



MODELISATION NUMERIQUE DU COUPLAGE THERMIQUE

FLUIDE/STRUCTURE: ETUDE DU CAS DE LA DALLE CHAUFFANTE

A. Oudrane^{1,*}, B. Aour¹, M. Hamouda² and N. Damba¹

¹Laboratoire de Biomécanique Appliquée et Biomatériaux (LABAB), Département de Génie Mécanique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (ENPO-MA), (Algérie).

²Laboratoire de Développement Durable et Informatique (LDDI), Faculté des Sciences et Technologie, Université Ahmed Draya d'Adrar, (Algérie).

RESUMÉ

Ce présent travail se focalise sur une analyse numérique du couplage thermique fluide-structure dans une dalle chauffante. Cette dernière est composée d'une conduite de section rectangulaire disposée dans la dalle en béton d'un habitat. Nous avons modélisé les transferts thermiques de l'écoulement du fluide chaud dans la conduite. En effet, les équations de Navier-Stokes qui régissent cet écoulement ont été résolues numériquement. Ces équations ont été discrétisées par une méthode implicite aux différences finies. Les systèmes d'équations algébriques ainsi obtenus ont été résolus par les algorithmes de Gauss et Thomas. L'équation de la conduction dans la dalle en béton a été résolue en utilisant la même méthodologie que celle de l'écoulement. Dans ce travail, nous avons basé sur un algorithme qui fait interagir un milieu solide instationnaire avec un milieu fluide constitué d'une suite d'états permanents en assurant l'égalité des flux et des températures sur l'interface commune entre les deux milieux à chaque instant. La simulation numérique des transferts de chaleur et le comportement thermique de la dalle chauffante ont été analysés pour différents paramètres influençant la diffusion thermique. Les résultats obtenus montrent que la méthodologie numérique adoptée pour le contrôle du couplage fluide-structure sont acceptables en comparaison avec les résultats de la littérature.

Motsclés: Différences finies, Couplage thermique, Navier-Stokes, Transfert thermique, Instationnaire, Comportement thermique

1. INTRODUCTION

Parmi les sources d'énergie renouvelables, on trouve l'énergie solaire qui est la plus utilisée à l'intérieur des villes en méditerranée. Le solaire passif est un procédé de génération d'énergie thermique par conversion du rayonnement solaire en chaleur. L'énergie solaire est la plus développée par rapport aux autres énergies renouvelables [1-3]. Cependant, le comportement des systèmes de conversion de ce type d'énergie est fortement dépendant des variations des paramètres climatiques, comme la température, l'irradiation solaire et les moyens de stockages [4].

Dans le contexte du couplage thermique, Giles et al. [5] ont traité dans leur étude la stabilité numérique et les procédures du couplage thermique fluide-structure. Cette étude a pour objectif d'analyser le phénomène de la diffusion thermique avec une continuité de température et une quantité de chaleur à l'interface. Birken et al. [6] ont mis en évidence l'importance du couplage thermique fluide-structure dans les processus de refroidissement industriels pour les traitements thermiques des aciers [6]. Cette étude numérique est consacrée à l'étude de l'interaction thermique entre le fluide et la structure dans la dalle chauffante, également appelée transfert de chaleur conjuguée. Monge et Birken [7] ont considéré deux domaines avec des sauts dans le coefficient de conductivité de matériau à travers l'interface de connexion. Heuzé et al. [8] ont développé un outil numérique permettant de simuler la procédure du couplage thermomécanique en se basant sur un couplage fluide-structure permettant de décrire l'état de la matière dans toute la structure.

Actuellement, la simulation numérique des problèmes d'interaction fluide-structure est l'un des plus grands défis du calcul scientifique moderne. Des exemples typiques se présentent dans l'aéronautique, où l'écoulement de l'air autour d'un aéronef élastique ou des oscillations air-feuille dans l'écoulement de l'air qui sont bien présentés dans les travaux de Dowell et al. [9]. En plus, cette interaction a une importance dans le domaine des turbomachines, où le transfert d'énergie aura lieu entre un rotor et l'air [10]. Par ailleurs, dans le domaine de la biomécanique, le comportement élastique des membranes micro-pompes où artificielles dans le flux sanguin sont concernés par ce type d'interaction en se rapportant aux travaux de Scotti et al. [11] et Tezduyar et al. [12].

Le chauffage par le sol est une technique qui procure de bonnes conditions de confort tout en minimisant les consommations énergétiques. Dans ce contexte cette étude a pour but de caractériser l'échange thermique en régime variable entre un écoulement laminaire du fluide en convection forcée et une dalle en béton d'épaisseur considérable, dont la face supérieure est soumise à une température ambiante constante de 28°C.

La modélisation est basée sur le calcul des bilans thermiques au niveau des éléments du système: fluide-structure. La validation du modèle a été faite en utilisant les résultats obtenus par Andreo et al [13]. Ce dernier a utilisé le même système de chauffage avec un apport de chaleur assuré par l'énergie solaire. La deuxième étape de ce travail consiste à tester les paramètres influençant le transfert thermique au sein de la dalle chauffante, en analysant le

comportement thermique du système.

Dans le cadre de ce travail, nous nous proposons d'exploiter ce potentiel énergétique dans l'habitat par l'utilisation d'un plancher chauffant à circuit fermé. Les études sur la technique de chauffage par plancher sont multiples dans la région du nord d'Afrique. Nous nous intéressons au cas d'un système de chauffage solaire pour un local mono-zone dans un climat sec similaire à celui étudié par Mokhtari et al [14]. Le système est équipé par une dalle chauffante afin de stocker et de produire de la chaleur par le sol au sein d'une enveloppe habitable. Le principe de fonctionnement consiste à faire circuler directement dans la dalle en béton un fluide chauffé par des capteurs solaires [15]. En effet, cette dalle aura le rôle de diffuseur d'une chaleur douce et homogène dans toute l'habitation.

