

Etude Expérimentale et Numérique du Comportement Hygrique d'une Paroi en Mortier contenant des Fibres micronisées de Miscanthus

Haoyan Zhang^{1,*}, Karim Benzarti², Rachid Bennacer³ et Abderrahim Boudenne¹

¹ Univ Paris-Est Créteil, CERTES, F-94010 Créteil, France

² Univ Gustave Eiffel, Ecole des Ponts, CNRS, Navier, F-77447 Marne-la-Vallée, France

³ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, LMPS – Labo. de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France

RESUME Cette étude examine les performances hygriques d'une éprouvette rectangulaire représentative d'un élément de paroi, constituée d'un mortier cimentaire incorporant 7,5 % en masse de fibres micronisées de miscanthus (MFM), à travers une double approche expérimentale et numérique. À l'échelle du matériau, les isothermes d'adsorption et de désorption de l'humidité ont été caractérisées et ajustées à l'aide du modèle de Guggenheim Anderson de Boer (GAB). Les essais cycliques d'humidification et de séchage ont mis en évidence un effet d'hystérésis marqué ainsi qu'une augmentation progressive de la teneur en humidité au fil des cycles, soulignant la capacité tampon du matériau vis-à-vis de l'humidité. À l'échelle du mur, une petite paroi à base mortier incorporant des MFM a été construite et instrumentée au moyen de capteurs de température et d'humidité insérés à différentes profondeurs. Cette paroi a ensuite été caractérisée dans un environnement bi-climatique en utilisant un dispositif expérimental adapté permettant d'appliquer des variations hygrothermiques dynamiques pour reproduire l'environnement extérieur typique des enveloppes de bâtiment. L'échantillon a été soumis au niveau de sa face extérieure, à des cycles d'humidité relative variant de 15 % à 80 % sous une température constante de 20 °C, pendant lesquels les variations de température et d'humidité à travers l'épaisseur ont été enregistrés par les différents capteurs. Le comportement hygrique de la paroi a ensuite été simulé à l'aide d'un modèle couplé de transfert de chaleur et de masse (modèle de Kunzel). Les prédictions issues de la simulation numérique ont montré une bonne concordance avec les données expérimentales. Lors de la phase d'adsorption, des différences maximales de 4,5 % et de 4,8 % ont été observées respectivement aux profondeurs de 2,5 cm et 5 cm, entre les valeurs numériques et expérimentales. L'étude confirme ainsi l'aptitude du modèle numérique à prédire le comportement hygrique de la paroi biosourcée soumise à des conditions aux limites réalistes.

Mots-clés mortier biosourcé, fibres micronisées de miscanthus, comportement hygrique, transfert de chaleur et d'humidité

1. Introduction

Dans le contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources, la conception éco-responsable devient une priorité en science des matériaux. Le bâtiment, levier majeur de réduction énergétique et des émissions de gaz à effet de serre (Benmahiddine *et al.*, 2024), s'oriente vers des matériaux renouvelables à faible impact. Les matériaux biosourcés à base de fibres naturelles suscitent un intérêt croissant, en raison de leurs propriétés hygroscopiques et de leur faible conductivité thermique, favorisant la régulation des variations de température et d'humidité. Comprendre leur comportement hygrothermique est donc essentiel.

De nombreuses études expérimentales ont ainsi été menées pour caractériser les propriétés hygrothermiques des mortiers biosourcés dans des conditions environnementales variables (Chennouf *et al.*, 2018; Gbekou *et al.*, 2024). Ces travaux mettent en évidence l'impact de l'incorporation de fibres naturelles sur des paramètres fondamentaux tels que la teneur en eau et la conductivité thermique, ainsi que les interactions complexes entre ces propriétés sous différentes conditions environnementales (Chennouf *et al.*, 2019; Damle, Singh and Bhesaniya, 2024). L'augmentation de la teneur en fibres végétales entraîne une porosité plus élevée et une densité plus faible, ce qui réduit de manière significative la conductivité thermique. La porosité accrue liée aux fibres facilite également le transport d'humidité, conduisant à une augmentation globale des transferts d'eau. De plus, l'absorption et la libération de chaleur latente lors de la migration de l'humidité modifient davantage la répartition du champ thermique local (Gbekou *et al.*, 2023). Parmi les fibres naturelles disponibles sur le marché, les fibres de miscanthus issues d'une plante vivace à croissance rapide, se distinguent notamment par leurs excellentes propriétés d'isolation thermique (Chen *et al.*, 2020; Gbekou *et al.*, 2023, 2024). Gbekou *et al.* (2024b, 2023) ont montré que leur incorporation dans les mortiers permet d'améliorer significativement leur résistance thermique, avec des gains de l'ordre de 87 % pour une quantité de fibre ajoutée de 7 % en masse. Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en fibres améliore systématiquement la capacité d'adsorption d'humidité, l'efficacité de régulation hygrométrique, la perméabilité à la vapeur d'eau et augmente l'absorption capillaire.

