

Modélisation CFD des performances thermiques d'un mur Trombe.

CFD analysis of the thermal performance of a Trombe wall.

Afef LARIBI^{*}, Sylvie BEGOT¹, Valérie LEPILLER¹, Yacine AIT-OUMEZIANE¹, Philippe DESEVAUX¹

¹FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS
Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort, France
^{*}(auteur correspondant : afef.laribi@univ-fcomte.fr)

Résumé – Cette étude concerne l'analyse des performances thermiques d'un mur Trombe couplé à un local. Elle est réalisée via un modèle numérique CFD 2D permettant de simuler le comportement thermique du mur Trombe en régime permanent. Le modèle CFD prend en compte les transferts par conduction, convection et rayonnement ainsi que la turbulence de l'écoulement d'air. Après une validation des simulations à partir de résultats issus de la littérature, une étude paramétrique de l'influence de la largeur des ouïes et de l'épaisseur de la lame d'air sur l'efficacité thermique du système est réalisée.

Mots-clés : Mur Trombe ; énergie solaire passive ; CFD ; convection naturelle ; transfert thermique conjugué

Abstract – This study concerns the analysis of the thermal performance of a Trombe wall coupled to a room. It is performed using a 2D CFD model to simulate the steady-state thermal behavior of the Trombe wall. The CFD model considers conduction, convection and radiation transfers as well as airflow turbulence. After validation of the simulations using results from the literature, a parametric study concerning the influence of the vents size and air gap depth on the thermal efficiency of the system is carried out.

Keywords: Trombe wall; passive solar heating; CFD; free convection; conjugate heat transfer

Nomenclature

e	épaisseur, m	ε	émissivité, -
H	hauteur, m	φ	densité de flux, W/m ²
L	largeur, m	σ	constante de Stefan-Boltzmann, W/m ² K ⁻⁴
C_p	chaleur massique, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Indices et exposants	
h	coefficient d'échange convectif, W.m ⁻² .K ⁻¹	v	vitrage
v	vitesse, m.s ⁻¹	la	lame d'air
T	température, °C	cn	corps noir
Symboles grecs		is	isolation
λ	conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹	mm	mur massif
β	coefficient de dilatation thermique, K ⁻¹	o	ouïe
ρ	masse volumique, kg.m ⁻³	amb	ambiante
μ	viscosité dynamique, kg.m ⁻¹ .s ⁻¹	$cond$	conductif
α	absorptivité, -	$conv$	convectif
		rad	radiatif
		ext	extérieur

1. Introduction

Afin de réduire la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment, considéré comme le secteur le plus énergivore en France avec 40 % de la consommation énergétique, les solutions énergétiques passives sont une piste de recherche prometteuse. En effet, les systèmes solaires passifs apparaissent comme une alternative intéressante pour répondre aux besoins énergétiques d'un bâtiment en permettant d'économiser jusqu'à 30 % de l'énergie consommée [1]. L'une des techniques passives les plus performantes réside dans l'utilisation de murs Trombe. Un tel mur est un système composé, de l'extérieur vers l'intérieur, d'un vitrage séparé d'une paroi stockeuse opaque par une lame d'air ventilée. Afin de favoriser les échanges thermiques convectifs, des ouïes sont installées en parties haute et basse de la paroi stockeuse. Son intégration au bâtiment vise à valoriser le rayonnement solaire en associant deux phénomènes physiques : l'effet de serre à travers un vitrage et l'inertie thermique du mur.