2. DESCRIPTION PHYSIQUE DE LA DALLE CHAUFFANTE ÉTUDIÉE

L'élément de la modélisation numérique est un plancher chauffant hydraulique qui est constitué de trois couches comportant un tube en serpentin (Figure 1). La première couche est celle d'isolation thermique. Le matériau d'isolation est une plaque de polystyrène expansé, qui est la plus utilisée dans ce genre des constructions habitables. La hauteur de la couche d'isolation est de 5 cm. Au-dessus de celle-ci, nous avons une chape de béton de 10 cm de hauteur, 1m de longueur et 1m de largeur. Dans cette dernière sont disposés les tubes en polyéthylène réticulé [16-17]. Ils sont très souvent utilisés pour la réalisation de planchers chauffants. En effet, ces tuyaux semi-rigides sont flexibles, et ils n'ont pas besoin de soudure à réaliser comme ceux de cuivre. Les tubes sont disposés sous forme en "U" avec un diamètre "d" de 20 mm et un espacement de 10 cm [17]. Une couche de revêtement en béton est superposée sur la grille du chauffage.

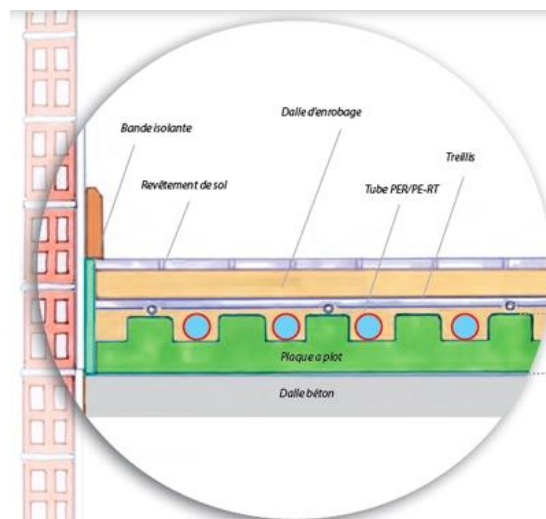


Fig. 1. Modèle physique de la dalle étudiée.

3. FORMULATION MATHÉMATIQUE

3.1. Modélisation d'écoulement du fluide dans la conduite

Nous avons opté dans un premier temps pour une étude d'un écoulement dans une conduite de section rectangulaire. Il s'agit d'écoulement du fluide visqueux entre deux plaques de grande étendue L , parallèles et séparées par une petite distance d . Les deux plaques sont fixes et le fluide est mis en mouvement par un gradient de pression. La solution régissant un écoulement de Poiseuille de vitesse maximale U_0 au milieu de la conduite de la dalle est la suivante [18]:

$$u_f(y) = u_0 \left(1 - 4 \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right) \quad (1)$$

où : d : est le diamètre de la conduite en (m) et y : la normale de la direction de diffusivité.

Il est à noter qu'un traitement rigoureux de la couche limite nécessiterait la résolution complète des équations de Navier-Stokes. Leur complexité a poussé Prandtl de les simplifier pour ne retenir que les termes les plus importants. L'idée principale consiste à négliger les gradients axiaux $\partial/\partial x$ devant les gradients transverses $\partial/\partial y$. On obtient ainsi les équations de Prandtl de la couche limite qui gouvernent l'écoulement laminaire dans la conduite de la dalle chauffante comme suit [19,20,21]:

- *Equation de la quantité du mouvement*

$$\frac{\partial u_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial u_f}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P_f}{\partial x} + \nu_f \frac{\partial^2 u_f}{\partial y^2} \quad \text{et} \quad \frac{\partial P_f}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

- *Equation de la conservation de la masse*

$$\frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

- *Equation de conservation de l'énergie*

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho_f \times C_{p_f}} \times \frac{\partial P_f}{\partial x} \times \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \quad (4)$$

3.2. Modélisation de la diffusion thermique

La dalle du plancher est considérée comme un solide homogène auquel on applique l'équation classique de la diffusion de la chaleur [22]. La diffusion de chaleur est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur dans un solide provoqué par une différence de température entre deux régions de ce milieu solide [23,24]. La modélisation numérique est basée sur l'étude bidimensionnelle de la conduction de la chaleur au sein de la dalle chauffante. L'équation de la conduction thermique est:

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{\rho_b \times C_{p_b}} \times \left(\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Cette équation est discrétisée par la méthode de différences finies en utilisant un schéma avant à trois points dans l'interface de contact. Après la discrétisation, nous obtenons un système algébrique tridiagonal, dont la résolution est faite par l'algorithme de THOMAS.

3.3. Conditions initiales et aux limites

- À l'instant $t = 0s$, le domaine de calcul considéré est initialisé par :

$$u_f(0) = 0; v_f(0) = 0; T_f(0) = 0 \quad (6)$$

$$T_b(0) = 0 \quad (7)$$

- La vitesse du fluide à l'entrée du canal est donnée par : $x = 0, 0 \leq y \leq d$;

$$u_f(y) = u_0 \left(1 - 4 \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right) \quad (8)$$

- À la sortie du canal on a : $x = L, 0 \leq y \leq d$;

$$\frac{\partial u_f}{\partial x} = 0; \frac{\partial v_f}{\partial x} = 0; \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

- À l'interface du couplage (fluide-structure) est régit par l'expression suivante : $0 < x < L$ et $y = d$;

$$- \lambda_b \times \left. \frac{\partial T_b}{\partial y_b} \right)_{y_b=d} = - \lambda_f \times \left. \frac{\partial T_f}{\partial y_f} \right)_{y_f=d} \quad (10)$$

où : λ_b et λ_f sont respectivement les conductivités thermiques du solide et du fluide.