Parallèlement, le développement de modèles prédictifs s'est avéré indispensable pour simuler le comportement hygrothermique de ces matériaux poreux dans différents environnements, sans recourir systématiquement à des essais expérimentaux (Lelievre, Colinart and Glouannec, 2014; Alioua *et al.*, 2019; Belloum *et al.*, 2022). Parmi les paramètres déterminants pour améliorer la précision des études numériques, la capacité de sorption de la vapeur d'eau occupe une place centrale. Une bonne connaissance de cette propriété est essentielle pour pouvoir estimer de manière fiable le comportement des matériaux en milieu humide. Cette propriété joue également un rôle crucial dans la régulation de l'humidité dans l'environnement intérieur des bâtiments, contribuant ainsi au confort des usagers et à la durabilité des structures (Zhu *et al.*, 2025).

Dans ce travail, nous proposons d'évaluer les performances hygriques d'un élément de paroi à base de Mortier cimentaire incorporant des Fibres micronisées de Miscanthus (MFM), à travers des approches expérimentale et numérique. Dans un premier temps, les isothermes d'adsorption et de désorption de l'humidité ont été caractérisées à l'échelle du matériau, et les fonctions de stockage de l'humidité qui en découlent ont servi de données d'entrée pour le modèle numérique. Ensuite, une éprouvette rectangulaire de 20 cm de cotés et de 10 d'épaisseur, a été fabriquée à partir d'un mortier contenant 7,5 % en masse de fibres de miscanthus micronisées, puis a été instrumentée au moyen de capteurs de température et d'humidité placés à différentes profondeurs. Cette éprouvette a ensuite été caractérisée au moyen d'un dispositif bi-climatique, combinant une enceinte climatique pour reproduire les conditions dynamiques extérieures, et un caisson isolé pour simuler l'environnement intérieur du bâtiment. Enfin, les données expérimentales ont été confrontées aux simulations numériques issues du modèle couplé de transfert de chaleur et masse de Kunzel, résolu par méthode des éléments finis.

2. Matériaux et méthode

2.1 Propriétés des matériaux

La composition du mortier à base de fibres de miscanthus MFM comporte : un ciment fourni par la société VICAT (L'Isle-d'Abeau, France) qui est un mélange de ciment Portland ordinaire EXTREMAT® CEM I 52,5 N (OPC) et d'un ciment sulfo-alumineux à prise rapide (CSA) ; du sable normalisé (taille maximale des particules 2 mm) fourni par la société Nouvelle du Littoral (France) ; un superplastifiant/réducteur d'eau (VISCOCRETE TEMPO 11; SIKA, Baar, Suisse) pour améliorer l'ouvrabilité ; et des fibres de miscanthus micronisées sèches (25,7 % en masse). La procédure complète de formulation et de préparation du mélange est détaillée dans (Gbekou *et al.*, 2023). On notera que les fibres sont préalablement imbibées d'eau avant leur incorporation dans le mélange, ce qui conduit à un rapport eau/ciment (E/C) de 0.96. Selon les travaux de Gbekou (Gbekou *et al.*, 2024), qui ont étudié les propriétés hygrothermiques de mortiers contenant différentes proportions de fibres, les formulations à teneurs élevées en fibres de miscanthus présentent une hygroscopicité remarquable ainsi qu'une faible conductivité thermique, mettant en évidence leur potentiel pour des applications nécessitant un compromis entre régulation de l'humidité et isolation thermique. Sur la base de ces résultats, la présente étude utilise une formulation de mortier incorporant 5,7 % en masse de fibres de miscanthus. Dans le cadre des études numériques visant à analyser le comportement hygrothermique du MFM, il est indispensable de disposer de divers paramètres d'entrée, tels que la masse volumique sèche, la chaleur spécifique, la conductivité thermique, ou encore la perméabilité à la vapeur d'eau. Les valeurs des principales propriétés des mortiers à base de MFM, rapportées par Gbekou *et al.* (Gbekou *et al.*, 2023, 2024), sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés des mortiers MFM utilisés comme paramètres d'entrée du modèle

