

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

**Modélisation d'un local chauffé par un mur
intérieur à température imposée d'une seule face**

Présenté par :

- Laradji Mohammed El amine.
- Kebir Yahia.
- Adjadji Fayçal.

Soutenu publiquement le : ,devant le jury

M. TAIBI Bouziane	MAA	CU Naama	Président
M. KAID Nouredine	MAA	CU Naama	Encadreur
M. Bounoua Nouredine	MAA	CU Naama	Examineur

Année universitaire 2016-2017

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

mes chers parents

Mes frères et mes sœurs

*A tous mes amis et
mes collègues d'étude.*

Amine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

mes chers parents

Mes frères et mes sœurs

*A tous mes amis et
mes collègues d'étude.*

Yahia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents

Mes frères et mes sœurs

*A tous mes amis et
Mes collègues d'étude.*

Fayçal

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur N. KAID, pour son suivi, ses conseils, sa contribution et son aide tout le long de ce travail.

A tous nos professeurs du département Science et technologie et les enseignants, qui ont contribué de près ou de loin de nous avoir aidé.

Enfin, un très grand merci à toutes nos famille et nos amis(e), et nos collègues de la promo «Master 2-2017».

Nomenclature

g	Accélération gravitationnelle	[m/s ²]
H	Hauteur de la cavité	[m]
L	Longueur de la cavité	[m]
P	Pression	[N/m ²]
S	Terme source	
C _p	Chaleur spécifique à pression constante	[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]
t	Temps	[s]
H	Coefficient de convection	[W m ⁻² K]
T	Température dimensionnelle	[K]
U, v	Composantes horizontale et verticale dimensionnelles de la vitesse	[m/s]
I ₀	Constant solaire	[W.m ⁻²]
TSV	Temps solaire vraie	[s]
TSM	Temps solaire moyenne	[s]
ET	Equation du temps	[s]
TU	Temps universelle	[s]
S*(i,y)	Eclairement direct	[W.m ⁻²]
D*(i)	Eclairement diffus	[W.m ⁻²]
G*(i,y)	Eclairement globale	[W.m ⁻²]
R _s	Rapports d'éclairement direct	[W.m ⁻²]
R _D	Rapports d'éclairement diffus	[W.m ⁻²]
R _g	Rapports d'éclairement global	[W.m ⁻²]
E ₀	Éclairement extraterrestre normale	[W.m ⁻²]
E _b	Éclairement normal (direct)	[W.m ⁻²]

E_d	Éclairement diffus horizontal	$[\text{W.m}^{-2}]$
E_T	Éclairement totale	$[\text{W.m}^{-2}]$

Symboles grecs

Γ	Coefficient de diffusion,	$[\text{m}^2/\text{s}]$
α	Diffusivité thermique	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ν	Viscosité cinématique,	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ν	Viscosité dynamique,	$[\text{Pa.s}]$
λ	Conductivité thermique,	$[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$
ρ	Masse volumique,	$[\text{Kg}/\text{m}^3]$
θ	Température adimensionnelle	

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynold
Gr	Nombre de Grashof
Ra	Nombre de Rayleigh
Nu	Nombre de Nusselt
P_r	Nombre de Prandtl
B_i	Nombre de Biot

Liste de figure

Figure I-1 : schéma de conduction.	3
Figure I-2 : schéma de Rayonnement	3
Figure I-3 : schéma de convection	4
Figure I-4 : La cloche de jardinier	5
Figure I-5: capteurs à air	5
Figure I-6 : Les capteurs à eau (sans vitrage)	6
Figure I-7 : Tour solaire	7
Figure I-8: capteurs plans avec couverture	7
Figure I-9: Capteur stockeur	8
FigureII.1: Une représentation de maillage structuré et non structuré pour la méthode de volume fini	13
FigureII.2: Logo du COMSOL	17
Figure III.1 : Les model de géométrie	20
Figure III.2: condition aux limites	29
Figure IV-1 : flux de chaleur à travers une journée (01/01/2017) a Naâma	33
Figure IV-2 : programme de calcule de flux solaire en fonction de la date	34
Figure IV-3 : isotherme à 8 :00 h	35
Figure IV-4 : surface Température à 8:00	35
Figure IV-5 : Velocity magnitude à 8 :00	36
Figure IV-6 : isotherme à 13 :00	36
Figure IV-7 : la température en 17:00	37
Figure IV-8 : Magnitude de Vitesse à 13 :00	37
Figure IV-9 : isotherme à 17 :00	38
Figure IV-10 : surface à 17 :00	38
Figure IV-11 : surface (Magnitude de la Vitesse) à 17 :00	39
Figure IV-12 : transfert de la température dans la chambre par différence temps 8 :00 h,13 :00h ,17 :00h (mur Trombe en brick)	39
Figure IV-13 : isotherme à 8 :00	40
Figure IV-14 : surface à 8 :00	40
Figure IV-15 : Velocity magnitude à 8 :00	41
Figure IV-16: Velocity magnitude à 8 :00	41
Figure IV-17: isotherme à 13 :00	42
Figure IV-18 : surface à 13 :00	42
Figure IV-19 : Velocity magnitude 13 :00	43
Figure IV-20 : surface (Velocity magnitude) à 13 :00	43
Figure IV-21 : isotherme à 17 :00	44
Figure IV-22 : surface à 17 :00	44
Figure IV-23 : Velocity magnitude à 17 :00	45
Figure IV-24 : surface (Velocity magnitude) à 17 :00	45
Figure IV-25 : transfert de la température dans la chambre par différence temps 8 :00 h,13 :00h ,17 :00h (mur Trombe en sel)	46
Figure IV-26 : isotherme à 08 :00	47
Figure IV-27 : surface à 17 :00	47
Figure IV-28 : vitesse conteur à 08 :00	48
Figure IV-29: vitesse à 08 :00	48
Figure IV-30 : isotherme à 13 :00	49
Figure IV-31 : surface à 13 :00	49
Figure IV-32 : vitesse conteur à 13 :00	50
Figure IV-33 : vitesse à 13 :00	50

Figure IV-34 : isotherme à 17 :00	51
Figure IV-35 : surface à 17 :00	51
Figure IV-36: vitesse contour à 17 :00	52
Figure IV-38: transfert de la température dans la chambre par différent temps. 8 :00 h,13 :00h et17 :00h (mur Trombe en argile)	53
Figure IV-39: Différent température dans la chambre pour les trois mur	54

Liste de tableaux

Table III.1 : Différents termes de l'équation de transport	23
Table III.2 : les éclairements solaires et Les conditions de trouble correspondent	25
Table III-3 : les démonisons de chambre	30

Sommaire

Dédicace	i
Remerciement	iv
Nomenclature.....	v
Liste de figure.....	vii
Liste de tableaux.....	ix
Introduction générale :.....	1
I-1 Introduction :	2
I-2-Definition :	2
I-3-Les modes de transmission de chaleur :.....	2
I-3-1-Conduction :.....	2
I-3-2 Rayonnement :.....	3
1 3-3 Convection :	3
I-4- Notion sur la convection :	4
I-4-1 Définition :	4
I-4-2 les types de convection :.....	4
I-4-2-1-Convection forcée :.....	4
I-4-2-2-Convection mixte :.....	4
I-4-2-3 Convection naturelle :	4
I-5 La convection dans le capteur solaire :.....	5
I-5-1- Niveau de température atteinte par le capteur solaire 20°à 50°C : [3].....	5
I-5-1-1 La cloche de jardinier :.....	5
I-5-1-2 Capteurs à air :	5
Figure I-5: capteurs à air	5
I-5-1-3 Les capteurs à eau (sans vitrage) :.....	6
I-5-1-4 Tour solaire :	6
I-5-2 Niveau de température atteinte par le capteur solaire 50 a 100°C :	7
1-5-2-1 capteurs plans avec couverture :.....	7
1-5-2-2 Capteur stockeur :.....	8
Synthèse bibliographique :	9
II-1 Introduction :	11
II-1-1 Méthodes des différences finies :.....	11
II-1-2 Méthodes des éléments finis :	11
II-1-3 Méthodes des volumes finis :.....	12
II.3. Forme intégrale des équations de Navier-Stokes.....	14
II.3.1 Conservation de la masse.....	14
II.3.2 Conservation du mouvement :	15
II.3.3 Conservation de l'énergie :.....	16
II.4 Forme différentielle des équations de Navier-Stokes :.....	16