- À l'interface dalle-air ambiante on a : $0 < x < L$ et $y = d$;

$$- \lambda_b \times \left. \frac{\partial T_b}{\partial y_b} \right)_{y_b=d} = h_c \times (T_b - T_{air}) \quad (11)$$

- À la frontière gauche de la dalle (Parois adiabatique) : $x = 0$ et $d \leq y \leq d+ep$;

$$\left. \frac{\partial T_b}{\partial y} \right)_{y_b=d} = 0 \quad (12)$$

- À la frontière droite de la dalle (Parois adiabatique) : $x = L$ et $d \leq y \leq d+ep$;

$$\left. \frac{\partial T_b}{\partial y} \right)_{y_b=d} = 0 \quad (13)$$

- À la surface inférieure du tube (Parois adiabatique) : $Y = 0$ et $0 \leq x \leq L$;

$$\left. \frac{\partial T_f}{\partial x} \right)_{x_f=L} = 0 \quad (14)$$

4. METHODOLOGIE DU COUPLAGE THERMIQUE

Le couplage fluide-structure stationnaire a été traité à de nombreuses reprises. Il consiste à coupler un solveur de Navier-Stokes à un solveur de conduction et à rechercher un état stationnaire dans les milieux fluide et structure. Il est à noter que ce type de problème a été déjà étudié numériquement par Errera et al. [25]. Bien qu'en s'appuyant sur les mêmes outils, les travaux que nous présentons ici sont de nature différente. En effet, nous nous intéressons au couplage instationnaire et plus précisément à la description détaillée des échanges thermiques dans une dalle en béton soumise à un flux convectif dû à un écoulement laminaire.

4.1. Interface du couplage (Fluide-Structure)

La figure 3 montre l'interface qui sépare deux milieux de conductivités thermiques différentes. La distance entre le nœud (J) et les nœuds voisins (J-1 et K+1) est calculée en fonction du pas d'espace [26,27,28].

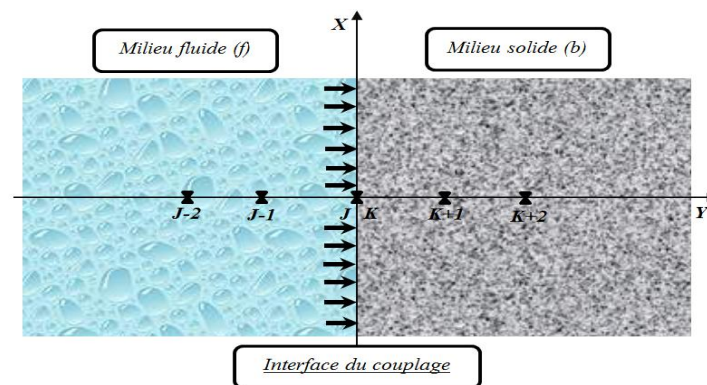


Fig. 3. Discrétisation spatiale à l'interface fluide-structure.

Une formulation par différences finies basée sur la méthode de Galerkin a été utilisée pour résoudre les équations qui régissent le modèle d'interaction fluide-structure dans la dalle chauffante [29]. Dans un contact parfait, considérons le cas où le transfert pariétal est entièrement de nature convecto-conductive. Quel que soit le mode de convection, le transfert d'énergie entre la surface d'un corps solide à la température (T_b) et le fluide se fait par conduction thermique puisque la vitesse du fluide est nulle à la surface du corps solide. La continuité de la densité du flux d'énergie à la surface permet donc d'écrire [30,31,32]:

$$\phi|_{(w.m^{-2})} = -\lambda_b \times \left. \frac{\partial T_b}{\partial y_b} \right|_{y_b=0} = -\lambda_f \times \left. \frac{\partial T_f}{\partial y_f} \right|_{y_f=0} \quad (15)$$

La discrétisation des termes de la densité du flux d'énergie à la surface inférieure du solide à l'aide d'une méthode implicite aux différences finies avec un schéma avant à trois points est donnée par l'expression suivante:

$$-\lambda_b \left. \frac{\partial T_b}{\partial y_b} \right|_{y_b=0} = -\lambda_b \frac{-3.T_b(I, K) + 4.T_b(I, K+1) - T_b(I, K+2)}{2.\Delta y_b} \quad (16)$$

D'autre part, la discrétisation des termes de la densité du flux d'énergie à la surface supérieure du fluide à l'aide d'une méthode implicite aux différences finies avec un schéma arrière à trois points est donnée par l'expression suivante:

$$-\lambda_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial y_f} \right|_{y_f=0} = -\lambda_f \frac{3.T_f(I, J) - 4.T_f(I, J-1) + T_f(I, J-2)}{2.\Delta y_f} \quad (17)$$

On pose :

$$C = \frac{\lambda_a}{\Delta y_a}, \quad \lambda_a = \frac{\lambda_b}{\lambda_f} \quad \text{avec} \quad \Delta y_a = \frac{\Delta y_b}{\Delta y_f} \quad (18)$$

où: Δy_a : est le rapport entre le pas d'espace du fluide et le pas d'espace du solide, λ_a : est le rapport entre la conductivité thermique du solide et la conductivité thermique du fluide, T_f : est la température du fluide et T_b : est la température du solide.

Après une égalité et simplification entre les deux équations (16) et (17), on trouve l'expression, de la température du couplage fluide-structure pour les nœuds de l'interface qui est donnée comme suit:

$$T_f(I, NJ) = T_b(I, 1) = \frac{C.(4.T_b(I, K+1) - T_b(I, K+2)) - (T_f(I, J-2) - 4.T_f(I, J-1))}{3.(1+C)} \quad (19)$$

5. ORGANIGRAMME DU COUPLAGE THERMIQUE FLUIDE-STRUCTURE

L'organigramme de la figure 4, montre la procédure du calcul de la température au niveau de la surface supérieure de la dalle en suivant le cheminement des étapes suivantes:

- Réquisitions des propriétés physico-thermiques du système fluide-structure ;
- Initialisation du système à la température ambiante (28°C) ;
- Résolution des équations de Navier-Stokes dans le domaine du fluide ;
- Résolution des équations de l'équation de la conduction dans la dalle ;
- Test sur la température du couplage ;
- Test sur le temps global du calcul ;
- Enregistrement des résultats obtenus.

