

Performance hygrothermique des enveloppes multicouches utilisant le matériau paille

Ghadie Tlaji^{*1}, Fabienne Penne¹, Salah Ouldboukhitine¹, Mohamad Ibrahim², Pascal Biwole^{1,3}

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

²Polytech'Lab, UPR UCA 7498, Université Cote d'Azur, 930 Route des Colles, 06903, Sophia Antipolis, France

³MINES Paris Tech, PSL Research University, PERSEE - Center for Processes, Renewable Energies and Energy Systems, CS 10207, 06 904 Sophia Antipolis, France

*ghadie.tlaji@uca.fr

RESUME. La paille demeure un matériau isolant alternatif prometteur pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments en raison de son faible coût, de sa grande disponibilité sous forme de coproduits céréaliers, de ses bonnes propriétés hygrothermiques et de sa faible énergie grise. L'objectif de cet article est d'évaluer les performances hygrothermiques de parois multicouches à base de paille, simulés à l'aide du logiciel WUFI, avec différentes conditions aux limites. Les critères d'évaluation retenus sont la teneur en eau totale, la vitesse de séchage, le risque de condensation, le développement de moisissures, et la quantité d'humidité selon les recommandations de l'ASHRAE. Les résultats montrent que les murs de paille recouverts de ciment et/ou de bois peuvent être utilisés dans les climats tropicaux et tempérés, les murs de paille avec lames d'air supplémentaires dans les climats secs, tandis que les murs de paille isolés sont mieux adaptés aux climats continentaux. On peut conclure que la performance du mur de paille dépend fortement des couches d'isolation thermique ajoutées à l'intérieur et à l'extérieur car elles affectent la capacité du matériau à sécher.

MOTS-CLÉS: Parois en paille, modélisation hygrothermique, risque de condensation

ABSTRACT. Straw is a viable alternative insulating material that improves building performance due to its low cost, widespread availability as cereal waste, strong hygrothermal qualities, and low embodied energy. The purpose of this paper is to assess the hygrothermal performance of multilayer straw walls under various boundary conditions by using WUFI models. The total water content, the dryness rate, the condensation risk, the mould growth, and the ASHRAE standard, are the assessment criteria for the numerical results. The analysis reveal that straw walls coated with cement and/or wood can be used in tropical and temperate climates, straw walls with extra air layers in dry climates, and straw walls with extra insulating in continental temperatures. The performance of the straw wall may be inferred to be significantly reliant on the thermal insulation layers applied inside and outside, since they affect the material's capacity to dry out.

KEYWORDS: Straw walls, hygrothermal simulation, condensation risk

1. INTRODUCTION

L'utilisation des coproduits agricoles dans le secteur du bâtiment demeure un sujet d'importance majeure pour des raisons écologiques, économiques et de performances énergétiques. La paille, utilisée depuis le XIXe siècle en raison de ses propriétés connues, présente une bonne isolation thermique (Vejielene 2012; Shea, Wall, and Walker 2013), une bonne résistance au feu (Džidić 2017), une bonne

résistance acoustique (Džidić 2017; Trabelsi and Kammoun 2018) et une faible énergie grise (González 2014). Cependant, l'utilisation de la paille peut mener à des problèmes d'humidité dans l'enveloppe (Wihan 2007) qui affecte la durabilité et la stabilité du bâtiment. Généralement, le développement de moisissures, la présence d'humidité, la mauvaise qualité de l'air intérieur, la perte de résistance thermique liée à la teneur en eau de l'isolant, la détérioration des matériaux ou encore la défaillance structurelle des murs porteurs résultent d'une mauvaise conception de l'enveloppe (Ibrahim et al. 2014). Douzane et al. 2016; Ashour, Georg, and Wu 2011 ont déterminé les propriétés hygrothermiques des murs de paille en surveillant la variation de température et d'humidité relative à travers le mur sur une courte période et en calculant les paramètres propres à sa capacité à stocker la chaleur. Lawrence, Heath, and Walker 2009; Gallegos-Ortega et al. 2017 ont concentré leurs recherches sur la caractérisation expérimentale du matériau. Cependant, aucune étude n'a rapporté le taux de séchage d'un mur et la croissance de moisissures au sein de sa structure pour proposer la meilleure structure de mur en fonction des conditions aux limites extérieures et intérieures. Le présent article évalue le comportement hygrothermique de quatre murs typiques multicouches à base de paille dans quatre conditions météorologiques différentes. Dans un premier temps, un modèle numérique de transferts transitoires de chaleur et de masse dans les parois est mis en place à l'aide du logiciel WUFI, l'un des outils de simulation hygrothermique les plus utilisés et validés. Ensuite, les propriétés pertinentes des matériaux et la composition des murs de paille sont collectés à partir de la littérature existante. Les conditions climatiques typiques sont sélectionnées en fonction de l'hétérogénéité de leurs précipitations saisonnières, des intensités d'irradiation solaire, ainsi que de la disponibilité de la production céréalière. Par la suite, les performances hygrothermiques des murs en paille sont étudiées. Les résultats sont présentés en fonction de différents critères d'évaluation, tels que la teneur totale en eau, le développement des moisissures, les pertes de chaleur, le taux de séchage, et le risque de condensation. Enfin, les recherches futures sont identifiées pour compléter les connaissances existantes.