Les performances d'un système mur Trombe sont affectées par divers paramètres, tels que la taille des ouïes et l'épaisseur de la lame d'air. Différentes études ont été réalisées afin de déterminer les valeurs permettant d'obtenir la meilleure efficacité thermique du mur. Fadhil [2] a étudié expérimentalement un mur Trombe intégrant un local de hauteur 1,5 m. Il a montré qu'en faisant varier l'épaisseur de la lame d'air de 10 à 30 cm, l'efficacité atteint une valeur maximale pour une épaisseur de 15 cm et diminue au-delà. Corasaniti et al. [3] ont étudié un mur Trombe tronqué de 3 m de hauteur, muni d'ouïes de 20 cm de largeur. Cette étude a montré qu'une meilleure efficacité thermique est obtenue quand l'épaisseur de la lame d'air varie entre 25 et 30 cm. Liping et al. [4] ont confirmé, à travers une étude numérique, que la valeur optimale de l'épaisseur de la lame d'air est égale au $(1/10)$ de la hauteur du mur et que la taille optimale des ouïes doit être égale au $(3/20)$ de la hauteur en se basant sur la variation du débit massique. Toutefois, les résultats de la littérature méritent d'être complétés en étudiant un système complet mur Trombe et local, en se basant sur des critères globaux caractéristiques de l'efficacité thermique du système. Dans ce contexte, notre étude vise à développer un modèle numérique permettant de simuler le comportement thermique d'un système mur Trombe. Le comportement du mur Trombe en régime permanent est étudié via un modèle CFD en deux dimensions prenant en compte les transferts par conduction, convection et rayonnement ainsi que la turbulence de l'écoulement d'air. Ce modèle est utilisé pour une première étude paramétrique de l'influence de l'épaisseur de la lame d'air et de la taille des ouïes sur les performances thermiques du système mur Trombe.

2. Simulation numérique du mur Trombe

2.1. Description du modèle numérique

La simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) est un outil d'investigation précieux permettant d'analyser des phénomènes thermiques et fluidiques complexes. Dans cette étude, le logiciel Ansys Fluent 19.1 a été utilisé afin de modéliser, en deux dimensions et en régime permanent, le comportement thermo-aérodynamique du mur Trombe intégrant un local.

Le système étudié (Figure 1) est un local formé de trois parois opaques en béton, chacune d'épaisseur 30 cm et d'une paroi semi-transparente d'épaisseur 6 mm. Le mur massif est en béton, recouvert d'une peinture noire d'épaisseur négligeable afin d'augmenter son absorptivité.

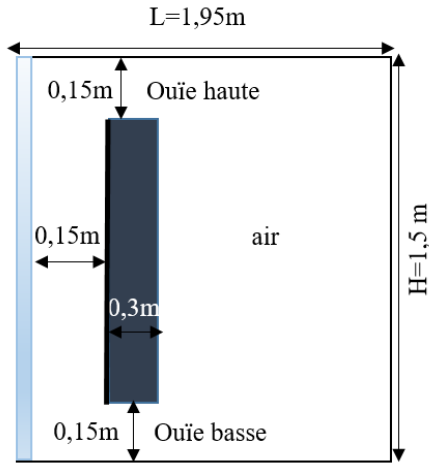


Figure 1 : Géométrie du cas test

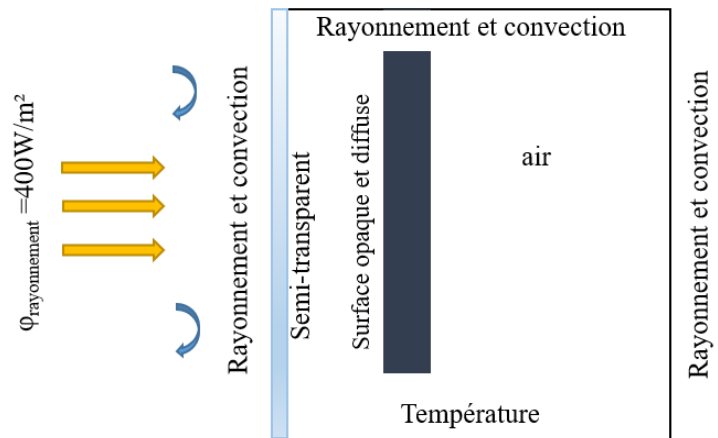


Figure 2 : Conditions aux limites du modèle

Le domaine d'étude, 2D, est délimité par le vitrage et les parois inférieure, supérieure et arrière du local. L'effet du milieu environnant est pris en compte sur la face arrière et la paroi horizontale supérieure. Celle-ci est donc soumise à une condition mixte de convection et de rayonnement. Une température fixe est considérée au niveau de la paroi horizontale inférieure. Au niveau du vitrage, le rayonnement solaire est pris en compte ainsi que les échanges superficiels convectifs avec le milieu extérieur. L'ensemble des conditions aux limites sont résumées sur la Figure 2.