Propriété	Valeur	Propriétés	Valeur
Masse volumique sèche ρ_s (kg/m ³)	1342	Chaleur spécifique sèche c_p (J/(kg·K))	894.2
Perméabilité à la vapeur d'eau (méthode sèche) δ (Kg/(Pa·m·s))	1.28×10^{-11}	Perméabilité à la vapeur d'eau (méthode humide) δ (Kg/(Pa·m·s))	2.48×10^{-11}
Coefficient d'absorption capillaire A (kg/m ² ·s ^{0.5})	0.081	Teneur en humidité à saturation libre w_f (kg/m ³)	294.4
Conductivité thermique λ (w.m ⁻¹ .k ⁻¹)		$\lambda(w)=0.1069+13.522 \times w/\rho_s$	

2.2 Capacité de sorption de vapeur

La capacité de sorption de la vapeur d'eau des matériaux de construction correspond à leur aptitude à absorber et restituer de la vapeur d'eau en réponse aux variations de conditions environnementales. La technique de sorption dynamique de vapeur (DVS) est couramment utilisée pour quantifier la quantité de vapeur adsorbée par un échantillon à l'équilibre. Dans cette étude, un appareil DVS multi-échantillons Vsorp Plus de ProUmid a été utilisé (Gbekou *et al.*, 2024). Les essais ont été réalisés sur des échantillons cubiques de $2 \times 2 \times 2$ cm³, découpés dans la même éprouvette utilisée pour l'analyse du transfert hygrique à l'échelle de la paroi. Afin de limiter l'effet des hétérogénéités du matériau, un total de six échantillons a été testé. Avant chaque essai, les échantillons ont été nettoyés à l'air comprimé pour éliminer les poussières superficielles susceptibles de perturber les mesures. L'humidité relative (RH) a été progressivement augmentée,

puis diminuée, par paliers de 10 %, entre 10 % et 90 % RH. Les courbes expérimentales de sorption obtenues à 23 °C ont ensuite été ajustées à l'aide du modèle GAB (Guggenheim–Anderson–de Boer) (Alioua *et al.*, 2019), défini par l'expression suivante :

$$\frac{u}{u_m} = \frac{m^*c^*k^*RH}{(1-k^*RH)*(1-k^*RH+c^*k^*RH)} \quad (1)$$

Où u et u_m sont respectivement la masse et la teneur en eau monomoléculaire, φ désigne l'humidité relative, c , m et k sont les paramètres d'ajustement du modèle GAB.

2.3 Instrumentation de l'élément de paroi et dispositif expérimental bi-climatique

Le dispositif de caractérisation bi-climatique de l'élément de paroi en mortier à base de miscanthus (MFM), de dimensions $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$, est présenté sur la Figure 1. L'éprouvette, connectée à une boîte isolante, a été placée dans une chambre climatique (modèle ICH 260, Memmert), utilisée pour reproduire les conditions environnementales extérieures. La face de l'éprouvette en contact avec la boîte, étanche à la vapeur et isolée thermiquement, permet de simuler l'environnement intérieur d'une habitation, dans lequel la température et l'humidité ne sont pas régulées mais varient uniquement sous l'effet des transferts de chaleur et d'humidité à travers la paroi. Afin de garantir un transfert unidimensionnel (1D) de l'humidité, l'ensemble des surfaces latérales du mur, ainsi que les faces de la boîte, ont été isolées avec du polystyrène expansé et un film pare-vapeur, ne permettant les échanges qu'à travers les deux surfaces exposées. Pour mesurer les variations d'humidité relative et de température dans l'épaisseur de la paroi, 5 capteurs combinés humidité/température (modèle MSR 145B de TH-Industrie) ont été installés à plusieurs emplacements stratégiques. Deux capteurs ont été positionnés en surface, respectivement sur les faces extérieure et intérieure de la paroi. Trois autres capteurs ont été insérés à l'intérieur de l'éprouvette, à des distances de $x = 2,5 \text{ cm}$, 5 cm et $7,5 \text{ cm}$ par rapport à la face extérieure. Un capteur supplémentaire, placé dans la chambre climatique, a permis de contrôler la température et l'humidité au sein de l'enceinte. Les essais ont été réalisés en imposant un scénario climatique extérieur contrôlé. Le protocole expérimental comportait une phase préliminaire à 20°C et 40% HR, jusqu'à l'obtention d'un état d'équilibre dans l'environnement intérieur (face intérieure du mur). Par la suite, un cycle hygrométrique a été appliqué dans l'enceinte (milieu extérieur), alternant 15 jours à 80 % HR suivis de 15 jours à 15 % HR. Ce cycle a été répété trois fois, portant la durée totale de l'expérimentation à 91 jours. Tout au long de l'essai, la température a été maintenue constante à 20 °C.