2. APPROCHE DE MODELISATION

Un modèle numérique WUFI est utilisé pour prédire la réponse hygrothermique des murs multicouches soumises aux différentes conditions météorologiques. WUFI-2D est un programme de simulation hygrothermique qui analyse et effectue les transferts de chaleur et d'humidité dans des enveloppes de construction 2D (Künzel et al. 2000). L'équation de transfert d'énergie et l'équation de transfert d'humidité sont présentées dans les équations (1) et (2), respectivement.

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_P (\phi P_{sat})) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi + \delta_P \nabla (\phi P_{sat})) \quad (2)$$

H, T, w et ϕ sont respectivement l'enthalpie, la température, la teneur en eau et l'humidité relative. P_{sat} , λ , h_v , δ_P et D_ϕ sont respectivement la pression de saturation, la conductivité thermique, l'enthalpie d'évaporation de l'eau, la perméabilité à la vapeur d'eau et le coefficient de conduction liquide. Plusieurs chercheurs ont utilisé WUFI pour évaluer le comportement hygrothermique des murs. Mesa and Arenghi 2019 ont validé leur modèle WUFI en utilisant des résultats expérimentaux d'un mur de bottes de paille. Kalamees and Vinha 2003 ont comparé les résultats de 1D-HAM, MATCH et WUFI-2D avec les résultats expérimentaux pour évaluer la performance hygrothermique des structures en bois. Ces

comparaisons ont donné des résultats similaires, ce qui prouve que WUFI est un outil performant pour évaluer le comportement à l'humidité d'un mur.

3. ETUDE DE CAS

3.1. PROPRIETES DES MATERIAUX

La couche principale des murs est la paille d'une épaisseur de 360 mm ou 440 mm. La paille est recouverte des deux côtés par des couches de ciment et panneaux de bois. Les caractéristiques des matériaux sont extraites de la base de données WUFI, à l'exception de la paille qui sont collectées des différents travaux de recherche (Sabapathy and Gedupudi 2019; Costes et al. 2017; Douzane et al. 2016). Les fonctions hygrothermiques de la paille pour le stockage de l'humidité et sa conductivité thermique en fonction de la température et de l'humidité relative sont présentées dans la *Figure 1*.

