

Résumé détaillé en français

1. Contexte

Aujourd'hui, les principaux produits d'isolation thermique sont fabriqués à partir de matériaux inorganiques conventionnels, tels que la laine de verre et la laine de roche, en raison de leurs propriétés thermiques prédominantes. Cependant, leur production consomme une grande quantité de ressources non renouvelables et provoque l'émission de gaz à effet de serre, ce qui conduit finalement au changement climatique et à la pollution de l'environnement. En outre, ils ne sont généralement pas soumis à une dégradation biologique. Par conséquent, un sujet d'intérêt majeur dans le secteur de la construction de bâtiments est de remplacer les matériaux d'isolation conventionnels par des matériaux d'isolation naturels, qui ont un faible impact sur l'environnement tout au long de leur cycle de vie. Le traitement de la paille de riz est un problème largement controversé. La conversion des déchets de paille de riz en produits d'isolation biosourcés pour les bâtiments constitue une approche rentable et écologique. Les panneaux isolants en paille de riz disponibles sur le marché ont de bonnes propriétés hygrothermiques. Cependant, ils utilisent des liants non renouvelables et non dégradables, comme les fibres de polyester. Par conséquent, le développement de matériaux isolants entièrement biosourcés à partir de déchets de paille agricole suscite l'intérêt de l'industrie. Dans cette thèse, le potentiel de l'utilisation de la paille de riz et de liants naturels est exploré pour développer des matériaux composites isolants innovants pour les enveloppes de bâtiments. La performance hygrothermique des matériaux composites doit être étudiée à l'échelle du matériau et du mur pour évaluer leur efficacité. Dans un premier temps, les matériaux entièrement biosourcés issus de fibres de paille de riz et de liants naturels présentant des performances hygrothermiques compétitives sont développés. Le problème de la solubilité dans l'eau des matériaux composites doit être étudié et résolu. Diverses formulations peuvent être conçues et caractérisées pour étudier l'impact de différents facteurs (par exemple, la taille des

fibres, le type de liant et le ratio de liant) sur les propriétés hygrothermiques. Ensuite, le comportement hygrothermique du matériau développé sous diverses conditions limites est étudié à l'échelle du mur. Ensuite, l'efficacité d'un modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité (CHM) pour simuler le comportement hygrothermique du matériau proposé est validée. Enfin, le modèle CHM est amélioré en prenant en compte le transport d'eau liquide. Le coefficient de transfert de l'eau liquide est estimé en appliquant la technique d'identification inverse.

2. Revue de la littérature sur les propriétés de l'isolation en paille pour les bâtiments

Un examen des informations disponibles sur l'isolation en paille pour les bâtiments est effectué. Les méthodes de caractérisation et les normes des propriétés, notamment l'isolation thermique, l'humidité et la durabilité, sont résumées. Le contexte général de la paille, y compris sa microstructure et sa composition chimique, est présenté. Les isolants en paille sont classés en deux catégories : les bottes de paille et les composites de paille. Les balles de paille sont produites en utilisant des machines à balles pour collecter et comprimer la paille déposée après la récolte des cultures. Les composites de paille sont préparés en moulant des fibres de paille avec des liants alternatifs.

Les études disponibles sur les propriétés des bottes de paille et des composites de paille, notamment l'isolation thermique, l'humidité et la durabilité, sont examinées en détail et discutées en tenant compte de différents facteurs, tels que la densité et la taille des fibres. La conductivité thermique est la propriété la plus importante qui caractérise l'efficacité d'un matériau d'isolation thermique. Les valeurs de conductivité thermique des balles de paille présentent une grande variabilité, de l'ordre de 0,03 à 0,08 W/(mK), qui peut être causée par divers facteurs, notamment les types de paille, la densité des balles, l'orientation du flux de chaleur, la température ambiante et l'humidité relative. Parallèlement, l'augmentation de la teneur en fibres et de la fraction des grosses fibres dans les composites de paille a permis de réduire efficacement leur conductivité