II-5 Présentation du logiciel COMSOL :	17
III-1 Introduction :	19
III-2 Description de problème :	19
III-3 Les Equation Gouvernantes :	20
III-3-1 Equation de continuité :	20
III-3-2 Equation de mouvements :	20
III-3-3 Equation de l'énergie :	20
III-4 Hypothèses simplificatrices :	21
III-4-1 approximation de Boussinesq :	21
III-5 Modèle mathématique :	22
III-5-1 équation de continuité :	22
III-5-2 Equation de conservation de l'énergie :	22
III-6 paramètres de flux :	23
III-6-1 PARAMETRES DE TEMPS :	24
III-6-1-1 Le temps solaire moyen :	24
III-6-1-2 L'angle horaire :	24
III-6-1-3 Angle horaire au coucher :	24
III-6-1-4Durée du jour :	24
III-6-2 Modèle LUI & JORDAN.....	25
III-6-2-1 Eclairage direct :	25
III-6-2-2 Eclairage diffus :	25
III-6-2-3 Eclairage Global :	25
a-Eclairage direct :	26
b-Eclairage diffus :	26
c-Eclairage global :	26
III-7- les nombres adimensionnelle :	26
III-7-1 - Le nombre de Reynolds :	26
III-7-2-Le nombre de Grashof :	27
III-7-3-Le nombre de Rayleigh :	28
III-7-4-Le nombre de Nusselt :	28
III-7-5 -Le nombre de Prandtl	28
III-7-6 Le nombre de Biot :	29
III-8 Condition aux limites :	29
III-9 Etape de simulation:.....	30
III-10 Conclusion :	32
IV-1 Introduction :	33
IV-2 le flux de chaleur à travers un jour :	33
IV-2 Résultat et discussion :	35
IV-2-1 La chambre avec mur Trombe en brick :	35
IV-2-2 La chambre avec mur Trombe en sel :	40

IV-2-3 La chambre avec mur Trombe en argile :.....	47
Conclusion générale	55
Référence.....	56

Introduction générale

Introduction générale :

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre, sous l'influence d'une différence de température. Comme les écarts de températures existent dans tout l'univers, les phénomènes d'écoulement de chaleur sont aussi universels que ceux associés aux attractions de gravitation. Cependant, contrairement à la pesanteur, l'écoulement de chaleur est régi non seulement par une relation unique, mais plutôt par une combinaison de différentes lois physiques indépendantes. Les transferts généralement connus sont la conduction, le rayonnement et la convection [1.2].

Pour résoudre les problèmes de transfert thermique, on doit recourir à des méthodes numériques dans le cas où on ne peut pas les résoudre analytiquement. Parmi ces méthodes les plus utilisées, on peut citer les différences finies, éléments finis, volumes finis...etc.

La convection naturelle au sein d'un fluide à l'intérieur des chambres, dépend des gradients de température imposés et de la géométrie de chambre avec mur Trombe, des propriétés du fluide et de l'interaction entre la gravité et le gradient de la masse volumique

Dans ce travail, nous examinerons la conception du mur Trombe.

Un mur de Trombe, est une conception passive du bâtiment solaire, un mur est construit sur le côté soleil d'hiver d'un bâtiment avec une couche externe en verre et une couche interne à haute capacité thermique séparée par une couche d'air. La surface noire de la paroi haute masse absorbe l'énergie solaire et se réchauffe. La chaleur acquise est stockée dans le mur et menée dans l'espace intérieur adjacent tout au long du jour et de la nuit. L'idée du mur de Trombe est similaire à la conception des fenêtres orientées vers le sud associées au sol en masse. Par rapport à ce dernier, le principal avantage du mur de Trombe est sa simplicité et sa capacité à fournir un meilleur niveau de confort à l'intérieur, car il sépare la surface de collecte d'énergie de l'espace de vie. Cependant, il peut souffrir de fortes pertes de chaleur pendant la nuit ou en jours nuageux, ou produire une chaleur excessive en été en raison de sa faible résistance thermique.

Une fois que l'énergie stockée dans la paroi de masse est épuisée, un flux de chaleur inverse commence de l'intérieur vers l'extérieur conduisant à une perte de chaleur de l'habitation

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur la convection naturelle dans les enceintes et leurs applications. Une synthèse bibliographique sur la convection naturelle dans une chambre avec mur Trombe.

Le deuxième chapitre présente la configuration géométrique du problème à étudier, ainsi que le modèle mathématique contenant les équations, et le paramètre de flux qui régissent le phénomène de la convection naturelle.

Le troisième chapitre s'intéresse à la description de la méthode des volumes finis, ainsi que la discrétisation des équations différentielles du modèle mathématique obtenu.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats numériques avec des interprétations et comparaisons avec les résultats contenus dans la littérature.

Chapitre I

Généralité sur le transfert de chaleur

I-1 Introduction :

L'énergie correspond à un transfert ou échange par interaction d'un système avec son environnement. Ce système subit alors une transformation. On distingue habituellement 2 types d'énergie : *i*) le travail noté W qui peut prendre diverses formes selon l'origine physique du transfert en jeu (électrique, magnétique, mécanique...), la chaleur notée Q .

La thermodynamique classique ne s'intéresse généralement qu'aux états d'équilibre et aux variations entre ces états, grâce à l'utilisation de fonctions d'état, qui sur un plan mathématique sont des différentielles totales exactes. On pourrait d'ailleurs plus logiquement appeler cette discipline la thermostatique.

Le formalisme généralement utilisé nécessite ainsi seulement la connaissance des états initiaux et finaux sans pour autant examiner le processus de transfert d'énergie, ni les modes d'interaction. L'étude complète et générale des mécanismes de transfert d'énergie nécessite d'aborder le formalisme de la thermodynamique hors équilibre (formalisme d'Onsager par exemple et théories de Prigogine).

I-2-Definition :

Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre 2 corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les 2 corps.

On distingue habituellement 3 modes de transfert de chaleur :

- La conduction thermique ou diffusion thermique
- Le rayonnement thermique
- La convection

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques et feront ainsi l'objet de chapitres différents, cependant strictement parlant, seuls la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide.

En outre il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode : le plus souvent 2 sinon 3 modes entrent en jeu. Il sera donc nécessaire de poser correctement les problèmes pour prendre en compte ces différents mécanismes.

N'oublions pas qu'un autre mode de transfert, qui ne fera pas l'objet ici d'étude, existe : il s'agit des changements d'état.

I-3-Les modes de transmission de chaleur :

La chaleur se transmet suivant différentes modes :

I-3-1-Conduction :

La conduction est le mode de transfert de chaleur existant dans un milieu donné sans qu'il y ait déplacement apparent de matière. C'est ce qui se passe en particulier dans un milieu solide homogène (métal, paroi...), mais qui a lieu aussi dans les fluides immobiles. La conduction ne peut exister que s'il existe des écarts de températures c'est à dire si le gradient de température

n'est pas nul. Dans le cas contraire le milieu est en équilibre thermique et aucun transfert de chaleur ne peut se produire. Pour que ce gradient de température existe, il faut une action externe au système pour pouvoir maintenir des conditions de températures données aux limites du système.

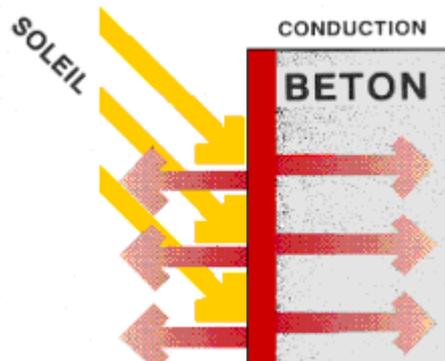


Figure I-1 :schéma de conduction.

I-3-2 Rayonnement :

A l'heure actuelle la nature du rayonnement et son mécanisme de transport ne sont pas entièrement établis. Deux théories : la théorie des quanta et la théorie ondulatoire s'opposent, se complètent et permettent d'expliquer les phénomènes observés. On sait que le rayonnement se propage dans l'espace libre à la vitesse de la lumière ; cette propagation se faisant naturellement. La nature du rayonnement et sa fréquence dépend de la source et l'on définit la longueur d'onde du rayonnement comme étant le rapport de la vitesse de propagation c (vitesse de la lumière) sur sa fréquence.

Tous les corps émettent du rayonnement, cependant nous ne pouvons "ressentir" que des rayonnements de longueur d'onde de 0,1 à 100. Dans ce domaine, que nous appellerons rayonnement thermique, le rayonnement est susceptible de chauffer un corps.

Enfin, à l'intérieur de ce domaine, l'œil est capable de percevoir un tout petit domaine appelé rayonnement visible compris entre 0,38 et 0,76. Ce rayonnement, appelé aussi lumière, est le seul susceptible d'exciter notre nerf optique.

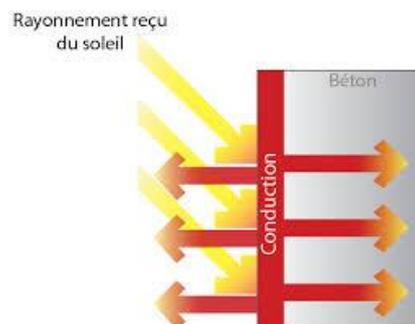


Figure I-2 :schéma de Rayonnement

1 3-3 Convection :

La convection désigne l'ensemble des mouvements internes (verticaux ou horizontaux) qui animent un fluide et qui impliquent le transport des propriétés des parcelles de ce fluide au cours

de son déplacement. Ce transfert implique l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact, ou le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre. La convection constitue, avec la conduction thermique et le transfert radiatif, l'un des trois modes d'échange de chaleur entre deux systèmes, et diffère de ces derniers par la méthode de transfert. Elle a aussi pour effet d'accélérer l'homogénéisation de la composition chimique du fluide, par rapport à la seule diffusion chimique.