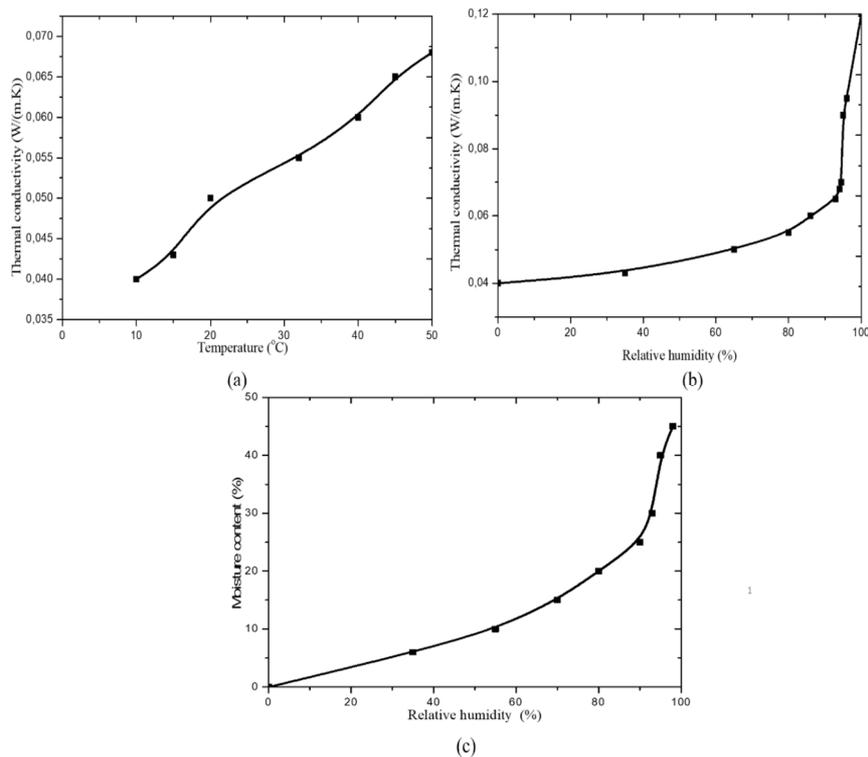


Figure 1 : Fonctions hygrothermiques montrant l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température (a), l'évolution de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative (b) et l'évolution de la teneur en humidité en fonction de l'humidité relative (c) pour le matériau de paille

3.2. COMPOSITIONS DES MURS

La construction en paille se présente sous différentes formes et structures en fonction du climat qui prévaut à l'emplacement du bâtiment. La *Figure 2* présente les structures de murs les plus utilisées dans le secteur actuel de la construction en paille. Dans tous les cas, ces murs sont orientés vers le nord où le rayonnement solaire est faible et la pluie battante est importante. Sachant que la condition initiale dans WUFI peut être modifiée selon chaque matériau, l'humidité relative et la température de la paille et du bois ont été considérées égales à 40 % et 20 °C, respectivement, alors que pour les autres matériaux elles ont été fixées à 80 % et 20 °C.

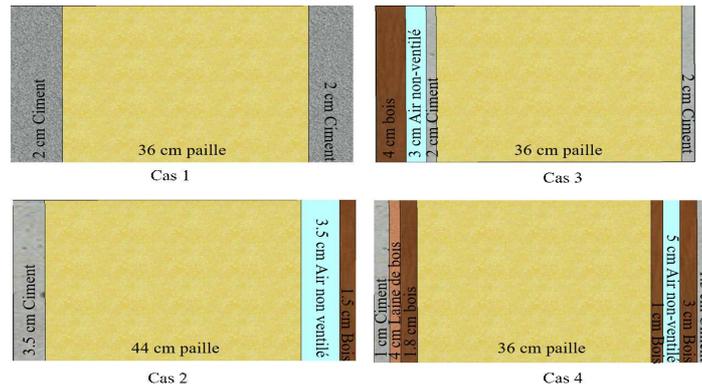


Figure 2 : Différentes compositions de quatre murs en paille

3.3. CLIMAT EXTERIEUR

Les quatre climats, Nice-France pour un climat méditerranéen-tempéré (Csa), Xinjiang-Chine pour un climat sec-froid (BWk), Arkhangelsk-Russie pour un climat continental-subarctique (Dfc) et Brasilia-Brésil pour un climat tropical (Aw), ont été choisis en se basant sur la classification de Köppen-Geiger (Kottek et al. 2006), et sur la disponibilité des céréales dans la région (Mundi 2019). Dans la région russe, la construction en paille a été lancée en 1996 par des organisations étrangères en tant que village environnemental expérimental. Ce type de construction s'est depuis développé en Russie (Athena and Steen 1996). Dans le domaine de la construction brésilienne, les bâtiments en paille ont été utilisés pour la première fois dans les années 1970, mais leur utilisation a diminué en 2009 et ne sont plus largement utilisés aujourd'hui (Punhagui et al. 2012). En 1998, les bâtiments en paille sont apparus dans l'industrie de la construction en Chine et depuis, plus de 600 structures en paille ont été construites (Adventist Development and Relief Agency International 2009). En France, chaque année, 500 nouveaux bâtiments en paille sont construits (RFCP, n.d.). La construction en bottes de paille suscite un intérêt croissant dans le secteur industriel, en raison de sa durabilité, de sa praticité et de son temps de construction réduit.