thermique. On a observé que les propriétés d'humidité des balles de paille et des composites de paille sont influencées par divers facteurs. Les balles de paille à extrémités ouvertes ont pu atteindre l'humidité d'équilibre plus rapidement avec l'environnement que les balles de paille à extrémités fermées. On a observé que la perméabilité à la vapeur d'eau des balles de paille et des composites de paille dépendait de leur densité. Cependant, les types de paille et la densité n'ont pas d'impact significatif sur l'absorption d'humidité des composites de paille. En outre, des facteurs tels que la teneur en fibres, la nature hydrophile des fibres, la taille des fibres, la porosité et l'épaisseur ont affecté le pouvoir tampon de l'humidité et l'absorption d'eau. La durabilité d'un matériau est un aspect crucial pour assurer la longévité du bâtiment. Des conditions hygrothermiques favorables aux micro-organismes entraînent le développement de moisissures, ce qui conduit à la dégradation de la paille. Il est généralement recommandé que le taux d'humidité à l'exploitation ne dépasse pas 25 % pour éviter la dégradation des bottes de paille.

En général, la paille est une matière première prometteuse pour l'obtention de produits d'isolation thermique rentables et écologiques, dotés de bonnes propriétés physiques et hygrothermiques. Les travaux de recherche actuels sur les isolants thermiques composites à base de paille utilisent généralement des fibres de polyester, des résines synthétiques et des matériaux cimentaires inorganiques comme liants. Peu d'études portent sur les isolants thermiques composites en paille entièrement biosourcés, dans lesquels les fibres de paille sont liées par des adhésifs naturels. De plus, la solubilité dans l'eau et l'absorption d'eau sont rarement rapportées. La solubilité dans l'eau est une propriété importante qui doit être étudiée car le matériau peut être mis en contact avec de l'eau, en particulier dans des conditions d'exploitation extérieures. De même, l'effet de différents facteurs sur les propriétés hygrothermiques de ces matériaux n'a pas été étudié de manière exhaustive. De plus, la performance hygrothermique de l'isolation thermique composite de paille n'est pas inconnue à l'échelle du mur. Par conséquent, cette thèse vise à développer des matériaux d'isolation thermique composite en paille entièrement biosourcés pour les bâtiments, qui sont dérivés de

fibres de paille de riz et de liants naturels. Les propriétés hygrothermiques des matériaux composites développés en tenant compte de différents facteurs sont caractérisées et évaluées par différents tests expérimentaux à l'échelle du matériau et du mur.

3. Développement et caractérisation de matériaux d'isolation à base de paille de riz et de liants naturels

3.1. Traitement composite de la paille de riz

Deux types de fibres de paille de riz (désignées par RS1 et RS2) avec une taille de fibre différente ont été fournis par l'isolation FBT (Dagnex, France). La distribution de la taille des fibres de la RS1 et de la RS2 est déterminée par le tamisage mécanique. Les résultats ont montré que le RS1 avait un pourcentage plus élevé de petites fibres (< 2 mm) par rapport au RS2.

Le liant adhésif a été obtenu en dissolvant la poudre d'alginate/chitosan dans de l'eau distillée sous agitation continue à 250 rpm pendant 30 min. Ensuite, les fibres de paille de riz ont été mélangées au liant adhésif à l'aide d'une pale à action forcée à 20 tours par minute pendant 2 minutes. Ensuite, le mélange humide a été placé dans un polystyrène extrudé de dimensions 30×30×4 cm³ et l'ensemble a été compacté en utilisant un poids de 40 kg pendant 4 h. Enfin, les composites ont été séchés au four à 50 °C pendant 65 h afin d'accélérer le processus de séchage. Notez que pour les composites à base d'alginate, une méthode de réticulation par ions calcium a été appliquée pour éviter les problèmes de solubilité dans l'eau. Après l'immersion, le matériau composite a été égoutté pendant 10 minutes, puis séché au four à 50 °C pendant 48 heures.