Le coefficient d'échange convectif dans l'ambiance extérieure est calculé à partir de la vitesse du vent (donnée météorologique) en utilisant la corrélation suivante :

$$h_{ext} = 2.8 + 3 V_{vent} \quad [5] \quad (1)$$

Pour analyser le comportement thermo-aéraulique du système, les équations aux dérivées partielles régissant des lois de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par le biais de la méthode des volumes finis. L'écoulement de l'air au sein du système d'étude présente un caractère turbulent. En effet, son nombre de Rayleigh vaut $Ra = 7,06.10^{12}$ dans nos conditions. Il est défini par :

$$\frac{g\beta\phi H^4 \rho^2 C_p^2}{\lambda^3} \quad (2)$$

La turbulence est prise en compte dans nos simulations en utilisant les modèles RANS k-epsilon RNG et k-oméga SST, modèles communément utilisés pour la simulation CFD de systèmes mur Trombe [6]. Les propriétés thermo-physiques (Tableau 1) des matériaux sont considérées comme constantes.

	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹	ρ kg.m ⁻³	C_p J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹	μ Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹	β K ⁻¹
air	0,024	Boussinesq	1006,43	1,789.10 ⁻⁵	0,0033
Vitrage	1,4	2500	750	-	-
Béton	1,7	2240	880	-	-

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux

L'air est assimilé à un fluide incompressible, dont la masse volumique peut être calculée par l'approximation de Boussinesq :

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \quad (3)$$

Où : T_0 est la température de référence, ρ_0 la masse volumique prise à la température de référence et β le coefficient de dilatation thermique calculé à la température de référence.

Le rayonnement solaire, source de chaleur du système, transmis à travers la paroi transparente qu'est le vitrage, est pris en compte en utilisant le modèle de rayonnement DO (Discrete Ordinate), permettant de résoudre l'équation des transferts radiatifs [7].

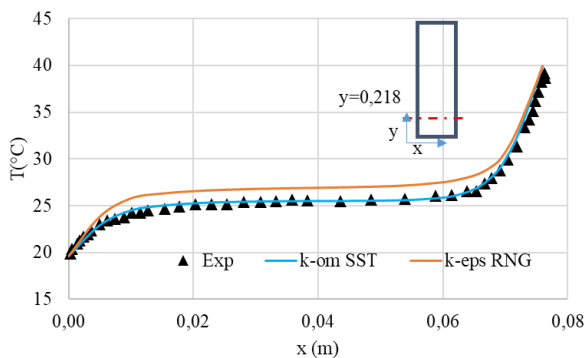
Les simulations sont réalisées en utilisant le solver « Pressure-based coupled » pour le couplage pression-vitesse. Les équations de transports sont résolues avec un schéma de discrétisation du second ordre de type upwind, à l'exception de l'équation des transferts radiatifs (modèle DO) qui utilise une discrétisation au premier ordre. La convergence des calculs est obtenue lorsque les équations de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie, de turbulence et de transfert radiatif présentent des résidus respectivement inférieurs à 10^{-3} , 10^{-3} , 10^{-6} , 10^{-3} , 10^{-6} .

2.2. Validation et étude de l'indépendance de la solution au maillage

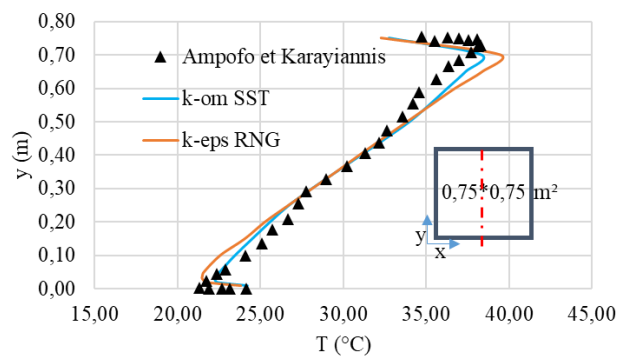
Afin de s'assurer de la pertinence des résultats du modèle, nous les avons confrontés à des résultats issus de la littérature, avant de vérifier leur indépendance au maillage utilisé [8-10].

La confrontation avec la littérature est réalisée sur deux géométries simples (Figure 3), souvent rencontrés dans le cas de transferts thermiques conjugués. La première géométrie est une cavité rectangulaire présentant un rapport d'aspect important [8-9], de dimensions $0,076 \times 2,18 \text{ m}^2$. La seconde géométrie est une cavité carré de dimensions $0,75 \times 0,75 \text{ m}^2$ [10].

