

Modèle CFD thermo-hygrométrique transitoire d'un système de mur Trombe

Transient thermo-hygrometric CFD model of Trombe wall system

Nour El Zein¹, Philippe Désévaux¹, Yacine Ait Oumeziane¹, Sylvie Bégot¹, Valérie Lepiller¹

¹ Institut FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, CNRS, Belfort, France, nour.elzein@femto-st.fr

RÉSUMÉ. Cet article vise à étudier le comportement dynamique d'un mur Trombe. Un modèle CFD est développé en tenant compte à la fois de la variation de l'ensoleillement durant la journée mais aussi de la présence ou non d'habitants. Les résultats permettent de cartographier les profils de température, de vitesse et de d'humidité au sein du mur Trombe et de la pièce d'occupation en fonction de l'heure de la journée. Ce modèle est un outil intéressant pour définir et optimiser les systèmes de ventilation et minimiser la présence d'humidité.

ABSTRACT. The objective of this study is to develop a transient CFD model representing the dynamic behavior of Trombe walls. The current model takes into consideration variable solar radiation as well as the presence of occupants and their activities. The temperature and velocity profiles at different locations are plotted. The moisture's impact on the hygrothermal behavior is then investigated. The results show that the relative humidity distribution inside the system is mainly influenced by the ventilation strategy in which the moisture is accelerated and transported by the flow in the case of vents opening. The finding revealed that the maximum relative humidity (RH) reached in the system doesn't exceed 22%. However, due to the lower temperature values observed in the system during overcast winter nights, there is a potential condensation risk on glass and wall surfaces.

MOTS-CLÉS. Modèle dynamique, CFD, mur Trombe, hygrothermie, simulation de la présence ou absence des occupants.

KEYWORDS. Dynamic model, hygrothermal analysis, CFD, occupant's behavior simulation.

1. Nomenclature

Symbole	Paramètres et unités	Symbole	Paramètres et unités
AAC	Beton cellulaire	T	Temperature, K
C_p	Chaleur spécifique , $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	v	Vitesse $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
D_m	Diffusivité massique, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Wv	Vapeur d'eau
D_T	Diffusivité thermique, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Y_i	Fraction massique locale de chaque espèce
DO	Discrete ordinate	CFD	Computational Fluid Dynamics
h_{ext}	Coefficient de transfert de chaleur, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	μ	Viscosité dynamique, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
J_i	Diffusion de l'humidité, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	ρ	Masse volumique, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
R_i	Réaction	τ	Transmissivité
RH	Humidité relative, %	a	Air
S_i	Terme source	i	Espèce
S_{ct}	Nombre de Schmidt	r	Rayonnement
t	Temps, s	t	Turbulent

1. Introduction

Dans le contexte actuel de la situation énergétique mondiale, le secteur du bâtiment contribue de manière substantielle à la consommation mondiale d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre. Par conséquent, pour améliorer la performance énergétique et le confort hygrothermique du bâtiment, il est crucial d'adopter des ressources énergétiques renouvelables et des solutions d'ingénierie respectueuses de l'environnement. Parmi les différentes technologies, les murs Trombe sont reconnus comme une solution intéressante pour réduire la consommation d'énergie. Si l'utilisation des murs Trombe offre de nombreux avantages, elle présente néanmoins des inconvénients tels que la surchauffe, la perte de chaleur et la circulation thermique inverse, ce qui nécessitent une sélection précise de ses paramètres de conception et de gestion du fonctionnement.

Plusieurs études théoriques et expérimentales ont été menées pour étudier le comportement thermique des murs Trombe dans diverses conditions météorologiques et évaluer l'impact de ses paramètres géométriques sur son efficacité thermique globale. Cependant, à ce jour, très peu de modèles numériques prennent en compte le comportement dynamique d'un tel système, et la plupart des modèles disponibles dans la littérature ne considèrent pas l'effet de l'humidité sur les murs Trombe, puisque l'accent étant généralement mis sur la détermination de l'efficacité thermique du système.