I-4- Notion sur la convection :

I-4-1 Définition :

La convection est un mode de transfert d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. Elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transport d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite, les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte, simultanément, le fluide et l'énergie. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

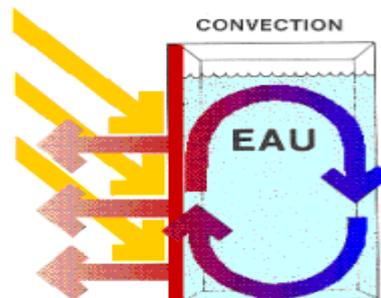


Figure I-3 : schéma de convection

I-4-2 les types de convection :

I-4-2-1-Convection forcée :

Le phénomène de convection forcée apparaît quand le mouvement du fluide est imposé par une cause mécanique extérieure (pompe, ventilateur,...) au système

I-4-2-2-Convection mixte :

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur

I-4-2-3 Convection naturelle :

La convection libre ou naturelle est la forme d'échange convectif la plus couramment observée : au contact d'un corps chaud, la température de l'air augmente, donc sa masse volumique

diminue, exerce une poussée d'Archimède vers le haut, la masse d'air chaud s'élève en enlevant de la chaleur au corps, elle est remplacée par une masse d'air froid qui, au contact au corps, s'échauffe et ainsi de suite. Le même phénomène peut s'observer pour des corps froids, le mouvement s'effusent alors

I-5 La convection dans le capteur solaire :

I-5-1- Niveau de température atteinte par le capteur solaire 20° à 50°C : [3]

I-5-1-1 La cloche de jardinier :

Le principe de fonctionnement se base sur le phénomène de l'effet de serre. Une surface transparente vitrée ou en plastique (pour permettre le passage des rayons incidents) piège l'énergie thermique remise sous forme des rayons infrarouges, ce qui augmente la température de l'enceinte.

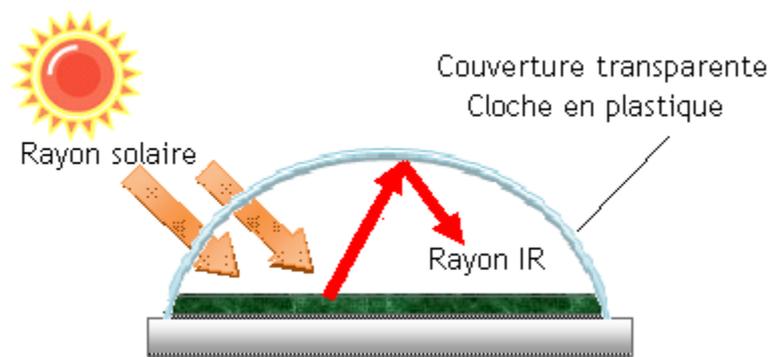


Figure I-4 : La cloche du jardinier

L'effet de serre permet d'obtenir des températures moyennes de plus de 20°C même par temps froid

I-5-1-2 Capteurs à air :

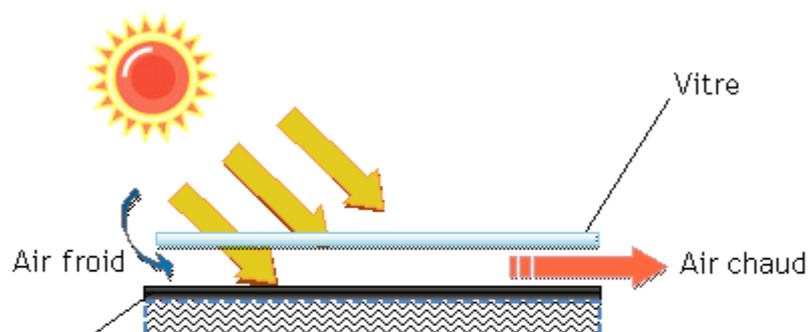


Figure I-5: capteurs à air

Sous un vitrage une plaque noire exposée aux rayons solaires s'échauffe d'autant plus qu'un isolant arrête les pertes arrière de chaleur. A cause de la différence de température entre

l'ambient et l'intérieur du capteur l'air circule entre le verre et la tôle noire (Absorbeur) et échauffe.

I-5-1-3 Les capteurs à eau (sans vitrage) :

Ces capteurs sont composés d'un simple absorbeur constitué d'un réseau de tubes accolés soit en plastique soit en caoutchouc de couleur noire. L'eau à chauffer circule dans les tubes. La température pouvant être atteinte (sans vent) environ 45°C. Le rendement est de l'ordre de 30%

Usage :

- Préchauffage des eaux sanitaire dans les centrales de chauffe
- Chauffage des piscines

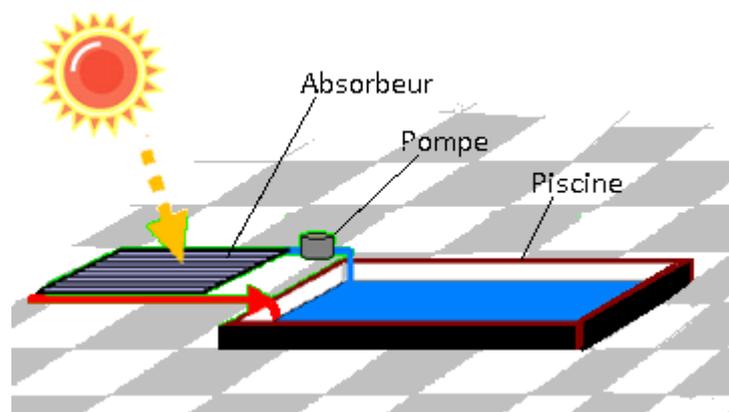


Figure I-6 : Les capteurs à eau (sans vitrage)

I-5-1-4 Tour solaire :

L'air qui se trouve entre le sol (Absorbeur) et le verre (Couverture) d'abord chauffé par les rayons solaires dans une serre circulaire géante, cela crée un flux d'air et une immense convection forcée dans la cheminée, c'est à dire l'air pénétrant dessous en circonférence et se réchauffe en progressant vers le centre afin d'entraîner des turbines placées juste à la base du cheminé.

Au centre de la serre la température peut atteindre 30°C supérieure à celle de l'extérieur. Le rendement de ce type d'installation est directement proportionnel à la hauteur de la cheminée, à la surface du collecteur de chaleur et à l'ensoleillement direct. Théoriquement l'électricité produite peut atteindre 200 MW.

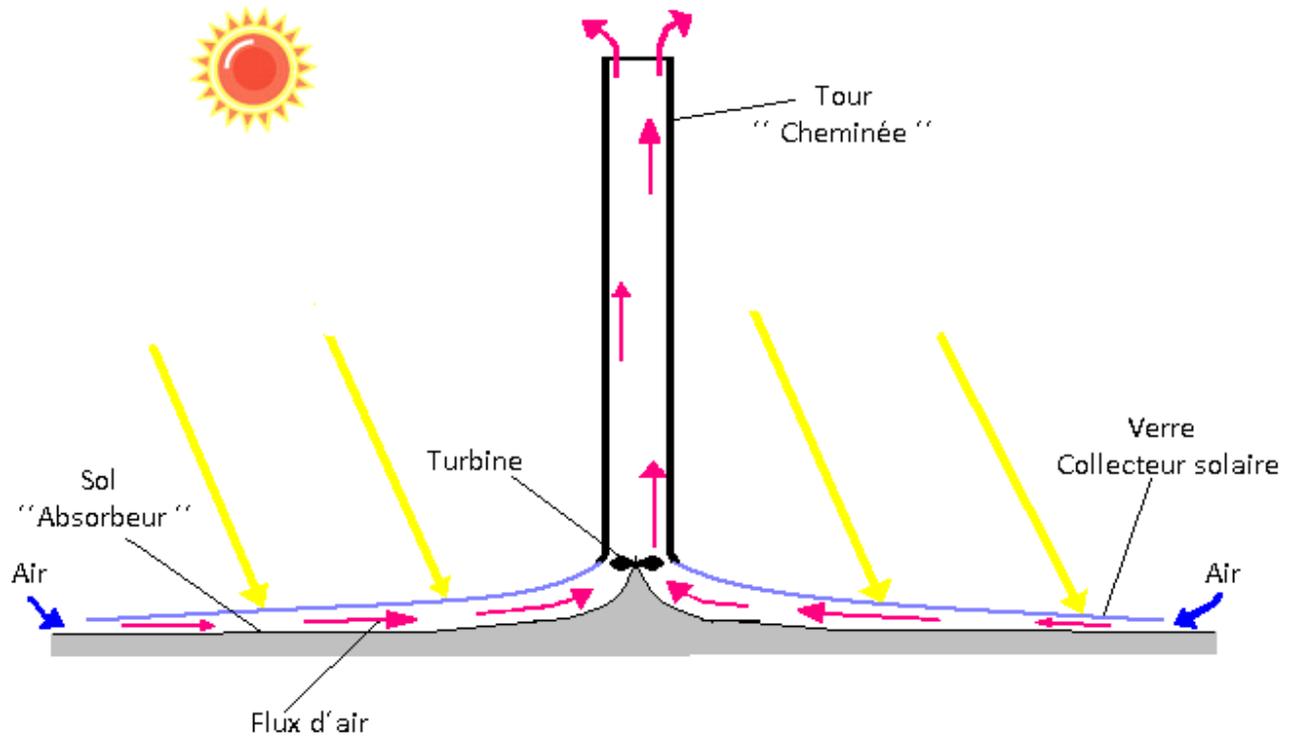


Figure I-7 : Tour solaire

I-5-2 Niveau de température atteint par le capteur solaire 50 à 100°C :