2.4 Modèle numérique

Dans cette étude, la modélisation du transfert couplé de chaleur et de masse dans les matériaux poreux repose principalement sur les travaux théoriques de Kunzel (Kunzel, 1995). La température et l'humidité relative sont considérées comme les forces motrices du phénomène de transport. Avant de présenter le modèle mathématique, les hypothèses suivantes sont avancées :

- (1) Le matériau est considéré comme non déformable, homogène et isotrope.
- (2) L'équilibre thermodynamique local est supposé être établi en tout point du matériau.
- (3) L'air est considéré comme un mélange de gaz parfaits.

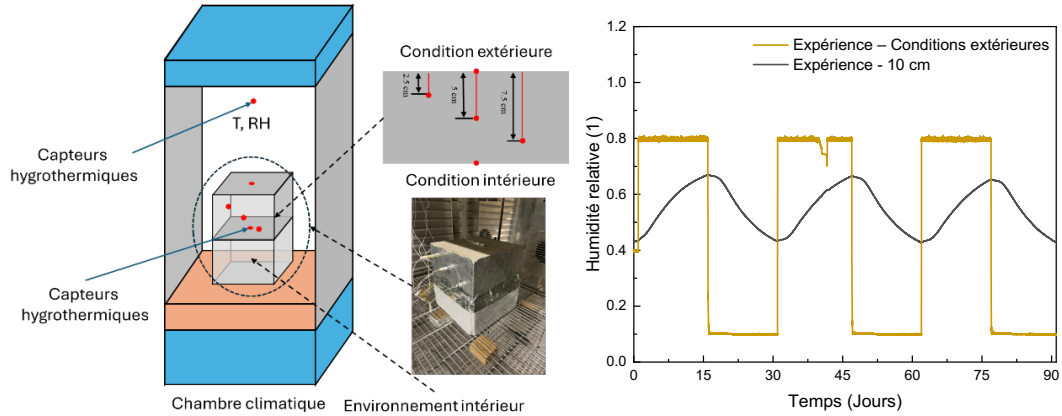


Figure 1. Dispositif bi-climatique expérimental utilisé pour évaluer la réponse hygrothermique de l'élément de paroi MFM. (a gauche) Schéma de principe et position des capteurs à différentes profondeurs dans l'éprouvette ; (a droite) Variations de l'humidité relative dans les environnements extérieur et intérieur

Sur la base de ces hypothèses, les équations couplées de transfert de chaleur et de masse du modèle s'écrivent comme suit :

Transfert de chaleur et humidité :

$$(\rho_0 c_0 + c_l w) \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + h_v \left(\delta \frac{\partial \varphi P_{sat}}{\partial T} \right) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial (P_{sat} \varphi)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_l \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (3)$$

Le coefficient de transfert liquide sous gradient d'humidité relative (D_l (kg·m⁻¹·s⁻¹)) résulte de divers processus dépendant des différentes zones hygroscopiques. La méthode de calcul est présentée en détail dans les travaux de Alioua et al. (Alioua *et al.*, 2019)

2.5 Conditions aux limites

Aux frontières du système, les conditions imposées par le dispositif expérimental doivent être respectées afin d'assurer la cohérence entre le modèle théorique et la configuration réelle des essais. Par conséquent, cette étude se concentre sur les flux de chaleur et de masse aux interfaces, sans prendre en compte des paramètres additionnels tels que la pluie ou le rayonnement. Ainsi, les contributions au transport dans chaque modèle sont représentées uniquement par les flux de chaleur et de masse correspondants, comme suit :

$$Q_\Omega = h_c (T_\Omega - T_{amb}) \quad (4)$$

$$G_\Omega = \beta (P_{v, \Omega} - P_{v, amb}) \quad (5)$$

Le coefficient de transfert de vapeur d'eau à la frontière est exprimé comme suit :

$$\beta = -7 * 10^{-9} h \quad (6)$$

Le coefficient de transfert convectif de chaleur a été supposé constant, avec une valeur de 17 W/(m²·K) pour les conditions extérieures et de 8 W/(m²·K) pour les conditions intérieures. Les mesures de température et d'humidité aux limites ont été utilisées comme conditions initiales.