La figure 3a présente la variation de la température sur la largeur de la cavité rectangulaire à une hauteur $y = 0,218 \text{ m}$. Elle compare les résultats obtenus avec les deux modèles de turbulence testés à des résultats expérimentaux [8-9]. La variation de la température au milieu de la cavité carrée en fonction de la hauteur [10] est présentée dans la figure 3b. Les résultats montrent une sensibilité des résultats au modèle de turbulence utilisé, le modèle k-om SST semblant présenter la meilleure cohérence avec les résultats expérimentaux. C'est donc ce modèle qui sera utilisé dans la suite de cette étude.



3a



3b

Figure 3 : 3a- Variation de la température en fonction de x en $y = 0,218 \text{ m}$, 3b-Variation de la température en fonction de y en $x = 0,375 \text{ m}$

A l'issue de cette étape, l'indépendance de la solution au maillage a été vérifiée sur la géométrie d'étude présentée sur la Figure 1. La variation de la vitesse moyenne au niveau de l'ouïe haute est utilisée comme critère afin de déterminer la taille de maillage adéquate (Figure 4). Il ressort de cette étude qu'un maillage avec un nombre d'éléments de 12 400 permet d'obtenir des résultats indépendants au maillage.

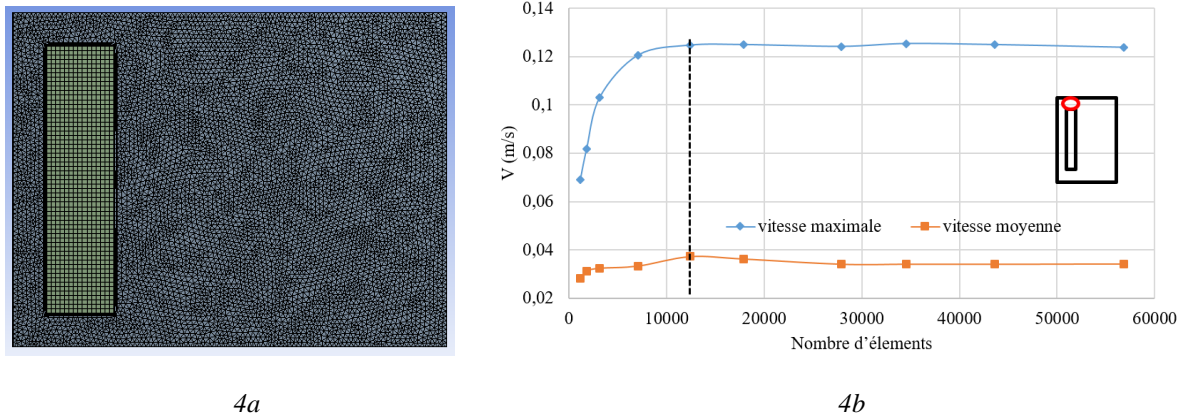


Figure 4 : 4a- Maillage du domaine d'étude , 4b- Variation de la vitesse moyenne au niveau de l'ouïe supérieure en fonction du nombre d'éléments du maillage

3. Résultats et discussion

3.1. Définition de l'efficacité

Des résultats relatifs à la configuration initiale (Figure 1) sont présentés sur les figures 5 et 6. Ils concernent les contours de température et de vitesse dans le domaine d'étude. On observe une stratification de température dans le local. Les vitesses dans la lame d'air les plus élevées se situent le long de la face externe du mur massif (zone la plus chaude du système) pour atteindre une valeur maximale de 0,19 m/s au niveau de l'ouïe supérieure. Les vitesses le long de la face interne du mur massif sont quant à elles très faibles.