1-5-2-1 capteurs plans avec couverture :

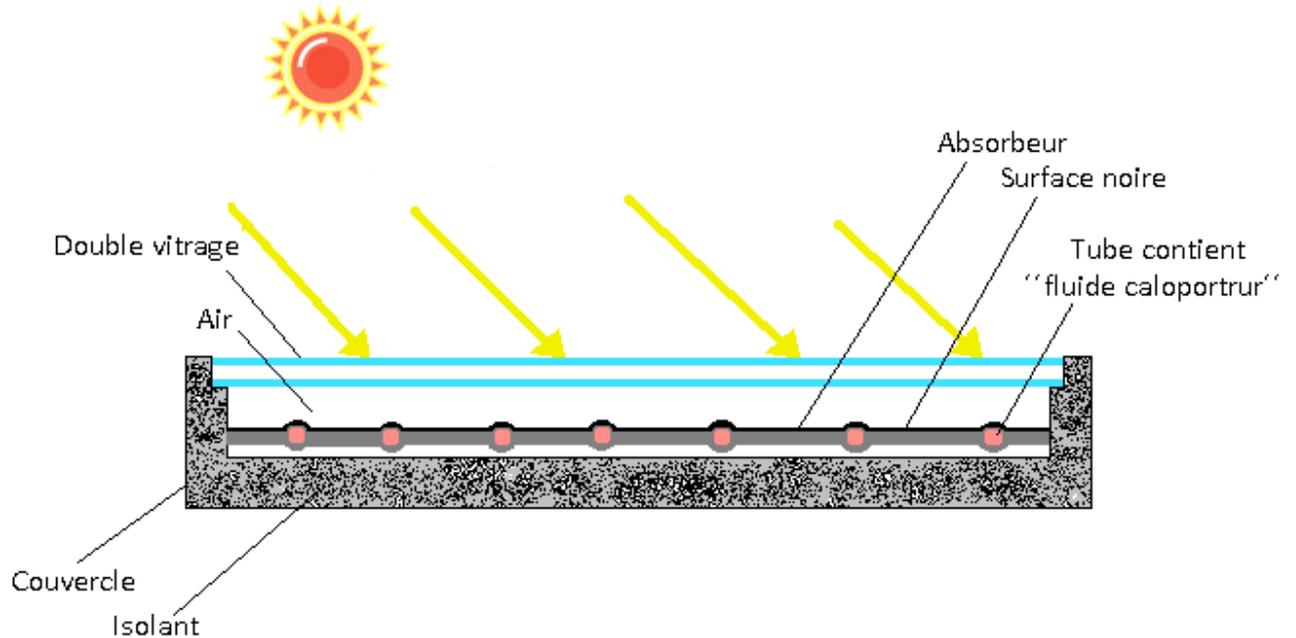


Figure I-8: capteurs plans avec couverture

Dans ce type de capteur on utilise l'effet de serre associé à une bonne isolation thermique de l'élément chauffant. Le capteur est constitué :

- D'un élément chauffant (Absorbeur) métallique comprenant des tubes à eau ou une lame d'eau comprise entre 2 plaques ; la partie supérieure est noire
- Au-dessus on dispose un ou deux vitres.
- Sur les côtés et en dessous un isolant (laine de verre, polyuréthane, etc.).
- Le tout est enfermé dans un boîtier rigide.

On peut augmenter la température en utilisant des revêtements sélectifs au niveau de l'absorbeur. Par exemple un capteur de rendement 50 % avec une bonne isolation on atteint une température de l'ordre de 65°C sans revêtement sélectif et 95°C avec revêtement sélectif.

1-5-2-2 Capteur stockeur :

Une enceinte joue le rôle entouré d'une couche d'isolation thermique enveloppe à l'intérieur on trouve les panneaux solaires (l'absorbeur) d'une disposition verticale ou horizontale émergé dans fluide pour stocker la chaleur.

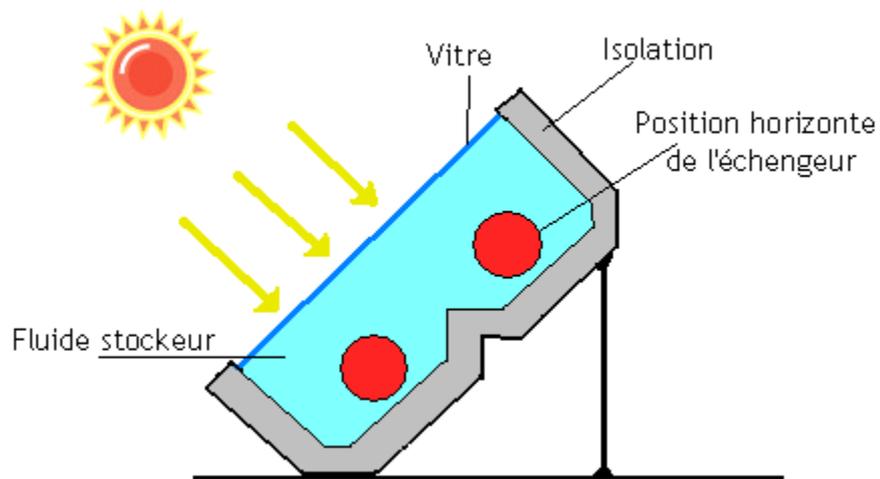


Figure I-9: Capteur stockeur

Synthèse bibliographique :

Nous exposons quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent des problèmes similaires.

Zhijie Yin [4] Dans ce projet, une conception de mur Trombe composite existante est d'abord étudiée avec un modèle développé dans l'environnement COMSOL Multiphysics®. Après avoir été validé avec des données publiées, ce modèle est appliqué avec les conditions météorologiques de Victoria pour les modes de refroidissement et de chauffage. Sa capacité de chauffage insuffisante pour l'hiver local conduit à une étude de modification. En appliquant la méthode de conception de l'expérience orthogonale, deux études de simulation paramétriques sont réalisées pour optimiser plusieurs propriétés géométriques et thermiques dynamiques de la structure. Par rapport à la conception originale, le modèle modifié atteint une meilleure stabilité de la température moyenne à l'intérieur et une stratification de la température spatiale inférieure.

Cammarata G., Petrone G.*, Cammarata L. [5] Cette étude vise à enquêter numériquement sur un système solaire passif pour le chauffage intérieur appelé «Mur de Trombe». Le flux entraîné par la flottabilité transitoire caractérisant ce système et la distribution thermique est résolu en intégrant numériquement les équations de régulation dans l'environnement multiphysique COMSOL. Les simulations sont effectuées pour une plage de temps correspondant à 12 jours. Les résultats sont résumés dans les champs de mouvement et les cartes thermiques, qui sont discutés de manière critique avec des aspects phénoménologiques concernant l'efficacité thermique du système de stockage et les conditions de confort dans l'environnement intérieur considéré.

Pascal Henry Biwole, Patrick Achard [6] La présente contribution traite du comportement thermique d'une paroi solaire passive composée d'un vitrage tourné vers l'extérieur, d'un canal rempli d'aérogel de silice hautement isolant et translucide et de briques de verre remplies d'un matériau de changement de phase eutectique (PCM), face à l'intérieur. Tout d'abord, le bâtiment expérimental avec le mur testé, orienté vers le sud, est décrit. Deuxièmement, les résultats expérimentaux sur quatre conditions météorologiques différentes sont détaillés. Grâce à un modèle numérique, le comportement du mur est simulé pour les zones climatiques françaises de Nice (climat méditerranéen), La Rochelle (climat océanique), Embrun (climat de montagne intérieur) et Nancy (climat continental froid). Les résultats montrent que le mur est translucide et peut économiser de 27% à 83% sur la facture d'énergie du bâtiment pour le chauffage, en fonction de l'emplacement du bâtiment. Le mur fonctionne mieux dans les climats froids et ensoleillés, où le changement de phase peut se produire toute l'année. La température de l'air à l'intérieur du bâtiment est toujours de 1 à 9 ° C au-dessus de la température extérieure. La surchauffe peut se produire en été pour les climats méditerranéens et océaniques lorsque le PCM reste à l'état liquide. Cela peut être empêché par l'utilisation de l'ombrage.