Malgré l'importance de l'isolation dans la réduction des pertes de chaleur, de nombreux chercheurs ont montré que l'introduction de couches isolantes dans les murs Trombe peut entraîner une accumulation potentielle d'humidité ou de condensation sur la surface du mur, en particulier dans des conditions climatiques extrêmes [SER 20], [SYZ 17]. Il est par conséquent important de maintenir des conditions d'humidité normales pour assurer le confort des occupants et le fonctionnement fiable des systèmes de façade. Peu d'analyses numériques ont examiné l'impact de l'humidité sur les murs Trombe pendant la saison hivernale couverte. L'apparition d'éventuels problèmes liés à l'humidité est déterminée par la différence de température spécifique du système et les niveaux d'humidité relative. De plus, dans la littérature, seules quelques études numériques ont été identifiées qui analysent l'effet de l'humidité relative sur les murs Trombe dans des conditions météorologiques chaudes et humides. Dans de telles conditions climatiques, la quantité d'humidité dans l'air est différente et peut varier de 10 g d'humidité par kg d'air sec par rapport au climat sec, ce qui affecte fortement les performances des cheminées solaires, comme l'ont montré Sudprasert et al. [SUD 16]. Grâce à un modèle CFD 2D stationnaire et en considérant une température uniforme, les auteurs ont comparé l'effet de l'air humide sur les profils de température et de vitesse dans une cheminée solaire en Thaïlande. Les résultats indiquent une réduction de la vitesse moyenne et une température de l'air plus élevée à la sortie lorsque l'humidité relative augmente. D'autre part, Dahire et al. [DAH 22] ont développé un modèle numérique de cheminées de toit solaire et analysé l'effet de l'humidité relative sur les performances du canal de cheminée en considérant l'air humide comme un milieu participant au rayonnement. Les auteurs soulignent que l'augmentation de l'humidité relative à température constante entraîne une diminution de la densité du mélange d'air, ce qui entraîne à son tour une baisse du débit massique d'air en raison d'une réduction de la convection naturelle. Cependant, il est bien connu que les modèles à l'état stationnaire ne représentent pas correctement le comportement du système car des facteurs climatiques variables entraînent une distribution instable de la température de surface. Ceci est également influencé par les propriétés thermophysiques et les paramètres de conception géométriques tels que l'épaisseur et la hauteur de la paroi. En effet, les recherches menées par El-Sherief et al. [ELS 20] ont démontré que dans le cas d'un rayonnement solaire élevé, un humidificateur placé à l'arrière de la cheminée solaire peut augmenter la vitesse dans la cheminée solaire et améliorer le processus de convection naturelle. Il apparaît donc nécessaire de développer un modèle numérique plus précis capable de prédire le comportement dynamique d'un tel système et d'analyser comment les décisions de conception affectent les performances des murs Trombe et le confort hygrothermique.

Cet article vise donc à développer un modèle CFD transitoire qui simule le comportement dynamique d'un mur Trombe de configuration classique. Comme il n'existe pas de méthode a priori

pour établir des paramètres numériques optimaux, des analyses de sensibilité au maillage et au pas de temps sont d'abord effectuées. Ensuite, plusieurs termes source et fonctions définies par l'utilisateur (UDF) sont mis en œuvre pour prendre en compte le rayonnement solaire variable ainsi que la présence des occupants et de leurs activités.

2. Description du modèle

2.1. Géométrie du modèle

Le modèle CFD est basé sur les spécifications géométriques d'un banc d'essai de mur Trombe existant au laboratoire de l'institut FEMTO-ST (Figures 1 et 2). Cette maquette, de dimensions de 2 x 1,97 mètres de largeur et de hauteur respectivement, représente un mur Trombe typique couplé à une pièce. Le vitrage a une épaisseur de 8 mm et la paroi de stockage thermique est en béton cellulaire de 20 cm d'épaisseur. Les murs de la pièce sont isolés à l'extérieur avec une couche de polystyrène épais afin de limiter les pertes de chaleur. Un simulateur solaire composé de 18 lampes halogènes est utilisé pour reproduire le rayonnement solaire allant de 0 à 1000 W.m⁻². Notre étude numérique couvre les mêmes conditions limites et les mêmes spécifications (Tableau 1) que le banc d'essai expérimental. Les murs de la pièce sont supposés être adiabatiques. À la surface du vitrage, une combinaison de conditions de convection et de rayonnement est prise en compte. Le coefficient de transfert de chaleur est déterminé à l'aide de la corrélation suivante : $h_{ext} = 5.7 + 3.8v_{vent}$ [ZHO 23].



Figure 1. Vue du banc d'essai

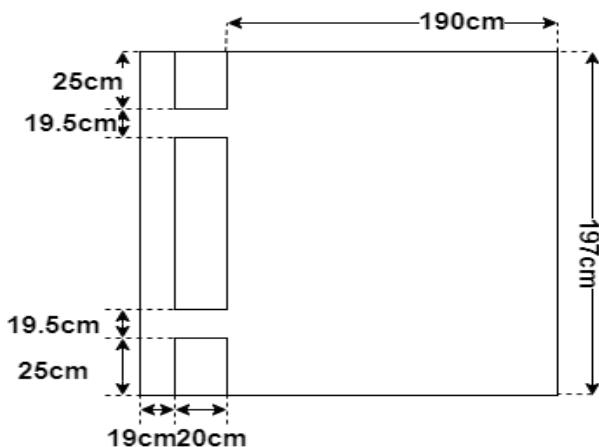


Figure 2. Dimensions du banc d'essai

Propriétés thermophysiques	Vitrage	Polystyrène	Béton cellulaire
ρ (kg.m ⁻³)	2500	30	450
C_p (J.kg ⁻¹ . K ⁻¹)	800	1450	1000
λ (W.m ⁻¹ . K ⁻¹)	1,020	0,038	0,110
E	0,89	0,90	0,85
A	-	0,1	0,95
τ	0,9	-	-