3. Résultats et discussion

3.1 Résultats des isothermes d'adsorption et de désorption à 23 °C

La teneur en humidité à l'équilibre mesurée pour chaque niveau d'humidité relative a permis de tracer les courbes d'adsorption et de désorption. Parmi les six séries de données expérimentales disponibles, les trois jeux les plus cohérents ont été retenus, et l'un d'eux a été sélectionné comme jeu représentatif pour une analyse approfondie. Les isothermes d'adsorption et de désorption ainsi obtenus ont été ajustés à l'aide du modèle de GAB (Figure 2). Les résultats mettent en évidence un effet d'hystérésis, caractéristique des matériaux poreux qui est généralement attribué à la condensation capillaire au sein de la structure poreuse.

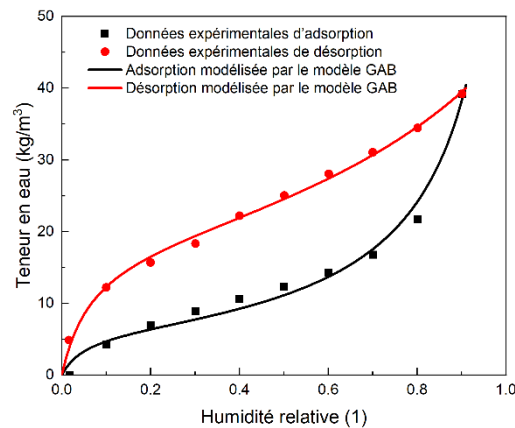


Figure 2. Isothermes d'adsorption et de désorption du MFM à 23 °C.

Afin d'analyser le comportement hygrique du matériau soumis à des conditions environnementales cycliques, trois cycles successifs d'humidification et de séchage ont été appliqués. Les résultats présentés dans la Figure 3 font apparaître un effet d'hystérésis marqué. Pour une humidité relative donnée, le matériau retient davantage d'humidité pendant la phase de désorption que lors de l'adsorption. On remarque également que les courbes d'absorption sont progressivement décalées vers le haut au cours des cycles répétés, indiquant une légère augmentation de la capacité d'absorption. Ce comportement est probablement lié à la présence des fibres naturelles dans la matrice cimentaire qui entravent la libération de l'humidité absorbée. Deux mécanismes sont susceptibles d'expliquer ce phénomène (Zhang, Chen and Riaz Ahmad, 2021). Le premier correspond à l'effet « *bouteille d'encre* » selon lequel l'eau stockée dans les macropores reste piégée par des goulots plus étroits limitant ainsi la désorption. Cet effet est particulièrement marqué dans les structures poreuses contenant des fibres à morphologie complexe. Le second mécanisme est lié à la différence d'angle de contact entre les phases d'humidification et de séchage. En effet, lors de l'adsorption, l'eau pénètre dans les pores avec angle de contact avancé relativement faible, alors que pendant la désorption, un angle de contact récessif plus élevé ralentit l'évacuation de l'eau. Cela entraîne une humidité résiduelle plus importante pour une HR donnée.

Au cours de chaque cycle, les courbes de désorption ne reviennent pas à zéro, car une partie de l'eau reste piégée de manière irréversible. Ainsi, même à faible humidité relative, une petite quantité d'eau liée persiste, et le point de départ d'un nouveau cycle d'adsorption correspond à la teneur en eau finale de la désorption précédente. Les observations en SEM

(Gbekou *et al.*, 2024) montrent que les fibres de miscanthus possèdent une microstructure très poreuse, leur conférant une forte capacité d'adsorption et améliorant le comportement hygrique du composite cimentaire. Ces caractéristiques microstructurales influencent fortement l'adsorption, qui dépend du remplissage progressif des pores de différentes tailles, tandis que la désorption reflète principalement la libération de l'eau résiduelle des pores saturés. Ce comportement est cohérent avec le rôle des fibres de miscanthus et a également été observé dans le béton de lin (Benmahiddine *et al.*, 2020).