Guohui Gan [7] Dans ce travail, des murs de Trombe ont été étudiés pour le refroidissement estival des bâtiments. Les taux de ventilation résultant du refroidissement naturel ont été prévus en utilisant la technique CFD. Le modèle de turbulence k-ε du groupe de renormalisation (RNG) a été utilisé pour prédire le flux d'air et le débit d'air dynamiques dans les enceintes avec des géométries de paroi de Trombe. Le programme CFD a été validé contre les données expérimentales de la littérature et un très bon accord entre la prédiction et la mesure a été atteint. Le taux de ventilation prévu a augmenté avec la température de la paroi et le gain de chaleur. Les effets de la distance entre le mur et le vitrage, la hauteur de la paroi, le type de vitrage et

l'isolation des murs ont également été étudiés. Il a été montré que, pour maximiser le taux de ventilation, la surface intérieure d'une paroi de Trombe devrait être isolée pour le refroidissement de l'été. Cela empêcherait également une surchauffe indésirable de l'air ambiant en raison de la convection et du transfert de chaleur par rayonnement du mur.

Zohir YOUNSI , Laurent ZALEWSKI[8] ,présente les résultats d'une première étude expérimentale menée sur un prototype, à échelle réduite d'un mur solaire TROMBE-COMPOSITE. Un matériau à changement de phase, conditionné sous forme de briquettes, y a été inséré. Il se confirme que le matériau permet de stocker davantage de chaleur qu'un même volume de béton mais les mesures réalisées montrent un comportement thermique très différent en régime dynamique. Un regard particulier est porté sur les déphasages entre les différentes grandeurs et les sollicitations climatiques. Dans cette communication, nous présentons également les performances énergétiques de la paroi à partir de bilans fluxmétrique ou enthalpique.

Harry BOYER, Franck LUCAS[9] Les dispositifs Mur Trombe ont fait l'objet de nombreuses études en climat tempéré et ont prouvé leur efficacité en tant que système de chauffage passif. Vis à vis du détail de la modélisation associée, un couplage fin (car faisant intervenir plusieurs modes de transfert) entre la pièce et le dispositif est nécessaire. Avec CODYRUN développé à l'Université de La Réunion, des résultats de simulation sont présentés au départ d'un fichier météorologique et d'un habitat type de Madagascar. Ces murs capteurs stockeurs s'avèrent pouvoir améliorer notablement les conditions de confort En utilisant des sorties spécifiques (débits enthalpiques, apports par conduction, indices de confort, ...), une analyse de l'efficacité du dispositif est menée et démontre les avantages de ce mode de chauffage passif et peu onéreux

K. Hami*, B. Draoui et O. Hami [10] Dans le présent travail nous avons modélisé la convection naturelle en régime laminaire dans un local chauffé par la technique d'un mur Trombe ventilé adapté au site de la ville de Béchar (sud ouest de l'Algérie), d'une journée type d'hiver. Les équations régissant le mouvement d'air et le transfert de chaleur à l'intérieur du local sont résolues numériquement à l'aide de l'un des codes CFD 'Fluent'. L'influence de la variation de la profondeur de la cheminée solaire sur le rendement thermique du système a été étudiée. Le principe de fonctionnement du système est visualisé, les températures obtenues au niveau de la zone d'occupation sont adaptables à l'intervalle du confort thermique. Les résultats de simulation sont en bon accord avec ceux de la littérature.

Mohammed BENSAFI .Nour Edine KAID [11] Le but principal de cette étude est la modélisation du transfert de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment dans des conditions climatiques réelles (rayonnement et température extérieure). Le modèle solaire LUI & JORDAN est pris en compte. La variation de la température extérieure au cours de la journée a été évaluée par un modèle étalonné avec des résultats mesurés. Nous avons effectué une balance thermique pour déterminer la puissance de chauffage installée dans le boîtier et le taux de soufflage. Les résultats de simulation présentés sont ceux d'un bâtiment réel.

K. Imessad et M. Belhamel [12] Le mur capteur stockeur reste l'un des systèmes les plus ingénieux pour le chauffage passif des locaux. Les performances de ce mur dépendent de plusieurs paramètres, à savoir : sa nature, son épaisseur, présence ou non de thermocirculation. Dans ce travail, une simulation du comportement thermique d'un local muni d'un mur Trombe a été effectuée pendant des journées type d'hiver et d'été en faisant varier ces paramètres. Deux approches théoriques pour quantifier le flux de chaleur échangé par thermocirculation ont été proposées, les résultats obtenus ont permis de recommander celle qui se rapproche avec les résultats expérimentaux présentés par la littérature

Chapitre II

Méthodes numériques

II-1 Introduction :

Les équations décrites au deuxième chapitre sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. On peut distinguer les méthodes suivantes :

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

II-1-1 Méthodes des différences finies :

La méthode des différences finies est la plus ancienne des méthodes pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. On croit qu'il a été développé par Euler en 1768, qui a été utilisé pour obtenir des solutions numériques aux équations différentielles par calcul manuel. A chaque point nodal de la grille utilisée pour décrire le domaine de flux de fluide, les expansions de la série de Taylor sont utilisées pour générer des approximations de différence finie aux dérivées partielles des équations gouvernantes. Ces dérivées, remplacées par des approximations de différence finie, donnent une équation algébrique pour la solution d'écoulement à chaque point de grille. En principe, la différence finie peut être appliquée à tout type de système de grille. Cependant, la méthode est plus couramment appliquée aux grilles structurées car elle nécessite un maillage ayant un degré élevé de régularité. L'espacement de la grille entre les points nodaux n'a pas besoin d'être uniforme, mais il y a des limites sur la quantité d'étirement de grille ou de distorsion qui peut être imposée, pour maintenir la précision. Topologiquement, ces grilles structurées à différence finie doivent se conformer aux contraintes des systèmes de coordonnées générales tels que les grilles cartésiennes comprenant des domaines de calcul à six côtés. Cependant, l'utilisation d'une cartographie de coordonnées intermédiaire telle que le système de coordonnées adapté au corps permet de relâcher cette contrainte géométrique majeure, de manière à pouvoir modéliser des formes complexes. [13]

II-1-2 Méthodes des éléments finis :

Dans la méthode des éléments finis on utilise des fonctions linéaires ou quadratiques, sur chaque élément, pour décrire la variation locale de l'inconnue ϕ . Les équations différentielles sont exactement vérifiées par la solution exacte. En remplaçant l'approximation de ϕ dans les équations différentielles, on constate que celles-ci ne vérifient pas exactement, et un résidu est défini dans ce cas pour mesurer l'erreur. Le résidu est minimisé en le multipliant par une fonction de pondération et en l'intégrant. Le résultat de l'intégration est un set d'équations algébriques pour les coefficients des fonctions d'approximation.

Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception

et à l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissante de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la

robustesse de la méthode, il reste néanmoins des questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes conditions :

- évaluer la confiance qu'il accorde aux résultats produits .
- analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés.

L'objectif de cette partie est de présenter les principes de base de cette méthode en insistant sur l'enchaînement des tâches (démarche et hypothèses associées) qui assurent la cohérence du processus de calcul. Ces connaissances vous seront utiles pour maîtriser les deux principales difficultés de mise au point d'un modèle numérique :

- Problèmes préliminaires à la phase de calcul
- Problèmes liés à l'exploitation des résultats et le retour à la conception.

Il ne faut pas perdre de vue que l'analyse des résultats nécessite une bonne compréhension des différentes étapes mathématiques utilisées lors de l'approximation, pour pouvoir estimer l'erreur du modèle numérique par rapport à la solution exacte du problème mathématique.

Sans oublier que le modèle numérique ne peut fournir que de résultats relatifs aux informations contenues dans le modèle mathématique qui découle des hypothèses de modélisation.

Nous nous limiterons à la présentation de modèles élémentaires utilisés dans le cadre des théories linéaires. Bien que simples ces modèles permettent déjà de traiter un grand nombre d'applications liées aux problèmes de l'ingénieur. Du point de vue pédagogique, ils sont suffisamment complexes pour mettre en avant les difficultés de mise en œuvre de la méthode.

L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple. Sur chacun de ces éléments il sera plus simple de définir une approximation nous permettant d'appliquer les méthodes présentées dans la première partie de ce cours. Il ne reste alors qu'à assembler les formes matricielles élémentaires pour obtenir les équations relatives à la structure à étudier. C'est sous cette forme pragmatique qu'elle est utilisée par les ingénieurs, et que nous allons maintenant l'aborder. [14]

II-1-3 Méthodes des volumes finis :

La méthode des volumes finis discrétise la forme intégrale des équations de conservation directement dans l'espace physique. Il a été initialement introduit par des chercheurs comme McDonald (1971) et MacCormack et Paullay (1972) pour la solution des équations d'Euler en deux dimensions et dépendantes du temps. Rizzi et Inouye (1973) l'ont ensuite étendu à des écoulements trois dimensions. Le domaine de calcul est subdivisé en un nombre fini de volumes de contrôle contigus, où les énoncés résultants expriment la conservation exacte des propriétés pertinentes pour chacun des volumes de contrôle. Au centre de gravité de chacun des volumes de contrôle, les valeurs des variables sont calculées. L'interpolation est utilisée pour exprimer des valeurs variables à la surface du volume de contrôle en fonction des valeurs centrales et des formules de quadrature appropriées sont appliquées pour approximer les intégrales de surface et de volume. Une équation algébrique pour chacun des volumes de contrôle peut être obtenue, dans laquelle un certain nombre des valeurs nodales voisines apparaissent.