L'influence de la taille des fibres, du ratio de liant et du type de liant sur l'isolation thermique et les propriétés d'humidité a également été étudiée. Deux types de fibres, à savoir RS1 et RS2, ont été utilisés. Trois rapports de liant, 0.08, 0.16 et 0.24 pour les

composites à base d'alginate et 0.08, 0.13 et 0.175 pour les composites à base de chitosan ont été utilisés, respectivement. Afin d'évaluer l'efficacité de la méthode de réticulation proposée pour les composites à base d'alginate, un alginate de sodium pur et un mélange de 83 % en poids d'alginate de sodium, 15 % en poids de CaSO_4 et 2 % en poids de citrates de sodium ont également été utilisés comme liants pour comparaison.

3.2. Méthodes de caractérisation

Un test de solubilité dans l'eau a été réalisé pour les formulations A00, A01 et A5 afin d'évaluer l'efficacité de la méthode de réticulation proposée dans cette étude. Ces trois composites ont été immergés dans l'eau pendant 24 h. Une caméra a été utilisée pour enregistrer en continu l'état des échantillons composites. La conductivité thermique (λ) et l'effusivité thermique (β) ont été mesurées pour les différents types de fibres et de composites à l'état sec. La perméabilité à la vapeur d'eau des composites a été mesurée par coupelle humide selon la norme ISO 12572. Les isothermes d'adsorption-désorption des différents types de fibres et composites selon la norme EN ISO 12571 en utilisant la méthode de la solution saline saturée. La valeur théorique du tampon d'humidité a été calculée par les équations du rapport Nordtest. L'absorption d'eau des composites a été déterminée en immergeant partiellement les échantillons dans l'eau avec leur face inférieure (10 mm) sous le niveau d'eau selon la norme EN 1609 pour différents intervalles (c'est-à-dire 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 24 h, 48 h et 76 h). La croissance des moisissures dans les composites à base d'alginate et de chitosane a été étudiée en les exposant à des niveaux élevés d'humidité relative à 20 °C. Deux niveaux d'humidité relative (y compris 93 %) ont été utilisés pour l'étude des moisissures. Deux niveaux d'humidité relative (93% RH et 97% RH) ont été appliqués et la croissance des moisissures sur la surface des composites a été capturée par inspection visuelle avec une caméra.

3.3. Conclusion

Tous les composites peuvent être considérés comme des isolants avec des valeurs de conductivité thermique allant de 0.038 à 0.047 W/(m·K) à l'état sec. Une diminution de la taille des fibres et une augmentation du taux de liant ont entraîné une augmentation de la conductivité thermique des composites. De plus, la conductivité thermique de ces composites a montré une gamme de valeurs plus faible par rapport aux matériaux de construction isolants en paille existants. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau des composites à base de chitosan a montré des valeurs plus élevées que celles des composites à base d'alginate. Une taille de fibre plus petite et un rapport de liant plus grand ont également entraîné des facteurs de résistance à la vapeur d'eau plus élevés. Les liants, même en faible quantité, ont eu une influence sur l'isotherme de sorption et l'absorption d'eau. Les composites à base d'alginate avaient une capacité de sorption d'humidité plus élevée que les composites à base de chitosan. Cependant, le type de fibre et le ratio de liant semblent avoir une influence négligeable sur la capacité d'adsorption des matériaux dans cette étude. Le type de liant et l'humidité relative ont eu des impacts sur les types, la quantité et la vitesse de contamination des moisissures à la surface des composites.

4. Étude expérimentale des performances hygrothermiques d'un panneau isolant en alginate de paille de riz

4.1. Matériel et méthodes

Une installation expérimentale, composée de deux compartiments entre lesquels la paroi a été serrée, a été utilisée pour simuler différentes conditions limites. La température des deux compartiments est régulée par des échanges thermiques connectés respectivement à un cryostat et à une chambre climatique en mode distant. L'humidité relative des deux compartiments est régulée à l'aide d'une solution saline (KCl) et d'un dessiccant (CaCl₂).