Tableau 1. Propriétés thermiques du modèle physique

2.2. Analyse de sensibilité

Pour calibrer le modèle numérique, une analyse préliminaire est effectuée afin d'évaluer la sensibilité des résultats à la taille de la grille de maillage et du pas de temps. Les conditions aux limites sélectionnées pour effectuer cette analyse sont représentées à la figure 3. Pour étudier le transfert de chaleur et la dynamique des fluides, on résout les équations qui traitent de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la conservation de la masse. Plus précisément, nous intégrons le modèle de rayonnement DO (Discrete Ordinate), le modèle de turbulence $k-\omega$ SST, ainsi que l'approche Boussinesq, pour traiter efficacement les phénomènes de rayonnement, de turbulence et de convection naturelle. La température moyenne de la paroi est utilisée comme point de référence et l'erreur relative est utilisée comme mesure pour évaluer la dépendance des résultats à la taille du maillage. Les résultats tels que représentés sur la figure 4 indiquent que, parmi tous les cas considérés, les mailles de taille 3 mm et 5 mm présentent des convergences, avec des erreurs relatives inférieures à 1 % montrant la capacité de ces mailles à capturer avec précision la distribution de la température dans cette région. Pour l'analyse de la taille du pas de temps (Figure 5), un algorithme de régression pour extrapoler tous les points de données est utilisé pour comparer les résultats. Par la suite, l'erreur absolue moyenne (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont utilisées comme mesures pour évaluer les performances du modèle prédictif. Après la validation du modèle prédictif, l'erreur relative est utilisée pour déterminer la taille de pas de temps appropriée. Au final, une taille de maille de 5 mm et un pas de temps de 10 s sont retenus pour cette étude.

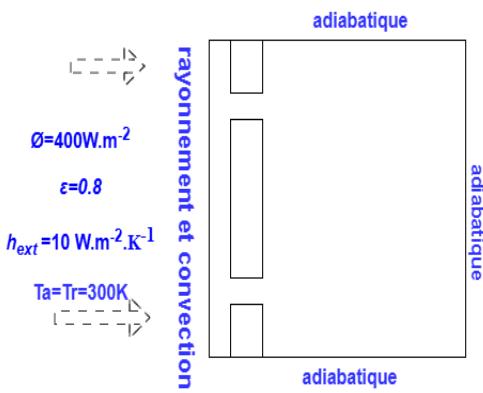


Figure 3. Conditions aux limites

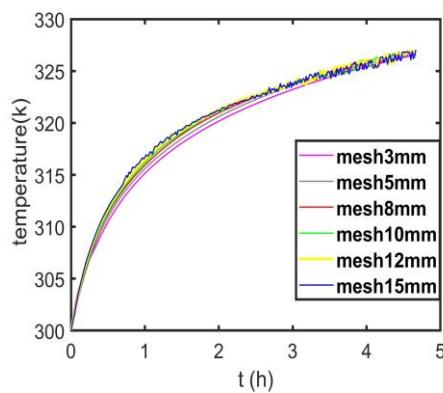


Figure 4. Influence du maillage

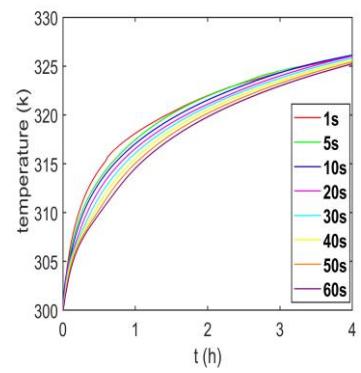


Figure 5. Influence du pas de temps

2.3. Description du modèle d'espèce

Le transport de l'humidité dans l'air implique des mécanismes de convection et de diffusion, comme représenté dans l'équation [1].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad [1]$$

où R_i est le mécanisme de réaction et S_i le terme source.

La diffusion de la vapeur d'eau dans l'air telle que représentée dans l'équation [2] est décrite par la loi de Fick, qui affirme que le processus de diffusion est directement proportionnel à la fraction massique. De plus, ce modèle intègre la diffusion thermique, appelée effet Soret. L'influence de la turbulence sur la diffusion est considérée par l'introduction du coefficient de diffusion de la turbulence. Ce coefficient est calculé comme le rapport de viscosité au nombre de Schmidt, encapsulant l'impact de la turbulence sur la dynamique de diffusion globale [BAK 22].

$$J_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu t}{S_{ct}} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad [2]$$

En réalité, le rayonnement solaire suit un schéma complexe et dynamique. Des facteurs tels que l'angle d'incidence, les conditions atmosphériques et les fluctuations saisonnières de l'intensité solaire constituent des obstacles importants à la modélisation précise d'une représentation réaliste. La simulation du rayonnement solaire à l'aide d'une fonction sinusoïdale peut servir de représentation simplifiée de la variation temporelle du rayonnement solaire sur la surface du mur Trombe tout au long de la journée. Par conséquent, un ensemble de données, obtenu à partir de PVGIS [JRC], est simulé en se concentrant spécifiquement sur les conditions météorologiques pendant les journées d'hiver nuageuses à Belfort au mois de janvier. Une UDF (User Defined Function) a été développée dans le logiciel ANSYS-Fluent pour reproduire le rayonnement solaire. Comme le montre la figure 6 (a), le rayonnement suit une évolution sinusoïdale, au cours de laquelle l'intensité du rayonnement solaire direct et diffus augmentent progressivement à partir de 8h30 et atteignent leur valeur maximale à 12h30 (317 W.m⁻² pour le rayonnement direct et 137 W.m⁻² pour la fraction diffuse). Le rayonnement solaire diminue ensuite progressivement, pour finalement atteindre son minimum à 17h40. La température extérieure est fixée à 2°C. De plus, afin de simuler la génération d'humidité de l'occupant et en considérant que la production d'humidité d'une maison individuelle varie de 1 à 20 kg/jour [LIU 23], et que la présence ou l'absence des occupants est fonction de l'espace et du temps, une UDF suivant la fonction sinusoïdale est implémentée et introduite dans le modèle en tant que source d'humidité localisée arbitrairement au centre de la pièce comme le montre la figure 6 (c). Cependant, il est important de noter qu'une étude expérimentale antérieure [LI 18], axée sur l'étude des caractéristiques de l'écoulement de l'air humain à l'aide d'un mannequin, a démontré l'apparition d'un panache thermique dirigé verticalement avec une valeur de vitesse maximale atteignant 0,18 m.s⁻¹. De plus, sachant que le taux de génération de chaleur par l'homme varie de 35 à 80 W.m⁻² en fonction de son activité [AGG 12], il est décidé d'inclure ces effets en tant que source de chaleur par le biais d'une autre UDF.