Comme la méthode à volume fini fonctionne avec les volumes de contrôle et non les points d'intersection de la grille, elle a la capacité de s'adapter à tout type de grille. Ici, au lieu de grilles structurées, on peut utiliser des grilles non structurées qui permettent un grand nombre d'options pour la définition de la forme et de l'emplacement des volumes de contrôle. Comme la grille ne définit que les limites du volume de contrôle, la méthode est conservatrice tant que les intégrales de surface qui sont appliquées à ces limites sont les mêmes que les volumes de contrôle partageant la frontière. Un inconvénient de cette méthode par rapport aux schémas de différences

finies est que les approximations de différenciation d'ordre supérieur supérieures au second ordre sont plus difficiles à développer en trois dimensions. Ceci est dû à l'exigence de deux niveaux d'approximation, qui sont l'interpolation et l'intégration. Cependant, la méthode à volume fini présente plus d'avantages que d'inconvénients. Une caractéristique importante du procédé est qu'une maille de type "élément fini" peut être utilisée, dans laquelle la maille peut être formée par la combinaison de triangles ou de quadrilatères dans le cas de deux dimensions ou de tétraèdres et d'hexaèdres en trois dimensions. Ce type de maillage non structuré offre une plus grande flexibilité pour manipuler des géométries complexes. Une autre caractéristique intéressante est que cette méthode ne nécessite pas de transformation des équations en termes de système de coordonnées équipés du corps comme cela est requis dans la méthode des différences finies.

Comme pour la méthode des différences finies, une grille numérique doit être initialement définie pour discrétiser le domaine d'écoulement physique d'intérêt. Pour la méthode des volumes finis, nous avons maintenant la flexibilité de représenter la grille par un maillage structuré ou non structuré. A titre d'illustration de la méthode des volumes finis, nous considérons une représentation typique d'éléments structurés (quadrilatéraux) et non structurés (triangulaires) de volume fini en deux dimensions représentées sur la Fig. 4.4 pour la discrétisation des équations aux dérivées partielles. La pierre angulaire de la méthode des volumes finis est l'intégration du volume de contrôle. Dans un volume de commande, les surfaces de délimitation de l'élément sont directement

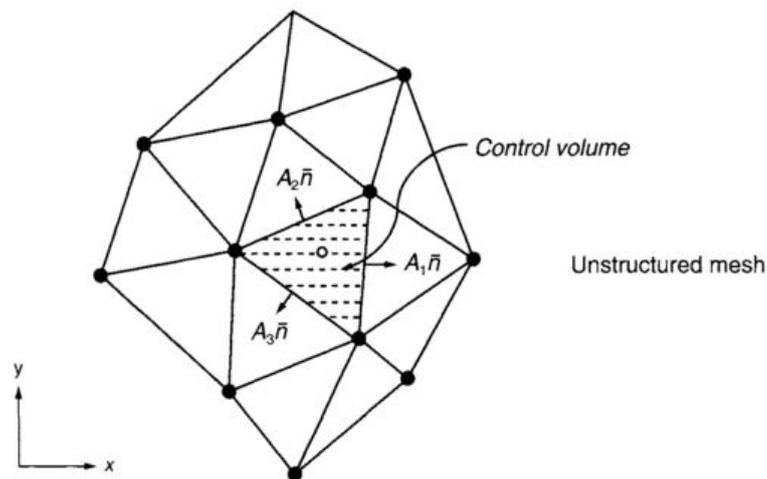


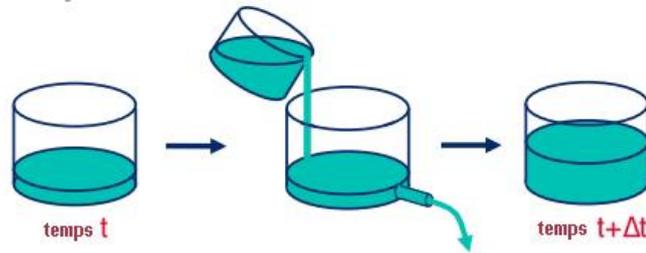
Figure II.1: Une représentation de maillage structuré et non structuré pour la méthode de volume fini

Liée à la discrétisation des dérivées de premier et second ordre pour ϕ (le générique variable de champ d'écoulement). Ici, les surfaces dans la direction normale (\vec{n}) aux surfaces volumiques comme indiqué sur la Fig. 4.4 sont résolues par rapport aux directions des coordonnées cartésiennes pour donner les zones projetées A_i^x et A_i^y . Dans la direction x et y respectivement. Les zones projetées sont positives si leurs vecteurs normaux sortants des surfaces de volume sont dirigés dans les mêmes directions du système de coordonnées cartésiennes. Sinon ils sont négatifs. [13]

II.3. Forme intégrale des équations de Navier-Stokes

II.3.1 Conservation de la masse

En général la masse peut être Ajoutée ou Enlevée, la loi de la conservation peut être établi tel que :

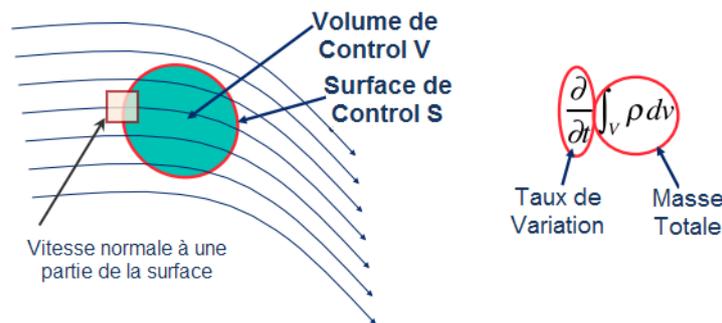


$$\text{Masse Finale} = \text{Masse Initiale} + \text{Masse Ajoutée} - \text{Masse Enlevée}.$$

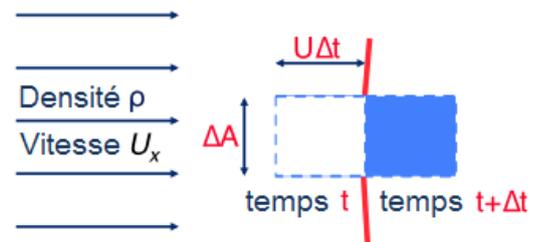
Si on applique cette loi a un control de volume arbitraire dans un champs d'écoulement on aura :

$$\text{Taux d'accroissement de la masse} = \text{Le flux net de la masse}$$

Le taux de variation de la masse totale dans le volume de control, est donnée par : $\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dv$



Pour trouver le flux de la masse à travers la surface de control, on va examiner une petite partie de la surface ou la vitesse est normale à la surface. On considère un petit rectangle de fluide en dehors des limites du domaine de telle façon que pendant un temps Δt , il s'écoule dans le volume de control. Le flux de la masse à travers le contrôle de surface ΔA pendant une période Δt est :



$\rho U_x \Delta t \Delta A$ ou $U_x = -un$ le signe de la composante normale de la vitesse détermine si le fluide s'écoule dans ou depuis le volume de control, nous considérons le fluide d'être positive, $un < 0$ écoulement vers l'intérieur $-\int \rho un ds$

Equation de la conservation de la mass dans sa forme d'intégral :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dv = - \int \rho un ds$$

Taux de variation de la masse

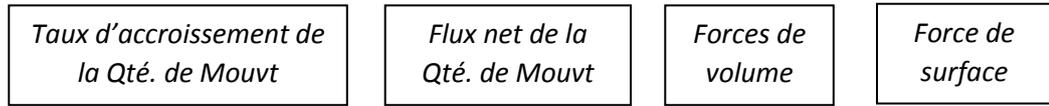
=

Le flux net de la masse

II.3.2 Conservation du mouvement :

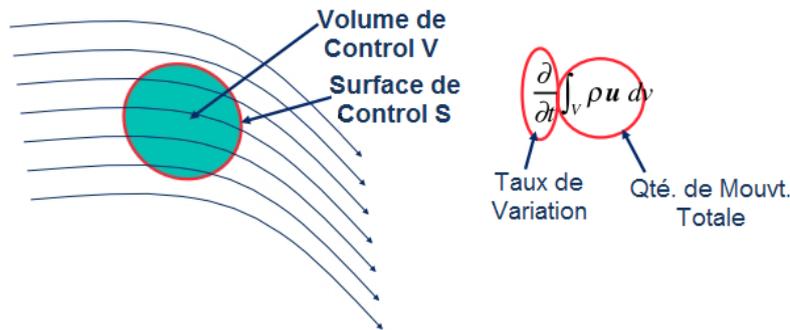
Quantité de mouvement par volume : $\rho \mathbf{u}$

