 2019;07:385–403. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.76026>.
- [19] Adaji M, Adler PG. an Investigation Into Thermal Comfort in Residential Buildings in the Hot Humid Climate of Sub-Saharan Africa : a Field Study in Abuja-Nigeria. Plea 2015 Bol Archit (R)Evolution 2015.
- [20] Ba L, Trabelsi A, Ngo TT, Pliya P, El Abbassi I, Kane CSE. Thermal Performance of Bio-Based Materials for Sustainable Building Insulation: A Numerical Study. Fibers 2025;13:1–18. <https://doi.org/10.3390/fib13050052>.
- [21] Benfars M, Alioui A, Azalam Y, Kaddiri M, Mabrouki M. Impact of Ecological Thermal Roof Insulation on the Energy Efficiency of Conventional Buildings in a Semi-Arid Climate. Sol Energy Sustain Dev 2024;2024:78–88. https://doi.org/10.51646/jsesd.v14iSI_MSMS2E.401.
- [22] Deshmukh M, Yadav M. Optimizing Thermal Efficiency of Building Envelopes with Sustainable Composite Materials. Buildings 2025;15. <https://doi.org/10.3390/buildings15020230>.
- [23] Luna-León A, Gonzalez-Trevizo M, Bojorquez G, Romero Moreno R, Martínez-Torres K. Structural insulation panel system (SIP) as an alternative for cooling energy saving, decarbonization, and energy cost reduction in hot and dry climates. A simulation-based approach. Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff 2024;46:17267–92. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2431639>.
- [24] Guo F, Miao S, Xu S, Luo M, Dong J, Zhang H. Multi-Objective Optimization Design for Cold-Region Office Buildings Balancing Outdoor Thermal Comfort and Building Energy Consumption. Energies 2025;18. <https://doi.org/10.3390/en18010062>.