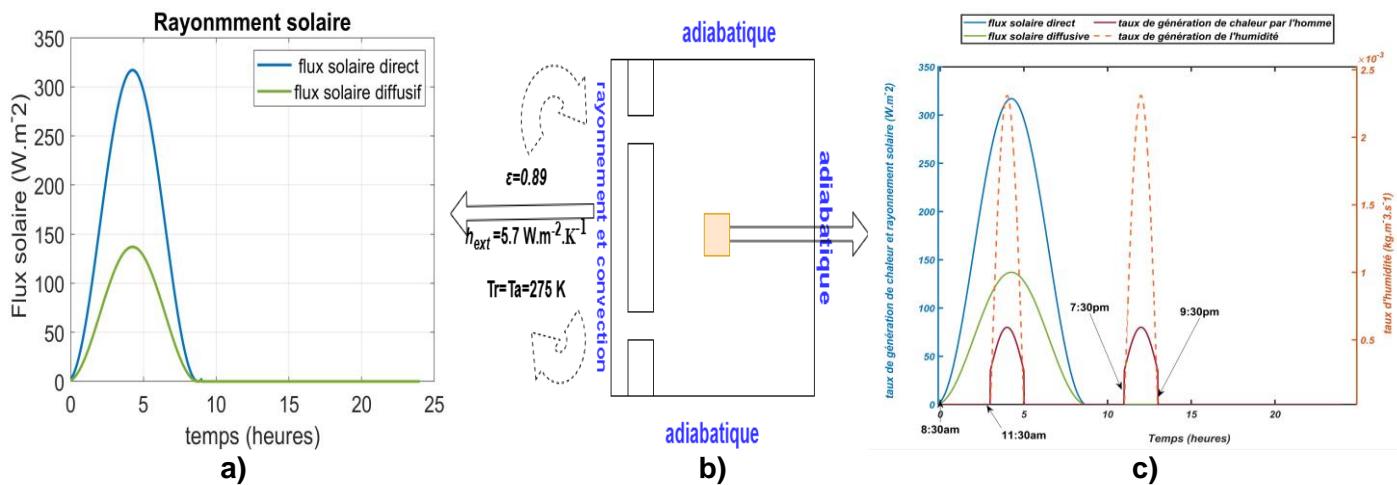


Figure 6. Conditions limites du modèle thermo-hygro-aédraulique

En complément du modèle thermique composé du modèle de rayonnement DO et du modèle de turbulence k- ω SST, un modèle d'espèce est nécessaire pour modéliser le transport d'humidité dans l'air, l'air humide étant considéré comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Pour ce modèle de mélange, l'approche Boussineq n'est plus compatible avec le modèle d'espèce [BAK 22]. Par conséquent, l'hypothèse des gaz parfaits incompressibles est supposée exprimer la relation entre la température et la densité. La loi *mixing law* est utilisée pour exprimer la relation du Cp avec la température. Les propriétés thermophysiques du mélange sont résumées dans le tableau 2.

Propriétés thermophysiques	Air	Vapeur d'eau	Mélange
ρ (kg.m ⁻³)	Gaz parfait	Gaz parfait	Gaz parfait
C_p (J.kg ⁻¹ . K ⁻¹)	1600	Cp (T)	<i>Mixing law</i>
λ (W.m ⁻¹ . K ⁻¹)	0,024	0,0261	<i>Mixing law</i>
μ (kg.m ⁻¹ . s ⁻¹)	1,789.10 ⁻⁵	1,34.10 ⁻⁵	1,72.10 ⁻⁵
D_m (m ² .s ⁻¹)	-	-	2,88.10 ⁻⁵
D_T (m ² .s ⁻¹)	-	-	Théorie cinétique

Tableau 2. Propriétés thermophysiques utilisées dans le modèle de mélange

3. Résultats

Pour fournir une étude complète du comportement du mur Trombe, il est important d'analyser la température, la vitesse et les profils de fraction massique de H₂O à différents instants. Notamment à 10 heures, correspondant à la phase d'ensoleillement solaire sans la présence d'occupants, la figure 7 met clairement en évidence le phénomène de convection naturelle qui s'installe dans le domaine étudié. On observe ainsi la circulation de l'air chaud vers le local adjacent au mur Trombe via l'ouïe supérieure.