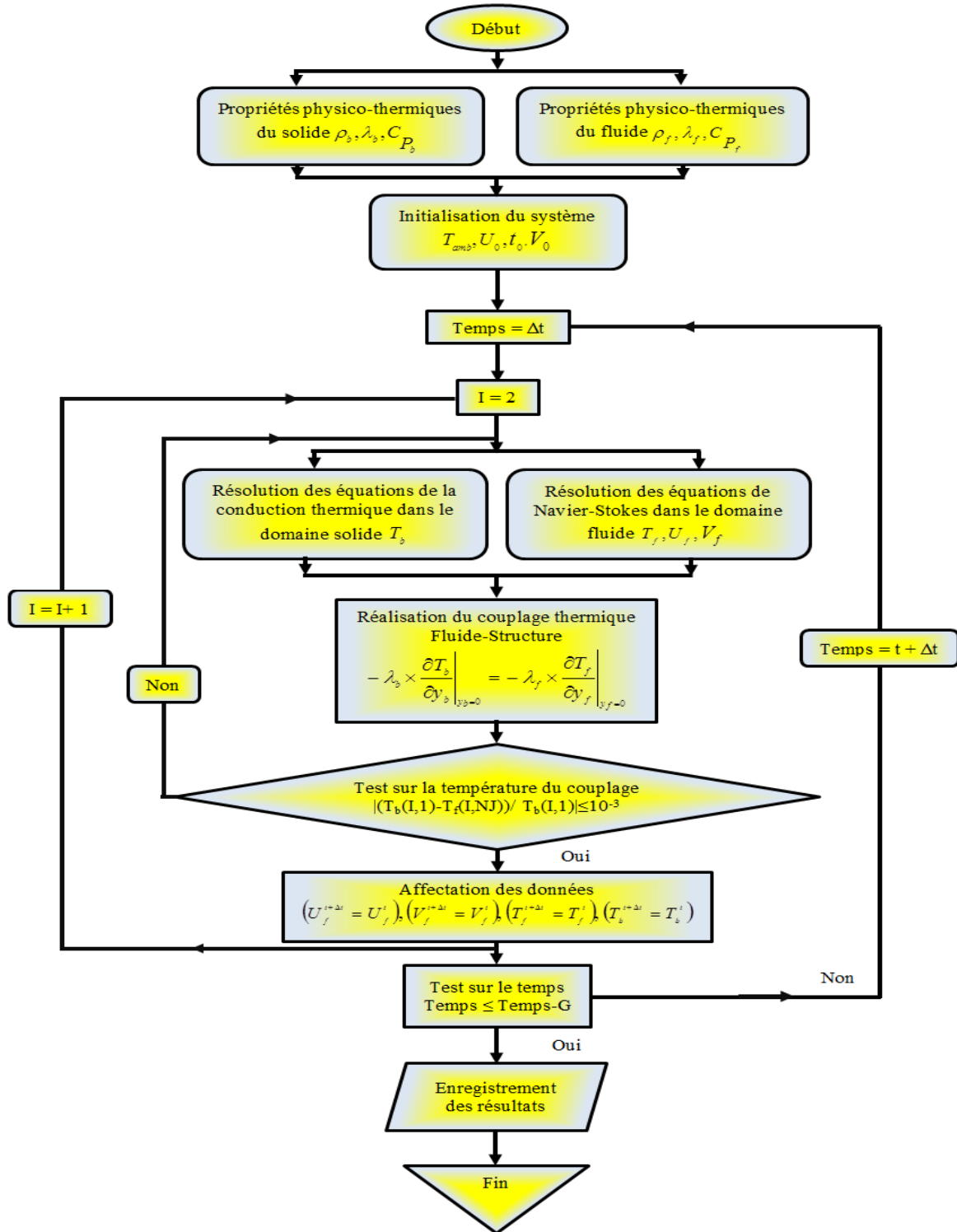


Fig.4. Organigramme de la modélisation numérique du couplage thermique fluide-structure.

6. DONNEES DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Le tableau 1 montre les propriétés physico-thermiques de l'air, du béton et de l'eau, qui sont utilisées dans la simulation numérique.

Tableau 1. Propriétés Physico-thermiques du domaine étudié [14,13,34,35].

Propriétés Physico-thermiques		Air	Eau _(réf)	Béton
C_p	Chaleur spécifique en (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1006	4182	880
ρ	Masse volumique en (Kg.m ⁻³)	1,177	1000	2000
μ	Viscosité dynamique en (Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	1,85.10 ⁻⁵	10 ⁻³	-
ν	Viscosité cinématique en (m ² .s ⁻¹)	1,75.10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	-
λ	Conductivité thermique en (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0262	0,597	1,75
Pr	Nombre de Prandtl	0,708	7,01	-

Les constantes utilisées pour la résolution numérique du problème étudié sont [13];

- Coefficient d'échange thermique : $h_c=8,12 \text{ W.m}^{-2} .\text{k}^{-1}$;
- Température de l'air ambiant : $T_{air}=28^\circ\text{C}$;
- Température d'entrée fluide : $T_e = 60^\circ\text{C}$;
- Nombre de Reynolds : $Re = 500$;
- Pas d'incrémentation du temps : $\Delta t = 10s$.

Les données de la grille du calcul dans les deux sous-domaines fluide-structure sont présentées dans le tableau 2:

Tableau 2. Données de la grille du calcul dans le domaine fluide-structure

	Longueur (m)	Hauteur (mm)	NI	NJ	NK	Δx	Δy	Pas du temps Δt (s)
Fluide	1	20	101	41	-	10 ⁻²	5x10 ⁻⁴	10
Structure		10	101	-	81		1,25x10 ⁻³	
NI	Indices des nœuds sur l'axe des abscisses des deux domaines de calcul.							
NJ	Indices des nœuds sur l'axe des ordonnées du domaine fluide.							
NK	Indices des nœuds sur l'axe des ordonnées du domaine solide.							
ΔX	Pas d'espace sur l'axe des abscisses des deux domaines de calcul.							
Δy	Pas d'espace sur l'axe des ordonnées des deux domaines de calcul.							
Δt	Pas du temps d'incrémentations de calcul.							