La formulation A5, c'est-à-dire un matériau isolant à base d'alginate de paille de riz de type RS2 avec un ratio de liant de 0.16, a été choisie pour étudier le comportement hygrothermique à l'échelle du mur. Un procédé spécial a été mis en œuvre pour placer trois capteurs à l'intérieur du panneau mural afin de surveiller la température et l'humidité relative à différentes profondeurs dans l'épaisseur du mur. Les positions obtenues étaient de 28 mm, 36 mm et 64 mm de l'intérieur à l'extérieur du mur.

Différentes conditions aux limites, notamment des conditions isothermes, non isothermes et dynamiques, ont été étudiées. Dans le scénario isotherme, la température dans les deux compartiments a été fixée à 25 °C pendant 4 jours. Comme le gradient de température est éliminé, cette expérience permet d'analyser l'influence du transport et de la sorption de l'humidité sur le comportement thermique de la paroi. Dans le scénario non isotherme, la température interne a été fixée à 25 °C et la température externe à 5 °C et l'essai a duré 2 jours. Cette expérience permet d'analyser l'impact du gradient de température sur le transport de l'humidité dans le mur. Dans le scénario dynamique, la température interne a été fixée à 25 °C, tandis que la température externe a fluctué de 5 °C à 15 °C avec une amplitude de 10 °C pour un cycle de 24 h. Le test a duré 4 jours. Les résultats expérimentaux permettent d'analyser le comportement hygrothermique du matériau isolant soumis à des conditions dynamiques.

4.2. Conclusion

L'effet de couplage de la chaleur et de l'humidité dans le panneau mural a été analysé et discuté. Les résultats obtenus dans des conditions isothermes ont montré que le transport de l'humidité avait un impact sur les changements de température dus à la sorption de l'humidité. La condensation/évaporation de la vapeur d'eau liée au stockage de l'humidité et à la diffusion de l'humidité a induit une augmentation/diminution de la température. Les résultats obtenus dans des conditions non isothermes indiquent que le transport de l'humidité peut être affecté par un gradient de température. Lors de l'essai dynamique, le matériau a présenté un déphasage thermique élevé comparable à celui de l'isolation en fibre de bois, contribuant ainsi à un environnement intérieur confortable.

En outre, les résultats obtenus indiquent que le matériau est un matériau bio-sourcé intéressant pour l'absorption et la libération de l'humidité.

5. Modélisation numérique du transfert de chaleur et d'humidité dans un panneau isolant en alginate de paille de riz

5.1. Modélisation numérique

Le modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité (CHM) utilisé dans cette thèse suit la norme EN ISO 15026. Pour simplifier, certaines hypothèses sont faites pour le modèle CHM comme suit:

- (1) Le matériau est supposé être homogène;
- (2) Un équilibre local thermique et d'humidité existe au sein du matériau;
- (3) La vapeur d'eau est considérée comme un gaz idéal;
- (4) La capacité de sorption de l'humidité est indépendante de la température;
- (5) Le transfert de chaleur et le transfert d'humidité sont considérés comme unidimensionnels

L'équation de transfert d'humidité est la suivante:

$$\rho_m \xi \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\delta_p \varphi \frac{dP_{v,sat}}{dT} + K_l R_v \ln(\varphi) \right) \frac{\partial T}{\partial x} + \left(\delta_p P_{v,sat} + K_l \rho_l R_v \frac{T}{\varphi} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] \quad (5.1)$$

Où ρ_m est la densité sèche; δ_p (kg/(m·s·Pa)) est la perméabilité à la vapeur d'eau; K_l (kg/(m·s·Pa)) est la perméabilité à l'eau liquide; P_v (Pa) est la pression de vapeur partielle; $P_{v,sat}$ est la pression de vapeur d'eau saturée à la température expérimentale (Pa); φ (-) est l'humidité relative; ρ_l (kg/m³) est la densité de l'eau liquide; R_v (J/(kg·K)) est la constante gazeuse de la vapeur d'eau et T (K) est la température thermodynamique; u (kg/kg) est la teneur en humidité de la masse; $\xi = \partial u / \partial \varphi$ représente la pente de l'isotherme de sorption.