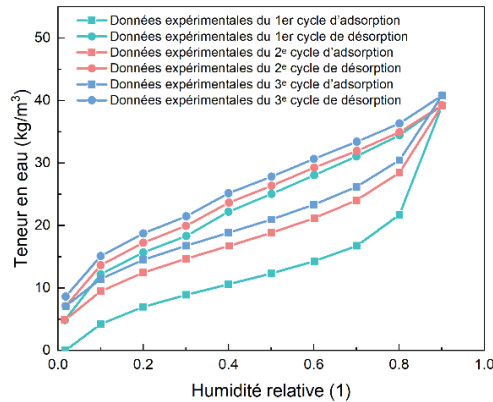


Figure 3. Evolution des isothermes d'adsorption et de désorption du matériau MFM au cours de trois cycles successifs d'humidification et de séchage.

3.2 Réponse expérimentale de l'élément de paroi aux variations d'humidité de l'environnement extérieur

La Figure 4 présente les variations dynamiques de l'humidité relative mesurées à différentes profondeurs au sein de l'éprouvette testée. Sur la face extérieure (0 cm), on observe des fluctuations marquées et périodiques de HR entre 90 % et 13 %, sous l'effet des cycles imposés dans la chambre climatique et de la circulation d'air générée par le ventilateur interne. Il ressort que les valeurs mesurées sur cette face sont systématiquement supérieures à la consigne de l'enceinte. Cette différence peut s'expliquer par des phénomènes de condensation sur la face extérieure de la paroi. Par ailleurs, durant la phase d'adsorption, la différence d'humidité relative entre la profondeur de 2,5 cm et la face intérieure (à 10 cm) ne dépasse pas 10 %, témoignant de la bonne capacité de tampon hygrique de la paroi MFM.

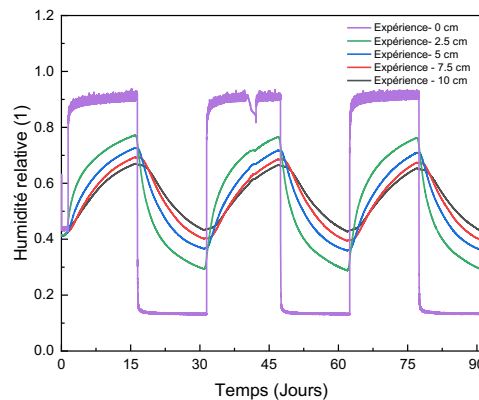


Figure 4. Variation de l'humidité relative à différentes profondeurs au sein de l'éprouvette en mortier MFM.

3.3 Simulation numérique du comportement hygrique de l'élément de paroi en mortier MFM

Les simulations numériques ont été réalisées en résolvant les équations couplées à l'aide du module « PDE Modes » de COMSOL Multiphysics 6.3 qui offre une grande souplesse pour la formulation des équations et des conditions aux limites. Le problème a été discrétisé avec un pas de temps de 0,01 jour (soit 14,4 minutes), permettant de capter finement les évolutions temporelles. Les humidités mesurées dans les milieux en amont et en aval de la paroi ont été utilisées comme conditions aux limites dans les simulations. Les calculs ont été menés en considérant l'isotherme d'adsorption présenté dans la Section 3.1. Les simulations numériques des variations de HR à différentes profondeurs de l'éprouvette biosourcée sont présentées dans la Figure 5.