7. RESULTATS ET DISCUSSIONS

7.1. Validation du modèle numérique

La figure 5, montre l'évolution de la température d'un point à la surface supérieure de la dalle en fonction du temps. On remarque qu'il existe un accord acceptable entre les résultats obtenus par le modèle développé et ceux d'Andreo et al [13] et Mokhtari et al [14] avec des erreurs relatives égales à 5,04% et 1,77% respectivement.

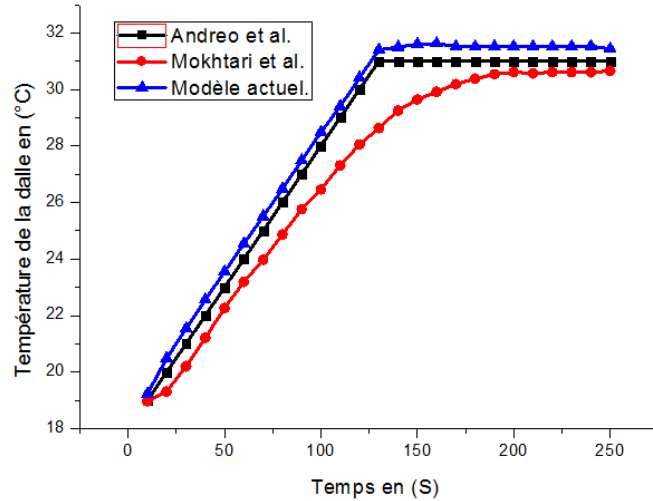
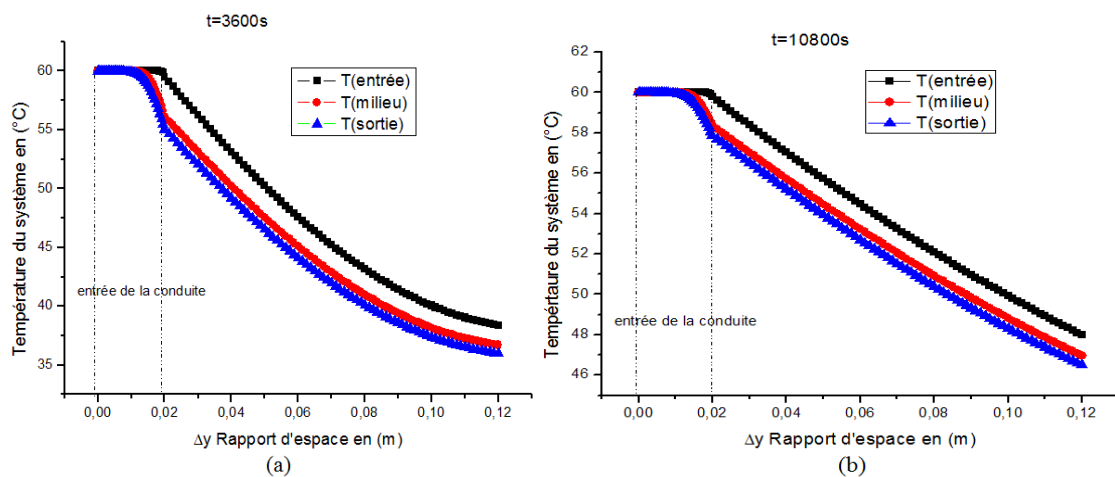


Fig.5. Evolution du profil de la température en un point au milieu de la dalle en fonction du temps global.

7.2. Evolution de la température de la dalle en béton en fonction du pas d'espace

La figure 6 présente la variation de la température de la dalle chauffante en fonction du rapport du pas d'espace pour quatre temps. Cette variation a été mise en évidence pour trois différentes positions dans le système (à l'entrée, au milieu et à la sortie). On peut remarquer que:

- L'évolution de la diffusion thermique dans la dalle en béton est presque similaire pour les trois positions prises en considération (l'entrée, milieu et la sortie).
- Un écart de température est remarquable entre les positions dans le système pour les quatre temps de calcul global choisis.
- Pour un rapport de pas d'espace variant entre 0 et 0,12 avec une température d'entrée du fluide dans la conduite à 60°C, la propagation de chaleur dans le solide diminue presque à des valeurs de température (au milieu) comprises entre, un peu près 38°C pour $t=3600s$ (Fig. 6.a), 47°C pour $t=10800s$ (Fig. 6.b), 48°C pour $t=14400s$ (Fig. 6.c) et 49°C pour $t=43200s$ (Fig. 6.d).



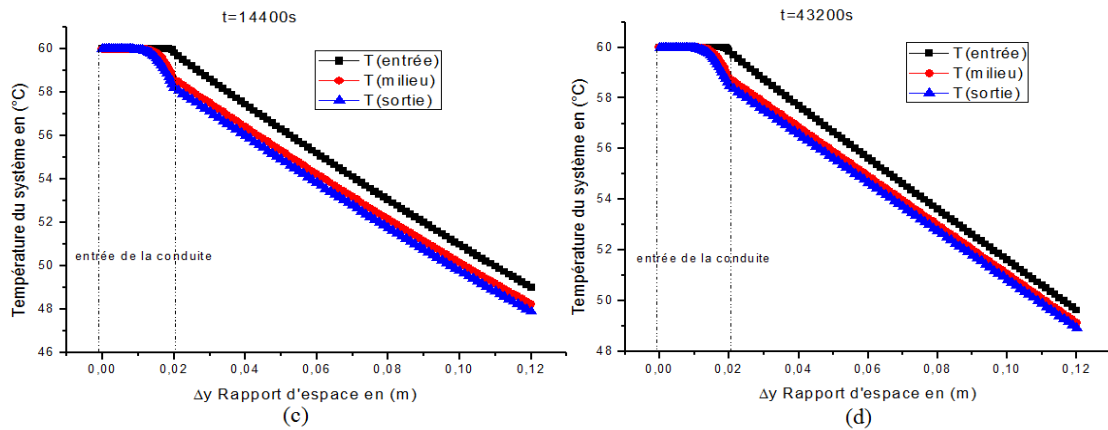


Fig. 6. Comparaison entre les trois profils (entrée, milieu et sortie) de la température en fonction du rapport du pas d'espace de la dalle pour (a) $t=3600s$, (b) $t=10800s$, (c) $t=14400s$ et (d) $t=43200s$.