La conservation de la chaleur dans le matériau peut être exprimée par:

$$(\rho_m C_{p,m} + w C_{p,l}) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \left(\delta_p \left(\varphi \frac{\partial P_{v,sat}}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + P_{v,sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) \quad (5.2)$$

Où λ (W/(m·K)) est la conductivité thermique du matériau; w (kg/m³) est la teneur en humidité; $C_{p,m}$ (J/(kg·K)) est la capacité thermique spécifique de masse du matériau; $C_{p,l}$ (J/(kg·K)) est la capacité thermique spécifique de masse de l'eau; L_v (J/kg) est la chaleur latente d'évaporation.

5.2. Comparaison avec le modèle de transfert thermique transitoire

Les propriétés thermiques et hygriques obtenues au chapitre 3 ont été utilisées comme paramètres d'entrée. La fonction isotherme de sorption était un ajustement GAB des valeurs moyennes des isothermes d'adsorption et de désorption. La perméabilité à la vapeur d'eau a été supposée être linéairement liée à l'humidité relative sur la base des résultats de la tasse sèche et de la tasse humide.

Le modèle CHM utilisé dans ce chapitre ne prend en compte que le transport de l'humidité en phase vapeur et ignore le transport de l'eau liquide. Les panneaux muraux isolants en alginate de paille de riz étudiés expérimentalement dans des conditions isothermes, non isothermes et dynamiques sont visés. Les conditions aux limites dans les calculs numériques étaient la température de surface et l'humidité relative importées de l'expérience. Les valeurs initiales de température et d'humidité relative étaient les mesures moyennes aux trois emplacements (c'est-à-dire $x = 28, 36, 64$ mm). Par conséquent, la température et l'humidité relative initiales étaient de 25.6°C et 58% pour la condition isotherme, 24.8°C et 50.9% pour la condition non isotherme, 24.6°C et 59% pour la condition dynamique. Un modèle de transfert thermique transitoire (TH) a été utilisé à des fins de comparaison pour démontrer la nécessité de coupler le transfert thermique et le transfert d'humidité. Les deux modèles ont été résolus en utilisant la méthode des éléments finis intégrée dans le logiciel COMSOL Multiphysics.

Les résultats ont montré que le modèle CHM était plus précis pour prédire le comportement thermique que le modèle TH. En comparant les modèles entre eux, le

flux de chaleur sensible dans la surface intérieure peut être surestimé et le flux de chaleur total dans la surface intérieure peut être sous-estimé par le modèle TH par rapport au modèle CHM.

6. Détermination inverse de la perméabilité à l'eau liquide basée sur des mesures dynamiques et des optimisateurs

6.1. Approche de modélisation inverse

La perméabilité à l'eau liquide K_l a été considérée comme une propriété inconnue à identifier à partir des variations de température et d'humidité relative aux trois emplacements de la paroi dans des conditions dynamiques, qui ont été présentées au chapitre 4. Différents algorithmes d'optimisation, dont Fmincon, l'optimisation par essaims de particules et l'algorithme génétique, sont sélectionnés pour rechercher les solutions possibles de K_l .

Pour des raisons de simplicité, le K_l a été supposé être une fonction linéaire de la teneur en humidité, qui est la suivante:

$$K_l = (a \cdot w) \cdot 10^{-17} \quad (6.1)$$

Où w (kg/m^3) représente la teneur en humidité du matériau; a représente le paramètre sans dimension à estimer, avec une plage de 0 à 100.