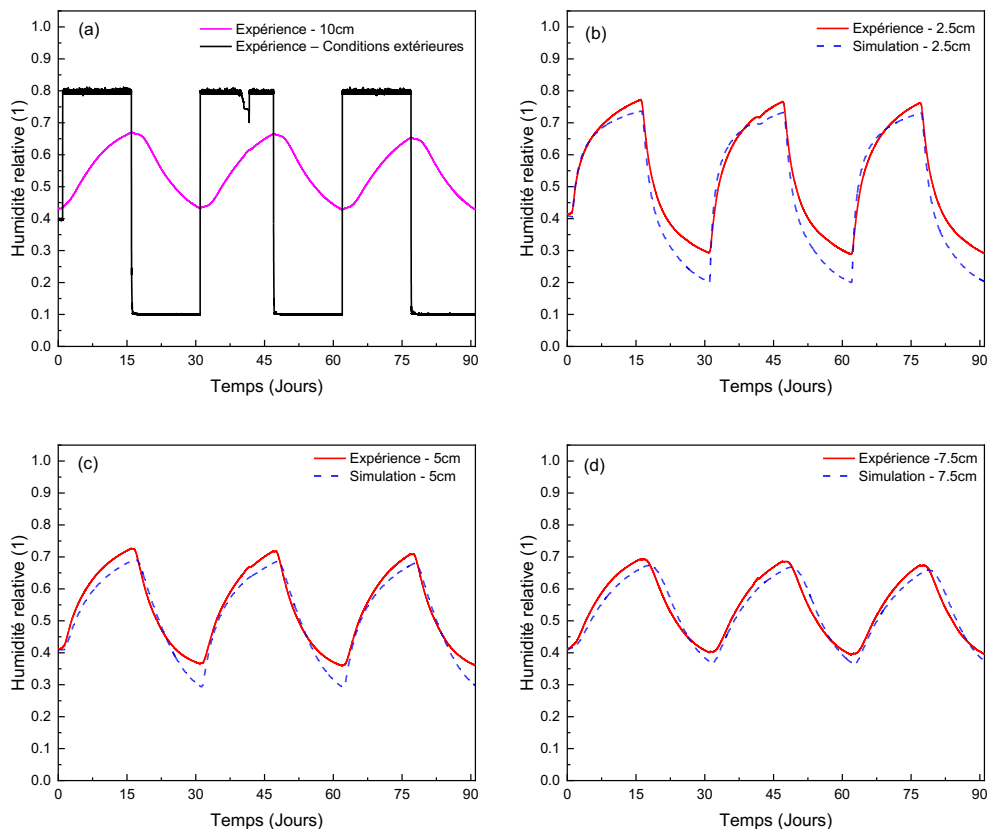


Figure 5. Comparaison entre les profils expérimentaux et numériques de l'humidité relative à différentes profondeurs de l'éprouvette en mortier MFM : (a) conditions aux limites extérieures et intérieures ; (b) à 2,5 cm ; (c) à 5 cm ; (d) à 7,5 cm de la surface extérieure.

La comparaison entre les données expérimentales et les résultats numériques met en évidence des écarts variables selon la profondeur dans la paroi. Lors de la phase d'adsorption, les différences maximales (4,5 % et 4,8 %) ont été observées respectivement aux profondeurs de 2,5 cm et 5 cm. Ces positions correspondent aux zones proches de la face extérieure, où les variations hygriques sont les plus marquées. En revanche, à la profondeur de 7,5 cm, plus proche de la face intérieure, l'écart n'est que de 3 %. Pendant la phase de désorption, les écarts entre les valeurs numériques et expérimentales augmentent, pour atteindre environ 9 % à 2,5 cm, 7 % à 5 cm, tandis qu'ils restent aux alentours de 3 % à la profondeur de 7,5 cm. De manière générale, le modèle utilisé sous-estime légèrement l'augmentation de l'humidité résultant des variations de HR imposées dans

l'environnement extérieur pendant la phase d'absorption. Les résultats restent cependant acceptables, compte tenu de l'hétérogénéité intrinsèque du matériau et des incertitudes inhérentes aux propriétés du matériau, à la précision des mesures (capteurs, etc...), et aux paramètres d'entrées supposés connus. Une explication complémentaire aux écarts observés réside dans le fait que le modèle ne prend pas en compte les effets d'hystérésis. En effet, négliger le comportement hystérétique, ainsi que l'eau résiduelle piégée lors des cycles successifs d'humidification et de séchage (phénomène dit de la « *bouteille d'encre* »), revient à ignorer certains mécanismes physiques significatifs. La prise en compte de l'historique de la teneur en eau, par le biais de courbes d'adsorption intermédiaires ou de modèles intégrant l'hystérésis, permettrait d'établir une relation plus fidèle entre humidité relative et teneur en eau. Cela conduirait à une prédiction plus précise des transferts d'humidité au sein des parois en matériaux biosourcés.