Quantité de mouvement dans le contrôle de volume : $\int \rho \mathbf{u} dv$

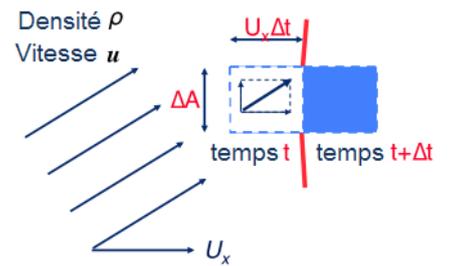


Le taux de variation de la quantité de mouvement totale dans le volume de control, est donnée par :

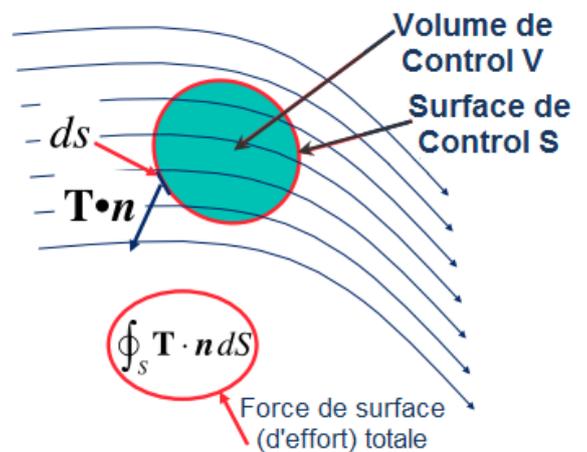
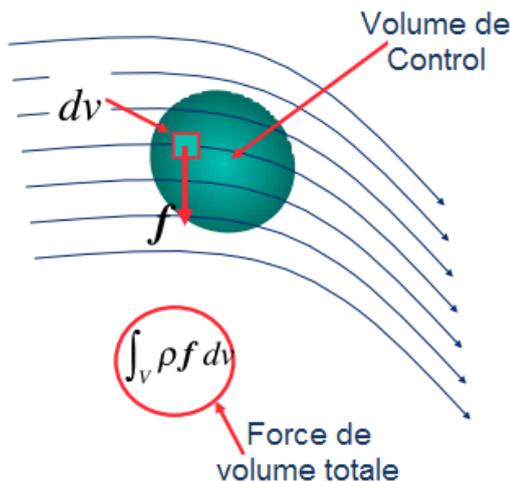
$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \mathbf{u} dv$$



On considère un petit rectangle de fluide en dehors des limites du domaine de telle façon que pendant un temps Δt il s'écoule dans le volume de control. La quantité de mouvement qui s'écoule à travers ΔA pendant un temps Δt : $U_x \Delta t \Delta A$ ou $U_x = -un$ le flux net par unité de temps : $-\int \rho \mathbf{u} un ds$.



Les forces de volume comme la gravité agissent sur le fluide dans le volume de control, la force de viscosité est donné par le produit de la normale et le tenseur d'effort \mathbf{T} .



Tenseur d'effort : $\mathbf{T} = (-p + \lambda \nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} + 2\mu \mathbf{D}$

Tenseur de déformation : $\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$

Ces composantes i,j $D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

Pour les écoulements incompressibles $\nabla \cdot u = 0$

Le Tenseur d'effort devient : $\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2\mu\mathbf{D}$

On additionne tous ces termes, on aura :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho u \, dv = - \int \rho u u \cdot n \, ds + \int T n \, ds + \int \rho f \, dv$$

On remplace \mathbf{T} par sa valeur : $\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2\mu\mathbf{D}$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho u \, dv = - \int \rho u u \cdot n \, ds - \int p n \, ds + \int 2\mu \mathbf{D} n \cdot ds + \int \rho f \, dv$$

Taux de variation de la Qté de Mvt	Flux net de l'énergie cinétique	Pression total	Force de viscosité total	Force de volume total
------------------------------------	---------------------------------	----------------	--------------------------	-----------------------

II.3.3 Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \left(e + \frac{1}{2} u^2 \right) dv = \int \rho \left(e + \frac{1}{2} u^2 \right) u \cdot n \, ds + \int u \cdot f \, dv + \int n \cdot (uT) \, ds - \int n \cdot q \, ds$$

Taux de variation de l'énergie cinétique interne	Flux net l'énergie cinétique interne	Travail des force de volume	Travail net des tenseurs d'effort	Ecoulement net de chaleur
--	--------------------------------------	-----------------------------	-----------------------------------	---------------------------

II.4 Forme différentielle des équations de Navier-Stokes :

Le Divergent ou le théorème de Gauss peut être utilisé pour convertir l'intégral de volume à un intégral de surface $\int \nabla \cdot a \, dv = \int a n \, ds$

On prend l'équation de conservation de la masse : $\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \, dv = - \int \rho u n \, ds$

Utilisant le théorème de Gauss : $- \int \rho u n \, ds = \int \nabla \cdot (\rho u) \, dv$

L'équation de conservation devienne :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \, dv = \int \nabla \cdot (\rho u) \, dv$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \, dv = \int \nabla \cdot (\rho u) \, dv = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} \int dv = \int \nabla \cdot (\rho u) \, dv$$

$\longrightarrow \int \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) \right) dv = 0$. Cette équation est valable pour n'importe quel control de volume quelque soit la taille ou la forme. Par conséquent la fonction à intégrer doit être égale à zéro :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$\nabla \cdot (\rho u) = \rho \cdot \nabla u + u \cdot \nabla \rho$ Ainsi l'équation de conservation de la masse devienne

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \nabla u + u \cdot \nabla \rho \longrightarrow \frac{D\rho}{Dt} + u \cdot \nabla \rho = 0$$

Sachant que : $\frac{D(_)}{Dt} = \frac{\partial(_)}{\partial t} + u \cdot \nabla(_)$... dérivée convective.

La forme différentielle de l'équation de mouvement est dérivée de la même manière :

$$\text{Commençant par : } \frac{\partial}{\partial t} \int \rho u \, dv = \int \rho f \, dv + \int (nT - \rho u(u \cdot n)) \, ds$$

$$\text{Réécrire comme : } \frac{\partial}{\partial t} \int \rho u \, dv = \int \rho f \, dv + \int \nabla \cdot (T - \rho u u) \, dv$$

$$\text{Pour avoir : } \frac{\partial \rho u}{\partial t} = \rho f + \nabla \cdot (T - \rho u u)$$

En utilisant l'équation de conservation de masse, la partie advection peut être réécrite :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} &= \rho f + \nabla \cdot \rho u u = u \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla u \cdot \rho u + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \nabla \cdot u \\ &= u \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u \right) + \rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{Du}{Dt} \end{aligned}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{=0 \text{ conservation de la mass}}$

L'équation de mouvement peut être écrite sous la forme particulière :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho f + \nabla \cdot (T) \quad \text{Sachant que } \rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{Du}{Dt} + u \nabla \cdot u \right)$$

Et de la même façon l'équation de l'énergie mécanique $\rho \frac{De}{Dt} + p \nabla \cdot u = \phi + \nabla \cdot k \nabla T$

Où ϕ est la fonction de dissipation, et elle représente le taux de conversion du travail en chaleur.

II-5 Présentation du logiciel COMSOL :

Le logiciel de simulation de choix est COMSOL Multiphysics 4.4. En effet, cet outil de simulation numérique, basé sur la méthode des éléments finis permet de traiter plusieurs de problèmes grâce à sa banque intégrée d'équations physiques. Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique, 2D, 2D-axisymétrique ou 3D). Par ailleurs, COMSOL Multiphysics, anciennement appelé FEMLab, possède un environnement de programmation dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Par défaut le maillage est automatique et se compose de triangle en 2D et de tétraèdre en 3D. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « solvers », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendant du temps.



FigureII.2: Logo du COMSOL

A l'aide de ce logiciel, différents types d'analyse peuvent être effectuées, y compris :

- Analyse modale.
- Analyse stationnaire et temporelle.
- Analyse linéaire et non linéaire.

Développé initialement comme une toolbox de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. De plus, les données du logiciel sont accessible depuis MATLAB pour définir les propriétés des matériaux, les charges, les sources et les conditions aux limites ce qui permet la réalisation de scripts.