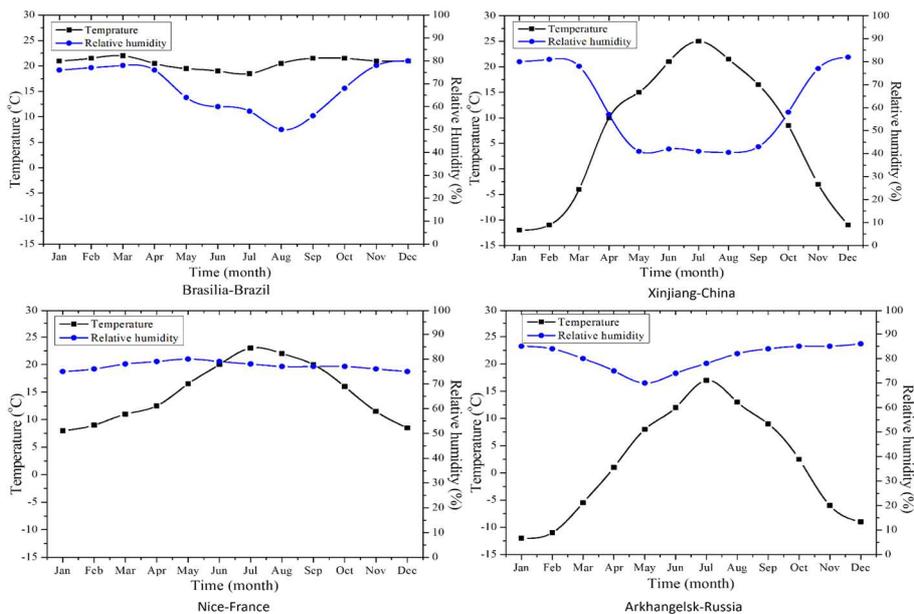


Figure 3: Température et humidité relative extérieure moyennes mensuelles à Brasilia-Brésil, Xinjiang-Chine, Nice-France et Arkhangelsk-Russie pour un an

Les fichiers de données météorologiques sont extraits de la bibliothèque météo EnergyPlus. La *Figure 3* montre les variations de la température et de l'humidité relative dans chaque ville durant une année. Il convient de noter que, à Brasilia décembre est le mois le plus humide tandis que juillet est le plus sec. A Xinjiang, le mois le plus humide est janvier et le mois le plus sec est juillet. Le mois le plus humide à Nice est novembre et le mois le plus sec est juillet. A Arkhangelsk, le mois le plus humide est février et le plus sec en août.

3.4. CLIMAT INTERIEUR

Les variations de la température et de l'humidité intérieures sont calculées respectivement à travers les équations (3) et (4). Ces équations sont fonction du temps t (en mois), et des constantes c et h qui dépendent des caractéristiques du climat choisi (voir *Tableau 1*). La température de l'air intérieur varie de 19 °C (en hiver) à 24 °C (en été) tandis que l'humidité relative intérieure varie entre 30 % (en hiver) et 60 % (en été). Ces variations sont basées sur les normes ASHRAE 2017 qui recommandent une température hivernale de 19 °C à 24 °C avec une humidité relative de 30-40 %, et une température estivale de 23 °C à 26 °C avec une humidité relative de 50-60 %.

$$T = 2.5 \sin(t - c) + 21.5 \quad (3)$$

$$RH = 10 \sin(t - h) + 50 \quad (4)$$

Tableau 1 : Les valeurs des constantes c et h pour chaque pays

Country	c	h
Brazil	2.57	-2
China	1.57	-1.57
Nice	2	0.57
Russia	1.57	-2.57

3.5. CRITERE HYGROTHERMIQUE

Dans la présente étude, l'évaluation hydrique se base sur les critères de teneur en eau totale (TWC), taux de séchage (DR), risque de condensation (CR), développement de moisissures (MG), et de la recommandation ASHRAE (ASH). Ces critères ont été utilisés par plusieurs auteurs (Ibrahim et al. 2014; Sedlbauer 2002) pour évaluer les performances hygrothermiques des murs. TWC montre la capacité du mur à sécher en quatre ans en comparant la teneur en eau initiale et finale. Le mur passe ce critère si la valeur finale est inférieure à la valeur initiale. DR calcule la différence entre la teneur en humidité finale et initiale. Un taux de séchage plus élevé signifie une plus grande capacité de séchage. CR est le pourcentage de temps pendant lequel la température de surface tombe en dessous du point de rosée. La condensation apparaît sur la surface intérieure si la température du matériau est inférieure à la température du point de rosée de l'air intérieure. MG consiste à tracer l'HR d'un matériau en fonction de la température à un instant donné. Les moisissures peuvent se développer lorsque les conditions de HR et T d'un mur atteignent ou dépassent la limite des isoplèthes (LIM). ASH prévient les problèmes de moisissure en limitant la quantité d'humidité dans tous les matériaux et les surfaces à l'exception des couches externes (Tenwolde 2008). La norme exige sur une période de 30 jours une HR de surface moyenne inférieure à 80 % dans des enveloppes ayant une température de surface moyenne comprise entre 5 °C et 41 °C.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. TENEUR EN EAU