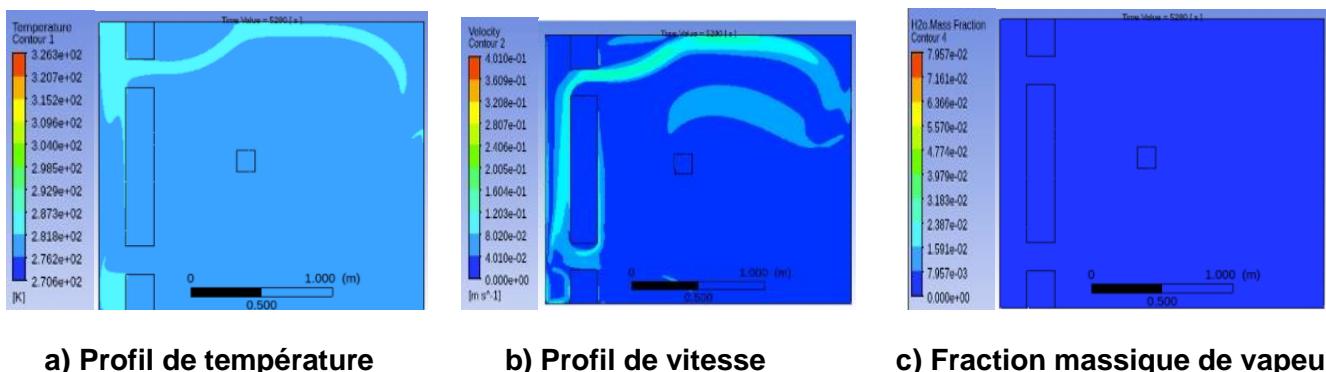


Figure 7. Résultats de simulation à l'instant $t = 10h$

A 12h30 (Figure 8), correspondant à un scénario où les occupants sont présents pendant les heures d'ensoleillement et où leurs activités contribuent à la dynamique thermique de l'environnement intérieur, on observe le panache thermique formé par les occupants dans lequel la vitesse de l'air ascendant atteint 0,16 m.s⁻¹. De plus, il apparaît que la distribution de l'humidité à l'intérieur du système est principalement affectée par l'effet de convection naturelle. Lorsque l'air chaud monte dans la pièce, il transporte l'humidité avec lui, entraînant une fraction de masse de vapeur distribuée à l'intérieur de la pièce adjacente.

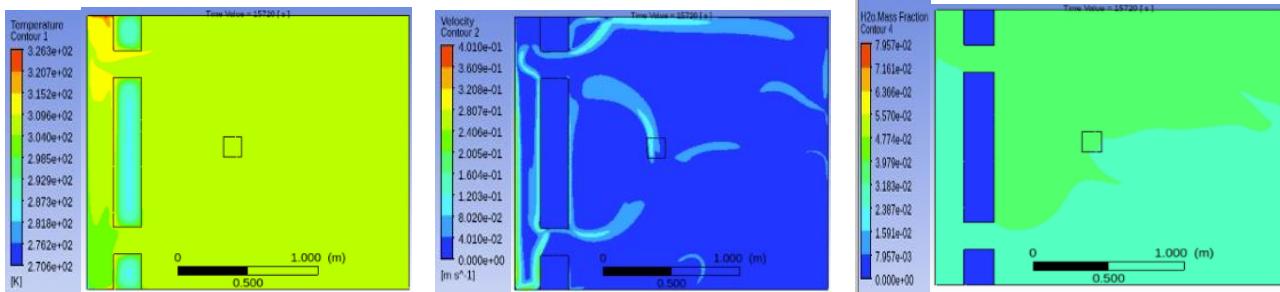


Figure 8. Résultats de simulation à l'instant $t = 12h30$

A 20 h (Figure 9), correspondant à la phase de présence des occupants pendant la nuit, on observe que le flux inverse déplace l'air chaud et humide verticalement, conduisant à la distribution de l'humidité de la cavité vers la pièce adjacente.