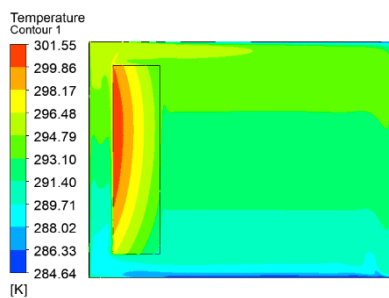


Figure 5 : Contours de température

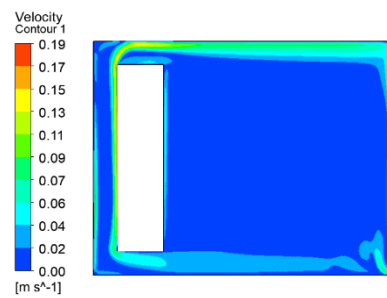


Figure 6 : Contours de vitesse

L'efficacité thermique η est un paramètre qui caractérise les performances thermiques du système mur Trombe. Il est défini comme le rapport de la somme des apports thermiques (conductif, convectif et radiatif) et l'énergie solaire reçus sur le vitrage $AI_{\text{solaire, incident}}$. L'apport thermique recouvre les quantités de chaleur apportée à l'air par conduction, convection et rayonnement (Eq 3-6). Ce paramètre est fréquemment utilisé comme indicateur de performance d'un mur Trombe [1].

$$\eta = \frac{Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad}}{I_{solaire,incident}A} \quad (4)$$

$$Q_{conv} = \dot{m}C_p(T_{sortie} - T_{entree}) \quad (5)$$

$$Q_{cond} = \frac{\lambda}{e} S_{echange}(T_{face\ externe} - T_{face\ interne}) \quad (6)$$

$$Q_{rad} = S_{echange}\sigma\varepsilon_{mur\ massif}(T_{face\ interne}^4 - T_{local}^4) \quad (7)$$

Où T_{sortie} et T_{entree} sont les températures moyenne d'entrée et de la sortie d'air à travers les ouïes basse et haute, \dot{m} est le débit massique d'air traversant l'ouïe, $T_{face_externe}$ et $T_{face_interne}$ sont les températures moyennes au niveau de la face externe et la face interne du mur massif, T_{local} est la température moyenne du local.

3.2. Influence de la taille des ouïes

Nous avons analysé dans un premier temps l'effet de la taille des ouïes sur l'efficacité thermique du système, en considérant une épaisseur de la lame d'air égale à 0,15 m. Les figures 7 et 8 représentent respectivement les évolutions des échanges thermiques et de l'efficacité thermique en fonction de la taille des ouïes. Nous remarquons que l'échange conductif décroît linéairement de 50 à 25 W/m quand la taille des ouïes augmente. Cette décroissance s'explique par la diminution de la surface d'échange de mur d'une part et par la diminution de la température de la face externe de la paroi stockeuse d'autre part. L'échange convectif croit lorsque la dimension des ouïes augmente jusqu'à 0,2 m puis reste quasiment constant quand cette dimension devient plus importante. L'augmentation de la taille des ouïes permet de favoriser l'échange convectif puisque le débit d'air traversant les ouïes augmente avec leur taille. La quantité de chaleur échangée par rayonnement est faible et semble peu influencée par la taille des ouïes.

L'efficacité thermique augmente quand la taille des ouïes varie de 0,1 à 0,15 m avant de décroître sensiblement au fur et à mesure que la taille des ouïes augmente. L'efficacité thermique présente une valeur maximale de 16,5 % pour une largeur de l'ouïe de 0,15 m correspondant au 10^{ème} de la hauteur de mur, résultat en accord avec les valeurs de la littérature [1].

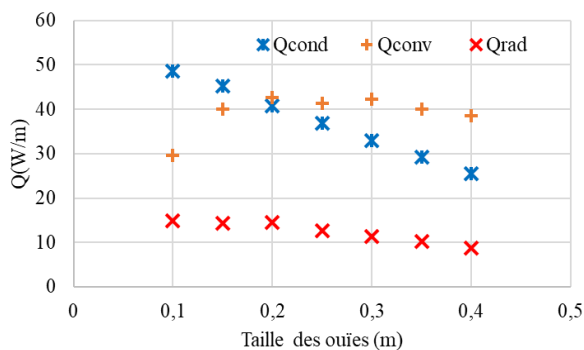


Figure 7 : Variation des échanges thermiques en fonction de la taille des ouïes

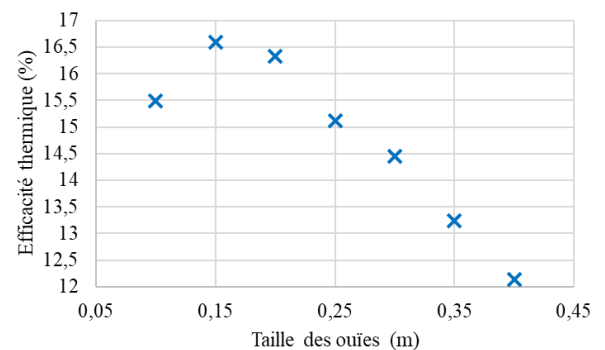


Figure 8 : Variation de l'efficacité thermique en fonction de la taille des ouïes