La *Figure 4* compare la variation moyenne quotidienne de la teneur en eau totale pour les deuxième, troisième et quatrième types de mur sous le climat Russe et Brésilien sur quatre ans. Le TWC dans le cas 3-R passe progressivement de 15 % à 55 % en 1200 jours en raison de la sursaturation du mur pendant l'hiver et de l'incapacité à sécher pendant l'été froid. Le problème est causé par la couche d'air extérieur au mur. L'augmentation est accompagnée d'un mouvement d'oscillatoire lié au phénomène de sorption-désorption pendant les périodes hivernales et estivales. Pour le cas 3-B, le TWC diminue progressivement (avec des oscillations hiver-été) de 18 % à 8 % ce qui signifie que le mur s'assèche suffisamment durant l'été. Les cas 2-B et 2-R, en revanche, montrent des évolutions quasi-périodiques indiquant que l'équilibre dynamique est atteint en raison de l'épaisseur de paille plus élevée (environ 440 mm contre 360 mm pour les autres murs). La valeur maximale dans le cas 4-B est d'environ 20 %, puis diminue progressivement avec le séchage de l'enveloppe. La variation TWC du cas 4-R ne correspond pas aux cas précédents puisque la courbe est plate et sans oscillations (diminue de 20 % à 10 %). Ce comportement est principalement dû au facteur élevé de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau du bois couvrant la paille ce qui réduit le transfert d'humidité à travers la paille. Cette étude montre ainsi que des problèmes de séchage sont présents dans le premier et le troisième cas sous le climat russe qui est caractérisé par un hiver très froid (-30 °C).

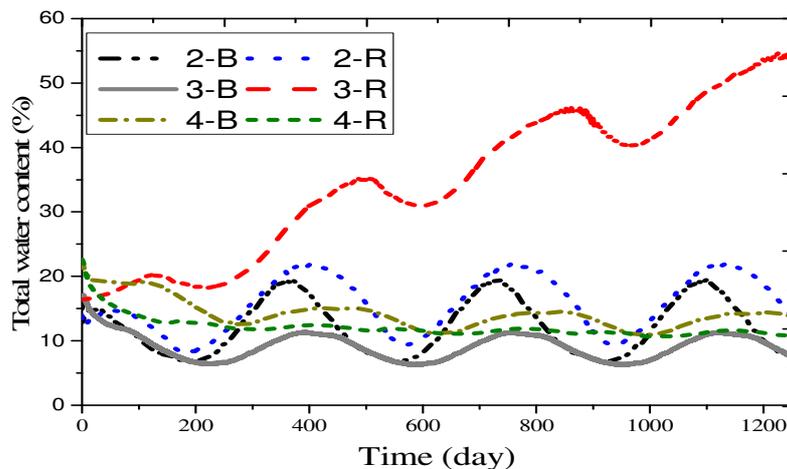


Figure 4: Variation quotidienne moyenne de la teneur en eau totale pour les murs deux, trois et quatre sur quatre ans sous le climat Arkhangelsk-Russie (R) et Brasilia-Brésil (B)

4.2. TAUX DE SECHAGE

DR est la différence entre la teneur en eau initiale (TWC_i) et la teneur en eau finale (TWC_f) au bout de quatre ans divisée par la teneur en eau initiale. Les taux négatifs signifient que le mur absorbe l'humidité au fil des ans tandis que les taux positifs signifient que le mur rejette progressivement l'humidité au cours de la période étudiée. Pour toutes les conditions météorologiques du cas 4, les taux sont positifs comme présenté dans la *Figure 5*. Ce type de configuration offre une isolation thermique élevée, ce qui augmente la température moyenne dans la paroi, et donc retarde la saturation. Dans les autres cas, le problème de séchage est constaté dans les conditions météorologiques continentales subarctiques de la Russie, en raison des faibles températures extérieures. Dans les climats froids, la vitesse de séchage des murs diminue en raison de la faible différence entre la pression de saturation et

la pression de vapeur d'eau qui est contrôlée par la température. En effet, de faibles températures induisent une faible pression de vapeur d'eau saturante.

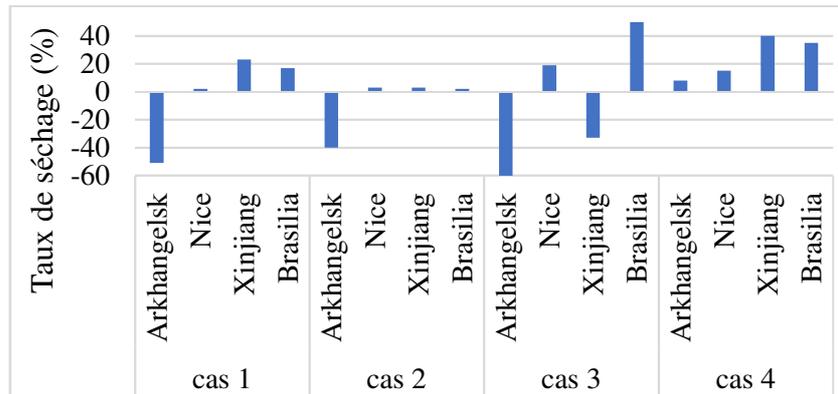


Figure 5: Taux de séchage des murs sous toutes les conditions climatiques sur quatre ans