7.3. Evolution de la température du système pour différentes épaisseurs de la dalle

La figure 7 illustre l'évolution de la température au milieu de la dalle chauffante en fonction du temps pour différentes épaisseurs de la couche supérieure du béton. Il apparaît clairement que la propagation de la chaleur dans la dalle diminue considérablement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche supérieure du béton. C'est-à-dire, quand, on diminue l'épaisseur du béton (par exemple 10 cm), l'évolution de la température augmente rapidement en fonction du temps et vice-versa. Autrement dit, la diffusion de la chaleur dans la dalle sera d'autant plus faible que la masse du béton est importante.

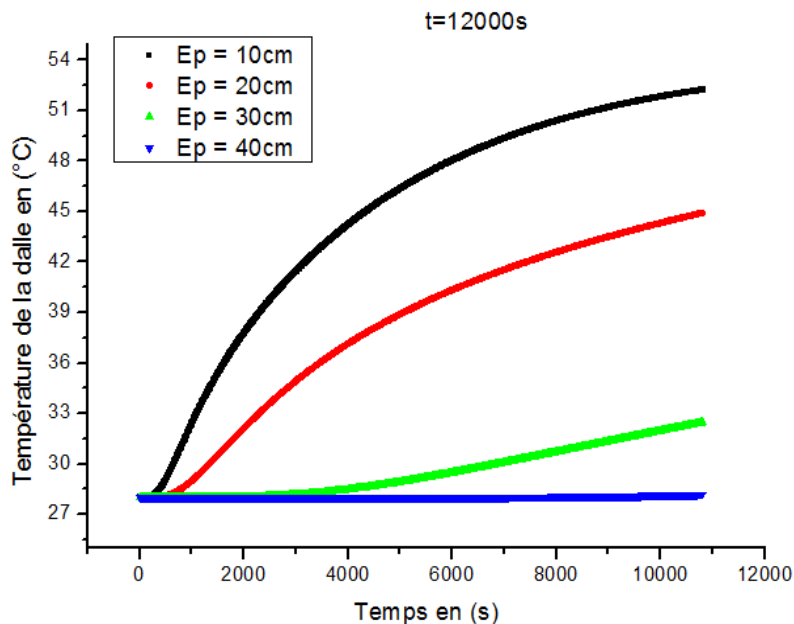


Fig. 7. Evolution du profil de la température dans la dalle en fonction du temps pour différentes épaisseurs du béton.

7.4. Effet de variation du coefficient d'échange convectif avec l'air ambiante

La figure 8 présente l'évolution de la température de la dalle en fonction du temps pour différents coefficients convectifs avec l'air ambiante. On peut observer que lorsque la valeur du coefficient d'échange convectif augmente, la diffusion thermique augmente d'une manière légère et vice-versa. On notera aussi que, la variation du coefficient d'échange convectif avec l'air ambiante a une influence notable sur la diffusion thermique de la chaleur au sein de la dalle. De plus, on notera que l'évolution de la température débutera à partir de 28°C, la température de l'ambiance, et elle augmentera en fonction du temps vers la plus grande valeur aux alentours de 60°C qui représente la température d'entrée du fluide dans la canalisation de la dalle.

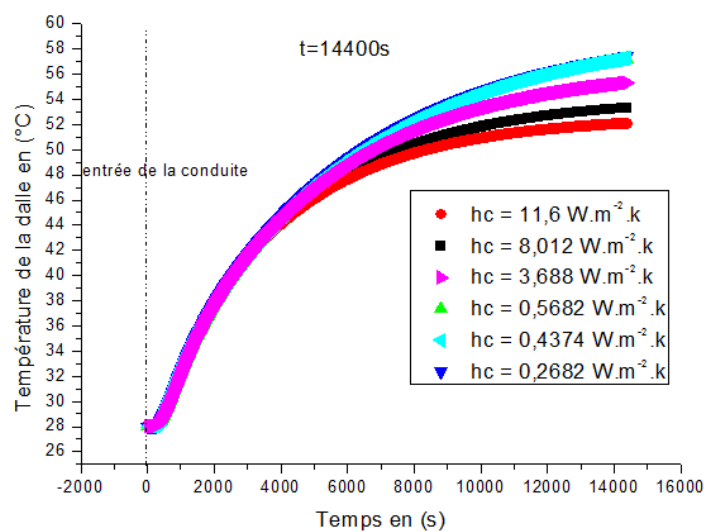


Fig. 8. Evolution de la température de la dalle en fonction du temps pour différents coefficients convectifs avec l'air ambiante.

7.5. Evolution du profil de la vitesse du fluide dans la canalisation

L'évolution de la vitesse du fluide au sein de la conduite en fonction du pas d'espace pour différentes nombres de Reynolds est illustrée par la figure 9. Dans cette figure, on constate que l'allure du profil de la vitesse de fluide dans la conduite est de forme parabolique. De plus, elle garde la même forme, mais sa valeur maximale augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds ou elle atteint une valeur maximale égale à 0.0175m/s pour $Re = 800$. Cette évolution montre que l'influence de la variation du nombre de Reynolds sur l'écoulement de fluide est importante.