4. Conclusion

Ce travail présente une étude expérimentale et numérique approfondie du comportement hygrique d'un élément de paroi biosourcée constituée d'un mortier incorporant 7,5 % en masse de fibres de miscanthus micronisées. À l'échelle du matériau, les phénomènes d'adsorption et de désorption de l'humidité ont été caractérisés, puis modélisés au moyen de l'approche GAB. Afin d'évaluer la réponse du matériau soumis à sollicitations répétées, trois cycles d'adsorption et de désorption ont été réalisés. Les paramètres hygriques ainsi obtenus ont servi de données d'entrée pour le modèle couplé de transfert de chaleur et de masse de Kunzel. À l'échelle du mur, des expérimentations ont été menées au moyen d'un dispositif bi-climatique, dans lequel une chambre climatique a permis d'imposer des conditions hygrothermiques dynamiques, reproduisant l'environnement extérieur auquel sont généralement exposées les enveloppes des bâtiments. Le comportement hygrique de l'éprouvette en mortier MFM a été simulé numériquement et confronté aux résultats expérimentaux. Les écarts observés durant la phase d'absorption restent modérés : les différences maximales atteignent 4,5 % et 4,8 % à 2,5 cm et 5 cm de profondeur, respectivement, et se réduisent à 3% à une profondeur de 7,5 cm. Dans l'ensemble, les résultats confirment la validité du modèle numérique utilisé pour prédire le comportement hygrothermique de l'élément de paroi biosourcée à base de MFM, soumis à des conditions aux limites réalistes. Dans des travaux ultérieurs, une attention particulière pourra être portée à l'intégration des effets d'hystérésis dans le but d'améliorer la précision des simulations en régime transitoire. Cette amélioration permettra de renforcer la robustesse et la pertinence du modèle et d'améliorer la prédiction du comportement hygrique des matériaux de construction biosourcés.

REFERENCES

Alioua, T. *et al.* (2019) "Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect," *Building and Environment*, 163, p. 106333. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106333>.

Belloum, R. *et al.* (2022) "Hygrothermal performance assessment of a bio-based building made with date palm concrete walls," *Building and Environment*, 223, p. 109467. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109467>.

- Benmahiddine, F. *et al.* (2020) "Effect of flax shives content and size on the hygrothermal and mechanical properties of flax concrete," *Construction and Building Materials*, 262, p. 120077. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120077>.
- Benmahiddine, F. *et al.* (2024) "Multi-scale analysis of the effects of hysteresis on the hydrothermal behaviour of bio-based materials: Application to hemp concrete," *Construction and Building Materials*, 411, p. 134107. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134107>.
- Chen, Y.X. *et al.* (2020) "Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: Acoustic absorption and thermal insulation," *Cement and Concrete Composites*, 114, p. 103829. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103829>.
- Chennouf, N. *et al.* (2018) "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers," *Construction and Building Materials*, 192, pp. 348–356. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.089>.
- Chennouf, N. *et al.* (2019) "Experimental investigation on hygrothermal performance of a bio-based wall made of cement mortar filled with date palm fibers," *Energy and Buildings*, 202, p. 109413. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109413>.
- Damle, R.M., Singh, A. and Bhesaniya, N. (2024) "On the hygrothermal environment of spaces with exposed walls – Thermal bridging effect of mortar layers of cement and lime," *Journal of Building Engineering*, 98, p. 111513. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111513>.
- Gbekou, F.K. *et al.* (2023) "Mechanical and thermal properties of cement mortar composites incorporating micronized miscanthus fibers," *Journal of Materials Research and Technology*, 26, pp. 7649–7664. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.093>.
- Gbekou, F.K. *et al.* (2024) "Hygrothermal characterization of cement mortar composites incorporating micronized miscanthus fibers," *Case Studies in Construction Materials*, 21, p. e04004. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04004>.
- Künzel, H.M. (1995) *Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: IRB Verlag.
- Lelievre, D., Colinart, T. and Glouannec, P. (2014) "Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses," *Energy and Buildings*, 84, pp. 617–627. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>.
- Zhang, X., Chen, B. and Riaz Ahmad, M. (2021) "Characterization of a novel bio-insulation material for multilayer wall and research on hysteresis effect," *Construction and Building Materials*, 290, p. 123162. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123162>.
- Zhu, Z. *et al.* (2025) "Hygic properties of porous building materials (IX): experimental evaluation of two hysteresis models," *Building and Environment*, p. 112695. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112695>.