Pour évaluer les différentes solutions, une fonction multi-objectifs comme la somme de l'erreur quadratique entre les mesures (y compris la température et l'humidité relative) et les résultats simulés par le modèle CHM:

$$f(a) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \left(\frac{y_{nl} - y_{nl}(a)}{\sigma_n} \right)^2 \quad (6.2)$$

Où y_{nl} représente l'ensemble des points de données pour chaque variable mesurée n (température et humidité relative); $y_{nl}(a)$ représente la variable calculée à partir du modèle CHM direct en entrant les valeurs estimées de l'humidité relative K_l .

Par conséquent, le paramètre attendu pour le K_l peut être obtenu en minimisant la fonction objective comme suit:

$$\min f(a) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \left(\frac{y_{nl} - y_{nl}(\theta)}{\sigma_n} \right)^2 \quad (6.3)$$

6.2. Validation de la propriété estimée

Pour évaluer la performance de la modélisation en utilisant les K_l estimés par différents algorithmes d'optimisation, cette étude utilise deux métriques, y compris l'erreur absolue moyenne (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Les résultats ont montré que les différents algorithmes d'optimisation ont eu un effet négligeable sur les valeurs de K_l , et ont donc exercé un impact négligeable sur les prédictions de température et d'humidité relative. Les résultats ont également montré que par rapport au modèle CHM ignorant le transfert d'eau liquide, le modèle CHM avec le K_l estimé a fortement réduit les erreurs de prédiction de l'humidité relative pour toutes les positions dans les conditions dynamiques et non isothermes.

7. Conclusion

E construction isolants à base de paille existants. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau des composites à base de chitosan a montré des valeurs plus élevées que celles des composites à base d'alginate. Une taille de fibre plus petite et un rapport de liant plus grand ont également entraîné des facteurs de résistance à la vapeur d'eau plus élevés. Les liants, même en petite quantité, ont une influence sur l'isotherme de sorption et l'absorption d'eau. Les composites à base d'alginate avaient une capacité d'adsorption d'humidité plus élevée que les composites à base de chitosan. Cependant, le type de fibre et le ratio de liant semblent avoir une influence négligeable sur la capacité d'adsorption des matériaux dans cette étude. Le type de liant et l'humidité relative ont eu des impacts sur les types, la quantité et la vitesse de contamination des moisissures à la surface des composites.

Fin d'évaluer plus précisément le comportement hygrothermique, une couche de singer d'un panneau d'alginate de paille de riz est étudiée à l'échelle du mur en la soumettant à des conditions limites isothermes, non isothermes et dynamiques. Les résultats obtenus dans des conditions isothermes ont montré que le transport de l'humidité avait un impact sur les changements de température dus à la sorption de l'humidité. La condensation/évaporation de la vapeur d'eau liée au stockage de l'humidité et à la diffusion de l'humidité a induit une augmentation/diminution de la température. Les résultats obtenus dans des conditions non isothermes indiquent que le transport de l'humidité peut être affecté par un gradient de température. Lors de l'essai dynamique, le matériau a présenté un déphasage thermique élevé comparable à celui de l'isolation en fibre de bois, contribuant ainsi à un environnement intérieur confortable. En outre, les résultats obtenus indiquent que le matériau est un matériau bio-sourcé intéressant pour l'absorption et la libération de l'humidité. Sur la base des données expérimentales, un modèle couplé chaleur et humidité (CHM) est utilisé pour prédire le comportement hygrothermique dans le mur. Le modèle CHM est comparé à un modèle de transfert thermique transitoire (TH) pour démontrer l'effet de couplage du transfert de chaleur et du transfert d'humidité. Les résultats montrent que le modèle CHM est plus précis pour prédire le comportement thermique que le modèle TH. En outre, une méthode d'identification inverse est appliquée pour estimer la perméabilité à l'eau liquide du matériau. Les résultats indiquent que lorsque le modèle CHM prend en compte le transfert d'eau liquide sur la base de la propriété estimée, la prédiction peut être améliorée.