4.3. RISQUE DE CONDENSATION

La Figure 6 montre le pourcentage de temps où le CR se produit dans les murs. Les résultats indiquent que le risque de condensation se produit dans toutes les structures pour le climat russe. Le CR s'explique par le contact direct du mur avec l'environnement froid qui entraîne des températures de surface intérieures basses, ou par l'humidité relative élevée dans le mur. Ce fait est clair puisqu'Arkhangelsk-Russie a une température extérieure et une HR maximales d'environ 30 °C et 100 % respectivement, et une température extérieure et une HR minimales d'environ -30 °C et 23 %. De plus, l'isolation extérieure de l'enveloppe du bâtiment affecte le CR puisque les valeurs les plus basses sont obtenues pour le cas 4 pour tous les climats. Ces couches aident à élever la température des couches intérieures et des surfaces au-dessus de la température du point de rosée de la pièce pour éviter le risque de condensation, en particulier pendant l'hiver.

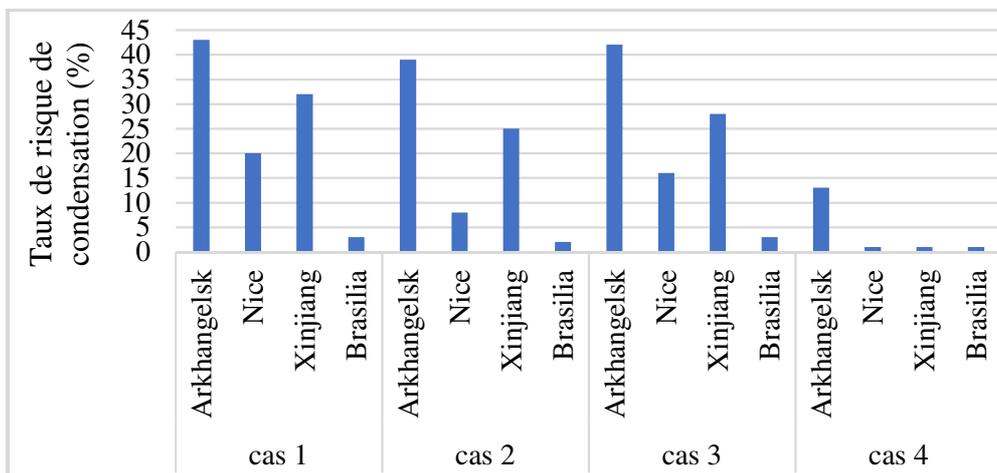


Figure 6: Le pourcentage de temps où la condensation se produit pour tous les cas sur quatre ans

4.4. DEVELOPPEMENT DE MOISSURES

La Figure 7 compare les graphiques isoplèthes des deux derniers types de mur sous les conditions climatiques continentales subarctiques russes (3-R et 4-R). Les deux cas correspondent à des taux de séchage faibles comme le montre la Figure 5. Dans le cas 3, les conditions hygrothermiques à la surface intérieure croisent les deux courbes Lim 1 et Lim 2 tandis que dans le cas 4, elles restent en dessous des

courbes. Par conséquent, des problèmes de développement de moisissures se produiront dans le cas 3. Pour les autres cas, les résultats montrent un risque de croissance de moisissures uniquement pour le premier cas dans les conditions climatiques subarctiques continentales russes.