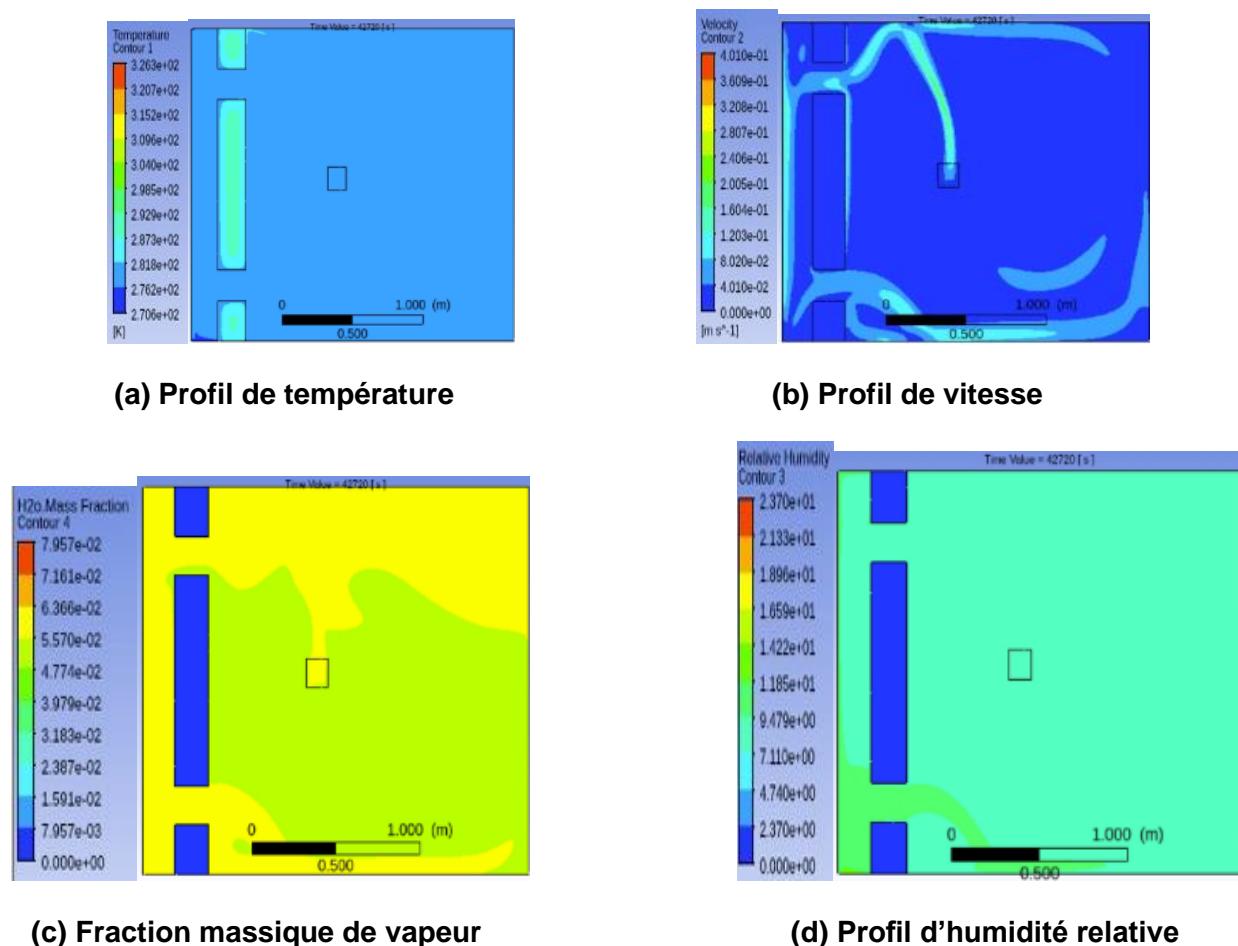


Figure 9. Résultats de simulation à l'instant $t = 20h$

Afin de vérifier la fonctionnalité des UDF implémentées ainsi que la convergence des résultats, différents points de référence sont pris en compte à différents endroits de la géométrie, comme indiqués sur la figure 10.

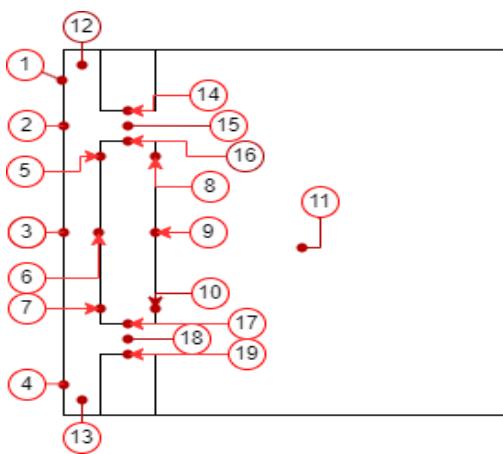


Figure 10. Position des points de référence

Position des capteurs	Nomenclature des capteurs
Vitrage	pt 1, pt 2, pt 3, pt 4
Surface du mur extérieur	pt 5, pt 6, pt 7
Surface du mur intérieur	pt 8, pt 9, pt 10
Centre de la pièce	pt 11
Ouïe supérieure	pt 14, pt 15, pt 16
Ouïe inférieure	pt 17, pt 18, pt 19