3.3. Influence de l'épaisseur de la lame d'air

La figure 9 et 10 présentent respectivement les évolutions des échanges thermiques et l'efficacité thermique en fonction de l'épaisseur de la lame d'air tout en gardant les mêmes dimensions du local associé (1,5 x 1,5 m²). La taille des ouïes est fixée à la valeur optimale de 0,15 m. Nous constatons une diminution régulière des performances thermiques du mur Trombe avec l'augmentation de l'épaisseur de la lame d'air. L'efficacité thermique passe de 18 à 14 % lorsque l'épaisseur de la lame d'air varie de 0,05 à 0,4 m. Cette baisse des performances est visible également sur la figure 11. Cette figure présente les contours de température et de vitesse pour trois valeurs d'épaisseur de la lame d'air (0,05, 0,10 et 0,25 m). En effet, lorsque l'épaisseur de la lame d'air augmente, le volume d'air augmente sensiblement ce qui entraîne une diminution de la température au niveau de la lame d'air. La température au niveau de la paroi stockeuse diminue, ainsi que la température de l'air dans le local. Les représentations des contours de vitesse confirment l'impact de l'augmentation de l'épaisseur de la lame d'air sur la dynamique de l'écoulement qui prend place entre le vitrage et la paroi stockeuse.

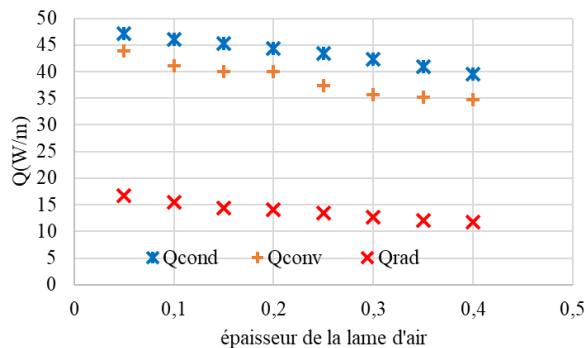


Figure 9 : Variation des échanges thermiques en fonction de l'épaisseur de la lame d'air

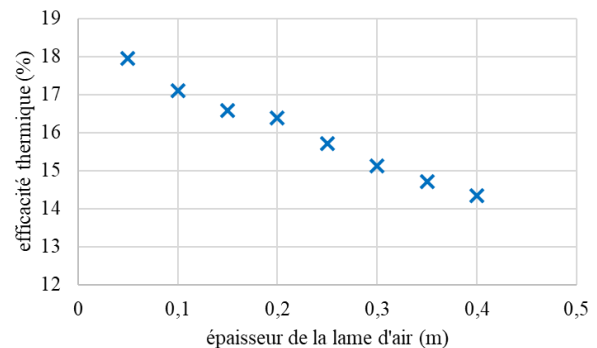


Figure 10 : Variation de l'efficacité thermique en fonction de l'épaisseur de la lame d'air