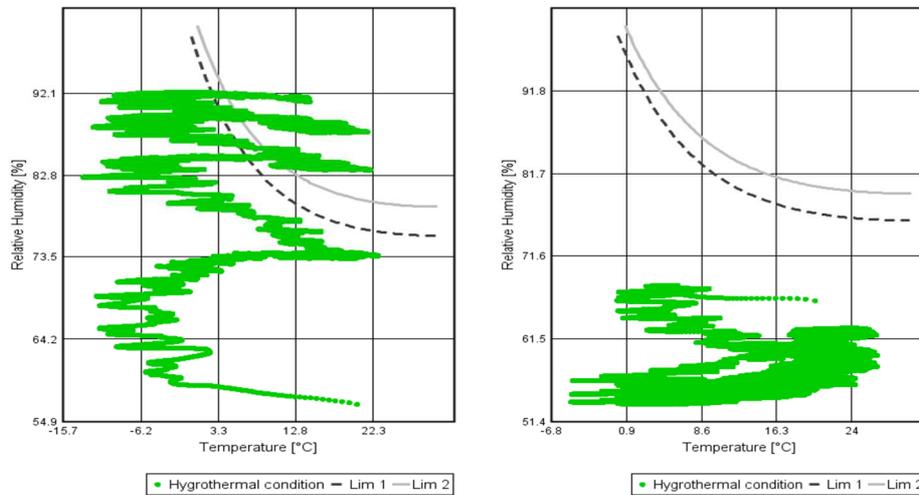


Figure 7: Les isoplèthes du cas 3 (à gauche) et du cas 4 (à droite) testés sous les conditions climatiques d'Arkhangelsk-Russie

4.5. CRITERE ASHRAE

Le Tableau 2 résume les résultats concernant le critère ASH des cas sélectionnés. Il a été observé que le critère ASH n'est pas respecté 30 %, 28 %, 73 % et 2 % du temps respectivement pour les murs un, deux, trois, et quatre sous le climat Arkhangelsk-Russie où l'HR dépasse la limite de 80 % après quatre ans. Le seul risque est dans le climat subarctique continental russe puisque les conditions extérieures et intérieures affectent l'humidité du mur. Pour les mêmes raisons que celles expliquées pour le critère DR, ces murs ont une humidité relative élevée.

Tableau 2 : Résultats de la norme ASHRAE (ASH) appliquée aux murs en paille

Critère de ASH	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Arkhangelsk -Russie	Risque (30 %)	Risque (28 %)	Risque (73 %)	Risque (2 %)
Nice-France	Pas de risque	Risque (2 %)	Pas de risque	Pas de risque
Xinjiang-Chine	Pas de risque	Pas de risque	Pas de risque	Pas de risque
Brasilia- Brésil	Pas de risque	Pas de risque	Pas de risque	Pas de risque

5. CONCLUSION

Les bottes de paille sont de plus en plus utilisées comme matériau de construction pour des raisons écologiques et économiques. Elles ont des performances d'isolation élevées et sont faciles à mettre en œuvre. Les propriétés hygroscopiques de la paille influencent les performances du mur et peuvent conduire à sa dégradation. Cette étude évalue le comportement hygrothermique de différentes parois de paille multicouches sous différentes conditions aux limites en utilisant un modèle WUFI. Le premier mur (cas 1) est adapté aux climats méditerranéen (Csa) et tropical (Aw). Le deuxième mur (cas 2) convient aux climats désertiques froids (BWk). Le troisième mur (cas 3) convient au climats méditerranéen (Csa) et tropical (Aw). Le quatrième mur (cas 4) convient à tous les climats, y compris le climat continental subarctique (Dfc). Ce type de murs respecte le critère ASH sous tous les climats et a un taux de séchage et un risque de condensation d'environ 10 % sous le climat russe continental