Tableau 3. Spécification des points de référence

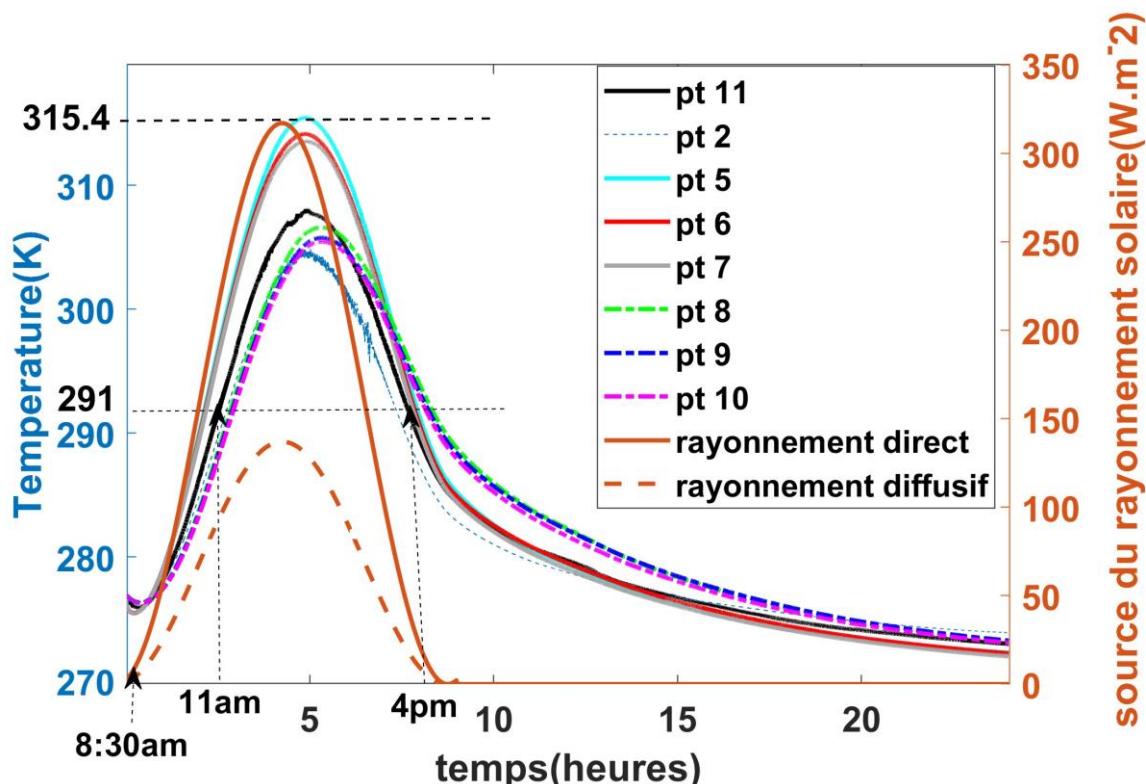


Figure 11. Profil de température

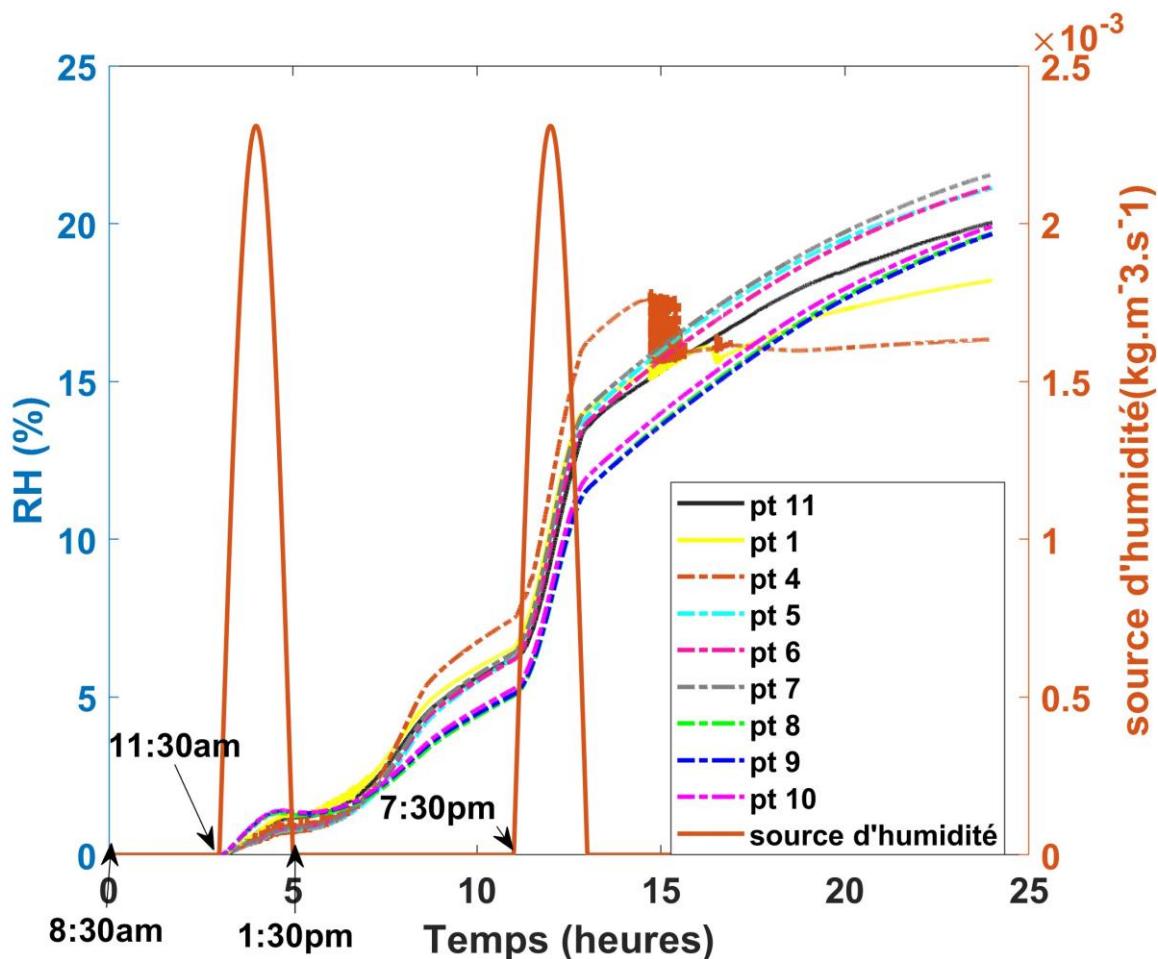


Figure 12. Profil d'humidité relative

La distribution de la température aux points concernés (Figure 11) illustre le comportement d'un mur Trombe pendant une journée d'hiver. Au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente, la surface de la paroi extérieure subit un réchauffement avec un décalage de 50 minutes, atteignant une température maximale de 315 K. L'analyse indique une homogénéité de la température à différentes sections de chaque côté de la paroi avec une différence maximale égale à 1,5 K. Il est également observé que la température ambiante est affectée par l'intensité solaire, en particulier lorsque l'air chaud circule et réchauffe l'espace intérieur pendant la journée. Après la fin du rayonnement solaire, la température de l'ensemble des capteurs diminue. Cependant, on observe que la surface de la paroi intérieure dépasse celle du côté de la cavité, ce qui confirme les propriétés d'isolation thermique du béton cellulaire. En supposant une température de confort intérieur minimale de 291 K, les résultats démontrent que le mur Trombe peut fournir un confort thermique aux occupants de 11 h à 16 h pendant l'hiver. Cela nécessite toutefois la mise en œuvre d'une stratégie de ventilation adéquate et d'une technique de gestion du fonctionnement des ouïes pour réduire les flux d'air inversés et les pertes de chaleur qui en résultent.

Les figures 11 et 12 montrent la corrélation entre la température et l'humidité relative, indiquant qu'une augmentation de la température de l'air pendant l'injection de la source d'humidité entraîne une augmentation de la teneur en humidité de l'air, conduisant à une légère augmentation des valeurs de RH. Par ailleurs, la température diminue la nuit, ce qui entraîne une augmentation rapide des valeurs de RH. On observe de plus la corrélation entre les niveaux d'humidité relative à divers points de surveillance et l'humidité relative au centre de la pièce, notamment en raison de l'ouverture des ouïes. Les tendances synchronisées sur tous les points de référence mettent en évidence l'influence de la stratégie de contrôle des ouïes sur la distribution de l'humidité relative et le comportement hygrothermique du système. De plus, l'analyse révèle que l'humidité relative maximale atteinte dans le système est de 22 %. Compte tenu du fait que la température de la paroi extérieure et de la surface

vitrée atteint 2 °C la nuit, cela conduit à un potentiel risque de condensation dans ces régions pendant cette période.

4. Conclusion

Cet article présente une analyse numérique du comportement transitoire d'un mur Trombe de configuration classique. Une méthodologie de modélisation de l'effet de l'humidité sur les murs Trombe est proposée. Pour comparer les résultats, les profils de température, de vitesse et d'humidité relative en fonction de différentes conditions de fonctionnement sont tracés. Les résultats mettent en évidence les interactions entre le flux d'air, la température et la distribution de l'humidité dans le mur Trombe, ce qui est crucial pour la conception et l'exploitation de bâtiments offrant des environnements intérieurs confortables et sains, en particulier pendant l'occupation nocturne. Les résultats indiquent que le mur Trombe peut maintenir efficacement le confort thermique des occupants de 11 h à 16 h pendant l'hiver. Cependant, l'étude met également en évidence un potentiel risque de condensation la nuit dans des conditions météorologiques similaires.