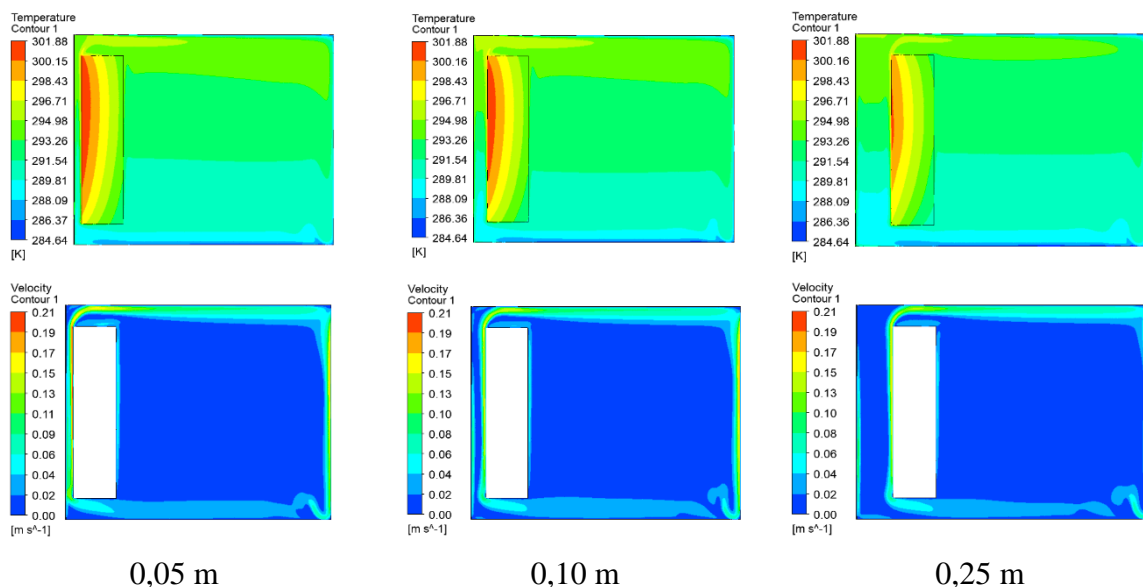


Figure 11 : Contours de température et de vitesse pour trois épaisseurs de la lame d'air (0,05, 0,10 et 0,25 m), pour une taille d'ouïes de 0,15 m

4. Conclusion

Cette étude concerne l'analyse des performances thermiques d'un mur Trombe couplé à un local. Elle est réalisée via un modèle numérique CFD 2D prenant en compte les transferts par conduction, convection et par rayonnement ainsi que la turbulence de l'écoulement d'air. Après une validation des simulations à partir de résultats issus de la littérature, le modèle CFD est utilisé pour étudier l'influence de la largeur des ouïes et de l'épaisseur de la lame d'air sur l'efficacité thermique du système mur Trombe. Il apparaît que l'augmentation de la taille des ouïes favorise l'échange par convection mais engendre une diminution des échanges par conduction et rayonnement. Nos résultats montrent qu'une largeur d'ouïe égale au 10^{ème} de la hauteur du mur conduit à la meilleure efficacité thermique. Concernant l'influence de l'épaisseur de la lame d'air, nos simulations montrent qu'augmenter cette épaisseur pénalise l'efficacité thermique du système.

Le développement d'un modèle CFD 3D instationnaire est actuellement en cours, ainsi que la réalisation d'une maquette expérimentale de système mur Trombe destiné à la validation des simulations. Ce modèle permettra une analyse systématique plus fine de l'influence des paramètres géométriques du système, des matériaux utilisés et de la présence d'ouvrants sur les performances thermiques du mur Trombe.

Références

- [1] Z. Hu, W. He, J. Ji, et S. Zhang, A review on the application of Trombe wall system in buildings , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, p. 976-987, avr. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.003.
- [2] E. Fadhil, effect of air gap width on the evaluation of the Trombe wall efficiency, *international review of Mechanical engineering (IREME)*, p. 7, 2019.
- [3] S. Corasaniti, L. Manni, F. Russo, et F. Gori, Numerical simulation of modified Trombe-Michel Walls with exergy and energy analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 88, p. 269-276, nov. 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.09.005.
- [4] L. Wang et A. Li, a numerical study of Trombe wall for enhancing stack ventilation in buildings, *23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, p. 7, 2006.
- [5] J. A. Duffie et W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition*. 2013.
- [6] M. Swiatek, Etude de la convection naturelle et de la stratification thermique dans une cavité inclinée et chauffée au milieu : application aux capteurs solaires autostockeurs, thèse de doctorat de l'Université Grenoble Alpes, 2015.
- [7] *Ansys fluent 19R1 theory guide, Ansys Inc, 4944, 2019*.
- [8] P. L. Betts et I. H. Bokhari, Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity , *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 21, n° 6, p. 675-683, déc. 2000, doi: 10.1016/S0142-727X(00)00033-3.
- [9] N. Benyahia, M. Aksouh, A. Mataoui, et H. F. Oztop, Coupling turbulent natural convection-radiation-conduction in differentially heated cavity with high aspect ratio, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 158, p. 106518, déc. 2020, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106518.
- [10] Y. Ji, CFD modelling of natural convection in air cavities, *CFD letters : An International Journal*, vol. 6, n° 1, Art. n° 1, mars 2014.