subarctique. Pour compléter cette étude, les murs doivent être comparés d'un point de vue énergétique et écologique en calculant les charges de chauffage et de refroidissement de l'ensemble du bâtiment. Une telle étude conduira à un compromis entre la performance hygrothermique de l'enveloppe et la performance énergétique du bâtiment pour associer la structure murale idéale au climat approprié.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Adventist Development and Relief Agency International. 2009. "ADRA Straw Bale Housing Becomes an Eco-Friendly Solution for Post-Earthquake China." Reliefweb. August 4, 2009. <https://reliefweb.int/report/china/adra-straw-bale-housing-becomes-eco-friendly-solution-post-earthquake-china>.
- Ashour, Taha, Heiko Georg, and Wei Wu. 2011. "Performance of Straw Bale Wall: A Case of Study." *Energy and Buildings* 43 (8): 1960–67. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.001>.
- ASHRAE. 2017. "ANSI/ASHRAE (2017) Standard 55: 2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy." www.ashrae.org.
- Athena, and Bill Steen. 1996. "Building a Home Using Straw Bale Construction." MOTHER EARTH NEWS. 1996. <https://www.motherearthnews.com/green-homes/straw-bale-construction-zmaz95djzgoe>.
- Costes, Jean-Philippe, Arnaud Evrard, Benjamin Biot, Gauthier Keutgen, Amaury Daras, Samuel Dubois, Frédéric Lebeau, and Luc Courard. 2017. "Thermal Conductivity of Straw Bales: Full Size Measurements Considering the Direction of the Heat Flow." *Buildings* 7 (11). <https://doi.org/10.3390/buildings7010011>.
- Douzane, Omar, Geoffrey Promis, Jean Marc Roucoult, Anh Dung Tran Le, and Thierry Langlet. 2016. "Hygrothermal Performance of a Straw Bale Building: In Situ and Laboratory Investigations." *Journal of Building Engineering* 8: 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.10.002>.
- Džidić, Sanin. 2017. "Fire Resistance of the Straw Bale Walls." In *5th International Conference, Contemporary Achievements in Civil Engineering 21. April 2017*. Subotica, Serbia. <https://doi.org/10.14415/konferencijagfs2017.044>.
- Gallegos-Ortega, Ricardo, Tonatiuh Magaña-Guzmán, Jaime A. Reyes-López, and M. Socorro Romero-Hernández. 2017. "Thermal Behavior of a Straw Bale Building from Data Obtained in Situ. A Case in Northwestern México." *Building and Environment* 124 (November): 336–41. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.015>.
- González, Alejandro D. 2014. "Energy and Carbon Embodied in Straw and Clay Wall Blocks Produced Locally in the Andean Patagonia." *Energy and Buildings* 70 (February): 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.003>.
- Ibrahim, Mohamad, Etienne Wurtz, Pascal Henry Biwole, Patrick Achard, and Hebert Sallee. 2014. "Hygrothermal Performance of Exterior Walls Covered with Aerogel-Based Insulating Rendering." *Energy and Buildings* 84 (December): 241–51. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.039>.
- Kalamees, Targo, and Juha Vinha. 2003. "Hygrothermal Calculations and Laboratory Tests on Timber-Framed Wall Structures." *Building and Environment* 38 (5): 689–97. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00207-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00207-X).
- Kottek, Markus, Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, and Franz Rubel. 2006. "World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated." *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3): 259–63. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- Künzel, HM, A Holm, V Eithner, and T Schmidt. 2000. "WUFI-2D: Program Description." Fraunhofer-Institut for Building Physics, Holzkirchen.

- Lawrence, Mike, Andrew Heath, and Pete Walker. 2009. "Determining Moisture Levels in Straw Bale Construction." *Construction and Building Materials* 23 (8): 2763–68.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.011>.
- Mesa, Alessandra, and Alberto Arengi. 2019. "Hygrothermal Behaviour of Straw Bale Walls: Experimental Tests and Numerical Analyses." *Sustainable Buildings* 4 (3): 10.
<https://doi.org/10.1051/sbuild/2019003>.
- Mundi, Index. 2019. "Cereal Production (Metric Tons) by Country." Index Mundi. December 28, 2019. <https://www.indexmundi.com/facts/indicators/AG.PRD.CREL.MT>.
- Punhagui, Katia R.G., Érica F. Campos, José M.B. González, and Vanderley M. John. 2012. "Prospects for the Use of Wood in Residential Construction in Brazil - First Results." *Key Engineering Materials* 517 (April 2015): 247–60.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.517.247>.
- RFCP. n.d. "L'âge de Paille, Retour Sur Trois Périodes Marquantes de La Construction Paille." Historique/RFCP. <https://rfcp.fr/historique/>.
- Sabapathy, Karthik A., and Sateesh Gedupudi. 2019. "Straw Bale Based Constructions: Measurement of Effective Thermal Transport Properties." *Construction and Building Materials* 198: 182–94.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.256>.
- Sedlbauer, Klaus. 2002. "Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation." *THERMAL ENVIRONMENTAL and Building Science* 24 (May). <https://doi.org/10.1106/109719602024093>.
- Shea, Andy, Katharine Wall, and Pete Walker. 2013. "Evaluation of the Thermal Performance of an Innovative Prefabricated Natural Plant Fibre Building System." *Building Services Engineering Research and Technology* 34 (4): 369–80. <https://doi.org/10.1177/0143624412450023>.
- Tenwolde, Anton. 2008. "ASHRAE Standard 160P __ Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings."
- Trabelsi, Abderraouf, and Zied Kammoun. 2018. "Experimental Evaluation of Acoustic Characteristics of Straw Walls." *Canadian Acoustics* 46 (2): 49–56. <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/3185>.
- Vejeliene, Jolanta. 2012. "Processed Straw as Effective Thermal Insulation for Building Envelope Constructions." *Engineering Structures and Technologies* 4 (3): 96–103.
<https://journals.vgtu.lt/index.php/EST/article/view/4715/4037>.
- Wihan, Jakub. 2007. "Humidity in Straw Bale Walls and Its Effect on the Decomposition of Straw." University of East London School of Computing and Technology Londbridge Road.
https://www.enertech.fr/pdf/45/humidite_murs_paille.pdf.