5. Références

- [SER 20] SERGEI K., SHEN C., JIANG Y., « A review of the current work potential of a Trombe wall », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 130, p. 109947, September 2020. doi: 10.1016/j.rser.2020.109947.
- [SZY 17] SZYSZKA J., KOGUT J., SKRZYPczAK I., KOKOSZKA W., « Selective Internal Heat Distribution in Modified Trombe Wall », IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 95, p. 042018, December 2017. doi: 10.1088/1755-1315/95/4/042018.
- [SUD 16] SUDPRASERT S., CHINSORRANANT C., RATTANADECHO P., « Numerical study of vertical solar chimneys with moist air in a hot and humid climate », International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 102, p. 645-656, November 2016. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.054.
- [DAH 22] DAHIRE H., KANNAN S. R., SAW S. K., « Effect of humidity on the performance of rooftop solar chimney », Thermal Science and Engineering Progress, vol. 27, p. 101026, January 2022. doi: 10.1016/j.tsep.2021.101026.
- [ELS 20] EL-SHERIEF M. A., MOHAMED H. A., SALEM AHMED M., « Design and Performance of Trombe Wall with Humidification for Air Cooling in Hot Arid Regions », Scholars Journal of Engineering and Technology, vol. 8, no. 8, p. 147-154, August 2020. doi: 10.36347/sjet.2020.v08i08.002.
- [ZHO 23] ZHOU S., BAI F., RAZAQPUR G., WANG B., « Effect of key parameters on the transient thermal performance of a building envelope with Trombe wall containing phase change material », Energy and Buildings, vol. 284, p. 112879, April 2023. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112879.
- [BAK 22] BAKER T. J., « Fluent User's Guide », 2022.
- [JRC] « JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission », consulté le 11 January 2024. Disponible en ligne : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [LIU 23] LIU P., JUSTO ALONSO M., MATHISEN H. M., HALFVARDSSON A., SIMONSON C., « Understanding the role of moisture recovery in indoor humidity: An analytical study for a Norwegian single-family house during heating season », Building and Environment, vol. 229, p. 109940, February 2023. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109940.
- [LI 18] LI J., LIU J., PEI J., MOHANARANGAM K., YANG W., « Experimental study of human thermal plumes in a small space via large-scale TR PIV system », International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 127, p. 970-980, December 2018. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.138.
- [AGG 12] AGGARWAL, « Predicting Energy Requirement for Cooling the Building Using Artificial Neural Network », Journal of Technology Innovation in Renewable Energy, 2012. doi: 10.6000/1929-6002.2012.01.02.6.