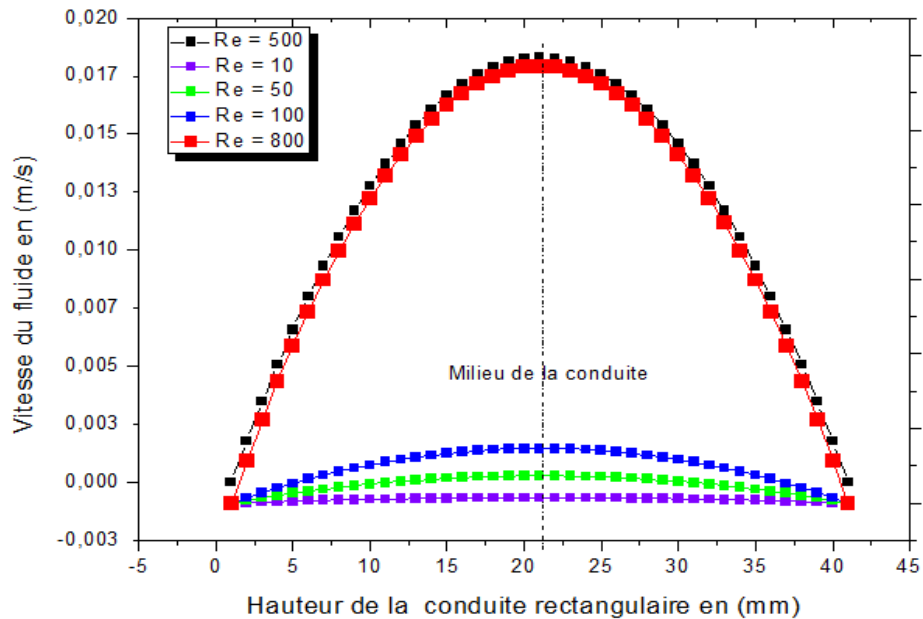


Fig. 9. Profils des vitesses du fluide au sein de la conduite en fonction du pas d'espace pour différents nombres de Reynolds.

8. CONCLUSION

L'objectif visé par cette étude numérique est l'adaptation d'une méthodologie numérique afin de pouvoir contrôler et caractériser les échanges thermiques au sein d'une dalle chauffante destinée pour le chauffage par le sol. En effet, nous avons analysé l'évolution de la température à l'entrée, au milieu et à la sortie du système en fonction du pas d'espace. En plus, nous avons analysé l'évolution de la température de la dalle pour différentes épaisseurs du béton et aussi l'effet de variation du coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant sur la température surfacique de la dalle. D'un autre côté, nous avons mis en évidence l'effet de la variation de nombre de Reynolds sur l'évolution du profil de la vitesse du fluide dans la canalisation.

La validité de cette approche numérique est confirmée en se basant sur les travaux qui ont été réalisés par Mokhtari et Andreo. La méthodologie que nous avons présentée permet d'analyser la phase transitoire thermique durant des temps très courts en utilisant le modèle numérique actuel du couplage thermique fluide-structure.

Nomenclatures

C_p	Capacité calorifique.	$W.m^{-1}.K^{-1}$
d	Diamètre de la conduite.	m
E_p	Epaisseur du béton.	m
hc	Coefficient convectif avec l'air ambiant.	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_0	Coefficient convectif référence.	$W.m^{-2}.K^{-1}$
I	Indice d'incrémentation sur l'axe des abscisses.	-
L	Longueur de la conduite.	m

J	Indice d'incrémentation sur l'axe des ordonnées dans le domaine fluide.	-
k	Indice d'incrémentation sur l'axe des ordonnées dans le domaine solide.	-
Pr	Nombre de Prandtl.	-
P_f	Pression du fluide.	Pas
φ_s	Quantité de la chaleur interne.	$W.m^{-2}$
Re	Nombre de Reynolds.	-
T_{air}	Température de l'air.	K
T_e	Température d'entrée du fluide dans la conduite.	K
T_{milieu}	Température au milieu de la dalle.	K
$T_{entrée}$	Température à l'entrée de la conduite.	K
T_{sortie}	Température à la sortie de la conduite.	K
T^*	Température adimensionnelle.	-
T_f	Température du fluide.	K
T_b	Température du béton.	K
t	Temps.	s
U_0	Vitesse initiale longitudinale du fluide.	$m.s^{-1}$
U^*	Vitesse longitudinale adimensionnelle du fluide.	-
V_f	Vitesse initiale transversale du fluide.	$m.s^{-1}$
V^*	Vitesse initiale transversale adimensionnelle du fluide.	-
y	Normale directionnelle de diffusivité du fluide	-
Symbols grecs		
λ	Conductivité thermique.	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_a	Rapport entre la conductivité thermique du fluide et du solide.	-
μ	Viscosité dynamique du fluide.	$Kg.m^{-1}.S^{-1}$
ρ	Masse volumique.	$Kg.m^{-3}$

9. REFERENCE

- [1] A. Mehdary, A. Naamane, K. M'sirdi (2011). "Real Time Implementation Control for multi-source energy system". Sustainability in Energy and Building, Page 524.
- [2] Ky Le. (2008). "Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments". Thèse P.h.D, soutenu le 10 Juillet 2008. Laboratoire de génie électrique, Institut Polytechnique de Grenoble, la France.
- [3] G. Tina, S. Scrofani (2008). "Electrical and thermal model for PV module temperature evaluation". IEEE Electro Technical Conference, Pages 585-590.
- [4] M. Abarkan (2014). "Modélisation et Analyse du comportement d'un Bâtiment équipé d'un Système Multi Sources d'énergie". Thèse P.h.D de l'Université Aix-Marseille, la France.
- [5] M. B. Giles (1997). "Stability analysis of numerical interface conditions in fluid-structure thermal analysis". International journal for numerical methods in fluids, vol. 25, pp. 421-436.
- [6] P. Birken, K. Quint, S. Hartmann, "A. Meister. (2010). A time-adaptive fluid-structure interaction method for thermal coupling". Comput Visual Sci. 13. pp.331-340, DOI 10.1007/s00791-010-0150-4.
- [7] A. Monge, and P. Birken. (2018). "On the convergence rate of the Dirichlet-Neumann iteration for unsteady thermal fluid-structure interaction". Comput Mech. pp. 62- 525, doi.org/10.1007/s00466-017-1511-3.
- [8] T. Heuzé, J. B. Leblond et J. M. Bergheau. (2011). "Modélisation des couplages fluide/solide dans les procédés d'assemblage à haute température". Mécanique & Industries 12. pp.183-191.
- [9] E. Dowell, J. Thomas and K. Hall (2004). "Transonic limit cycle oscillation analysis using reduced order aerodynamic models". Journal of Fluids and Structures 19. pp.17-27.
- [10] K. Willcox, J. Paduano and J. Peraire (1999). "Low order aerodynamic models for aeroelastic control of turbomachines". In 40th AIAA ASME ASCE AHS ASC structures, structural dynamics and materials conference, St Louis, MO.
- [11] C. Scotti and E. Finol (2007). "Compliant biomechanics of abdominal aortic aneurysms: a fluid-structure interaction study". Computers and Structures. 85: pp.1097-1130.
- [12] T. E. Tezduyar, M. Schwaab and S. Sathe (2008). "Sequentially-coupled arterial fluid-structure interaction (scafsi) technique". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.
- [13] A. Ugo, B. Fabien, V. Adeline (2015). "Etude de la diffusion de la chaleur dans un plancher chauffant en environnement terrestre". Étude de l'université de Paul Sabatier, Toulouse III, la France.
- [14] F. Mokhtari, N. Ait Messaoudène, A. Hamid et M. Belhamel (2006). "Etude du comportement thermique d'une maison munie d'un système de chauffage solaire". Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4, pp.363 - 370.
- [15] I. Sobhy, A. Brakez, B. Benhamou (2014). "Modélisation dynamique du comportement thermique d'un plancher chauffant avec circuit fermé à Marrakech"; 1^{ere} Colloque Franco-Marocain sur les Energies Renouvelables, COFMER'01, Rabat.
- [16] Fiche Technique Tube PER Prégainé, 9 1, Rue Duruisseau, PA des Chesnes - 38297 St Quentin -

Fallavier, Date de mise à jour: 22/06/16.

- [17] A. Oudrane, B. Aour, M. Benhamou (2016). "Étude et analyse paramétrique d'une installation solaire: plancher solaire dicte d'implanter dans la région d'Adrar". *ElWahat pour les Recherches et les Etudes* Vol.9 n°1, pp. 27 – 49.
- [18] E. Noel, M. Delaune (2012). "Simulation numérique des équations de Navier-Stokes", *Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2011–39*, institut national des sciences appliquées de Rouen département sciences et techniques pour l'Ingénieur, de l'université -76801 Saint Etienne du Rouvray.
- [19] P. Marty (2012). "Transferts thermiques convectifs". *Génie des Procédés Master 2*, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [20] N. B. Hassine, X. Chesneau, A. H. Laatar (2017). "Numerical simulation of heat and mass transfers during solar drying of sewage sludge: Radiation effect". *Energy Procedia* 139, pp. 804–809.
- [21] M. S. Abdul Aziz, M. Z. Abdullah (2014). "Thermal Fluid-Structure Interaction in the Effects of Pin-Through-Hole Diameter during Wave Soldering". *Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering Volume 2014, Article ID 275735, 13 pages*, doi.org/10.1155/2014/275735.
- [22] A. Oudrane, B. Aour, M. Hamouda et M. Benhamou (2016). "Méthodologie pour la détermination de l'écartement optimal de la chaîne tubulaire d'une dalle chauffante". *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 19 N°1, pp. 11 – 19.
- [23] Y. Debard (2011). "Méthode des éléments finis: thermique, Master Modélisation Numérique et Réalité Virtuelle". Université du Mans.
- [24] A. D. Chiasson, J. D. Spitler, S. J. Rees (2000). "A Model for simulating the performance of a pavement heating system as a supplemental heat rejecter with closed-loop ground-source heat pump systems". *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 122, pp.183-191.
- [25] M. P. Errera, G. Chaineray, S. Chemin (2007). "Etude du transitoire thermique dans un matériau via un couplage convection-conduction". *Congrès Français de Thermique, SFT 2007, Île des Embiez*.
- [26] E. Saadtdjian (1998). "Phénomènes de transport et leurs résolutions numériques". 2^{ème} édition, Polytechnica, 15 rue Lacépède F-75005, ISBN2-84045-057-6, Paris.
- [27] G. Florides, S. Kalogirou (2007). "Ground heat exchangers—A review of systems: models and applications". *Renewable Energy* 32, pp. 2461–2478.
- [28] M. Ghalambaz, E. Jamesahar, A. Ismael, J. Chamkha (2017). "Fluid-structure interaction study of natural convection heat transfer over a flexible oscillating fin in a square cavity". *International Journal of Thermal Sciences* 11, pp.256-273.
- [29] A. Al-Amiri, K. Khanafer (2011). "Fluid–structure interaction analysis of mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity with a flexible bottom wall". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, pp. 3826–3836.
- [30] S. Mergui, transferts thermiques, licence de mécanique 2^{ème} année, UPMC, université de

Sorbonne.

- [31] S. Abide, S. Viazzo, C. Sollicec (2018). "Simulation numérique du refroidissement d'une plaque plane par un jet plan impactant". LAMPS-GME, Université de Perpignan, 52 Avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan, la France.
<https://docplayer.fr/25679830-Simulation-numerique-du-refroidissement-d-une-plaque-plane-par-un-jet-plan-impactant.html>, (Page consulté le 29/05/2018).
- [32] D. Gobin, D. Levesque, C. Benard (1979). "Stockage de l'énergie solaire: simulation numérique du transfert d'énergie par conduction et rayonnement dans un milieu à deux phases". Revue de physique appliquée, tome 14, page 125.
- [33] H. Mahdaoui, X. Chesneau, A. H. Laatar (2017). "Numerical simulation of flow through a porous cylinder". Energy Procedia 139, pp. 785-790.
- [34] L. Chahwane (2011). "Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments". Thèse P.h.D de l'université de Grenoble la France.
- [35] A. Oudrane (2018). "Contribution à la modélisation et au développement des systèmes de chauffage solaire à usage individuel". Thèse P.h.D d'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran - Maurice Audin, Algérie.