Chapitre III

**Formulation mathématique et
géométrie**

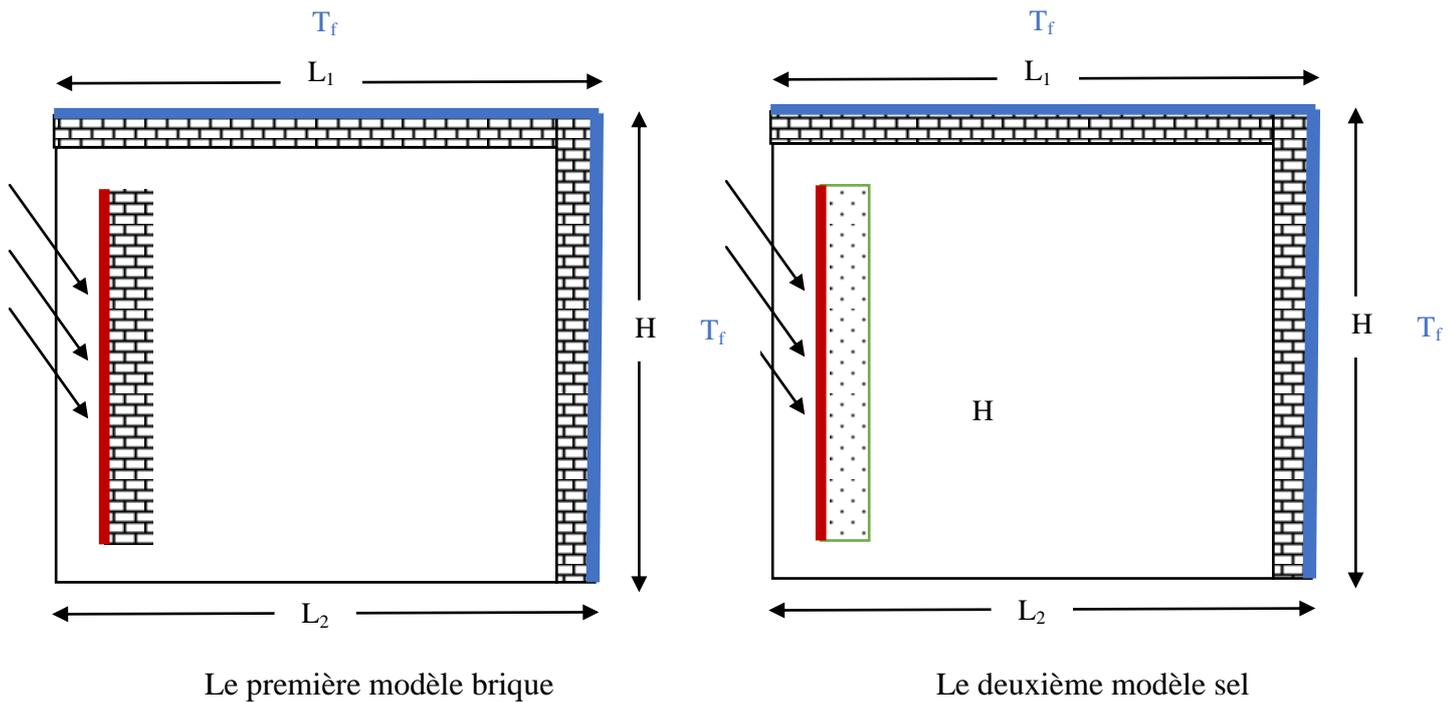
III-1 Introduction :

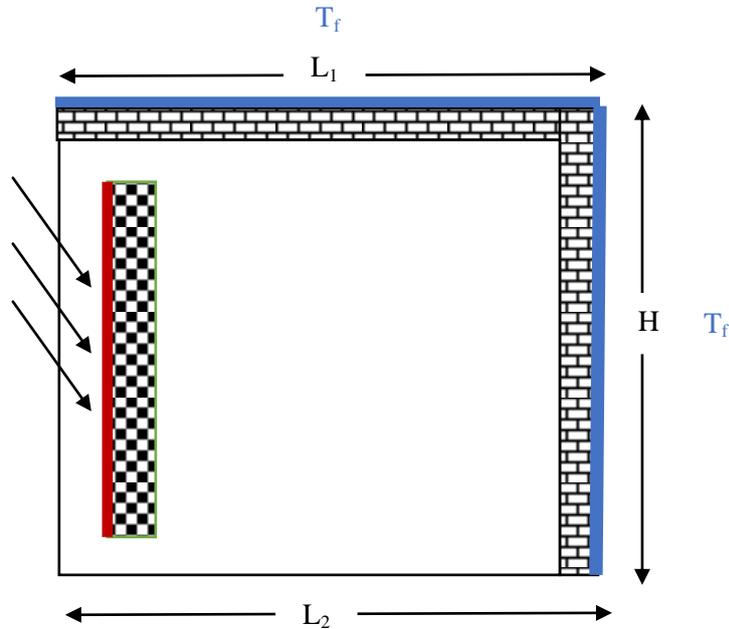
Dans les écoulements de convection naturelle, nous distinguons les nombres de Rayleigh, Grashof, Prandtl et autres nombres, représentés par plusieurs propriétés physiques dépendantes de la température. L'importance mutuelle de ces propriétés dépend des conditions thermiques et des facteurs géométriques.

III-2 Description de problème :

Dans ce travail, nous prévoyons une simulation numérique de la convection naturelle en régime laminaire d'un écoulement d'air chauffé par un mur Trombe ventilé en utilisant l'un des codes COMSOL (Version: 5.2.1) et pour sa on a élaboré 3 model de géométrie du problème physique considéré est schématisé sur la figure (III-1) dans :

- Le premier model le mur trombe est chaud en brique et $L_1=H=T_f$ et L_2 adiabatique
T dans $L_1=H=0$
- Le deuxième model le mur trombe en sel est chaud et $L_1=H=T_f$ et L_2 adiabatique
- Le troisième model le mur trombe est chaud en argile et $L_1=H=T_f$ et L_2 adiabatique





Le troisième model argile

Figure III.1 : Les model de géométrie

III-3 Les Equation Gouvernantes :

L'analyse de la convection thermique est basée sur l'application des trois équations classiques de conservation.

III-3-1 Equation de continuité :

C'est l'équation, qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot v) = 0 \quad (\text{III-1})$$

Où v : Le vecteur vitesse.

III-3-2 Equation de mouvements :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent. Donc, on peut indiquer que le taux de variation de la quantité de mouvement, contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures, qui lui sont appliquées. L'équation s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D}{Dt} (\rho \cdot v) = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(v)) \quad (\text{III-2})$$

Où F est une force par unité de volume.

III-3-3 Equation de l'énergie :

L'équation de l'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T) = \Delta(\lambda T) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi \quad (\text{III-3})$$

Avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T)$: La variation totale d'énergie.

$\Delta(\lambda T)$: La variation d'énergie par conduction.

q : Puissance volumique dissipée.

$\beta T \frac{Dp}{DT}$: La variation d'énergie, due à la compressibilité

$\mu \Phi$: La dissipation irréversible, due au frottement visqueux.

III-4 Hypothèses simplificatrices :

Afin de simplifier la formulation du modèle mathématique, nous allons considérer les approximations suivantes, qui sont souvent utilisées dans l'étude de la convection naturelle :

- Le fluide est newtonien et incompressible.
- L'écoulement est instationnaire et bidimensionnel.
- L'écoulement est laminaire.
- Le transfert de chaleur par rayonnement négligeable.
- Le travail induit par les forces visqueuses et de pression est négligeable.

III-4-1 approximation de Boussinesq :

La grande majorité des solutions analytiques approchées et des simulations numériques présentées jusqu'à ce jour ont été basées sur les hypothèses de Boussinesq dont les fondements ont été rappelés ci-dessus. On évoque, en général « l'approximation de Boussinesq » qui peut se résumer sous la forme suivante :

Dans un fluide pur, la masse volumique peut être supposée constante sauf dans le terme de poussée d'Archimède lorsque les écarts de température ne conduisent pas à de fortes variations de la pression motrice. Dans ces conditions, $\rho \vec{g} = \rho(T) \vec{g}$ et $\rho = \rho(T_0)$ dans tous les autres termes, T_0 étant une température de référence pour la masse volumique.

Pour un fluide pur de comportement rhéologique newtonien, l'approximation de Boussinesq permet ainsi de ramener le système d'équations de conservation à la Forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} = 0 \\ \rho_0 \frac{D\bar{\mathbf{V}}}{Dt} = -\nabla p_m + \nabla \cdot \left(u \left[\nabla \bar{\mathbf{V}} + (\nabla \bar{\mathbf{V}})^T \right] \right) + \rho_0 [\beta_0 (T - T_0)] \bar{\mathbf{g}} \\ \rho_0 C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla (k \nabla T) + \bar{\omega} \\ + \text{conditions aux limites} \end{array} \right.$$

Ou u , C_p et k peuvent dépendre de la température.

III-5 Modèle mathématique :

En se plaçant dans le cadre de ces hypothèses, les équations précédentes deviennent.

III-5-1 équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III-4})$$

-Equation de conservation de quantité de mouvement :

Sur l'axe Ox :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu \partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu \partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{III-5})$$

Sur l'axe Oy :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu \partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu \partial v}{\partial y} \right) \\ &+ g \rho_0 \beta (T - T_0) \end{aligned} \quad (\text{III-6})$$

III-5-2 Equation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{III-7})$$

On peut écrire une équation générale qui exprime les équations (4), (5), (6),(7), (8) sous la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S \phi \quad (\text{III-8})$$

L'équation de	Variable ϕ	Coefficient de diffusion Γ	Terme source S^ϕ
Continuité	1	0	0
Mouvement suivant x	U	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}$
Mouvement suivant y	V	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y} + g\rho_0\beta(T - T_0)$
Energie	T	$\frac{\lambda}{C_p}$	0

Table III.1 : Différents termes de l'équation de transport

III-6 paramètres de flux :

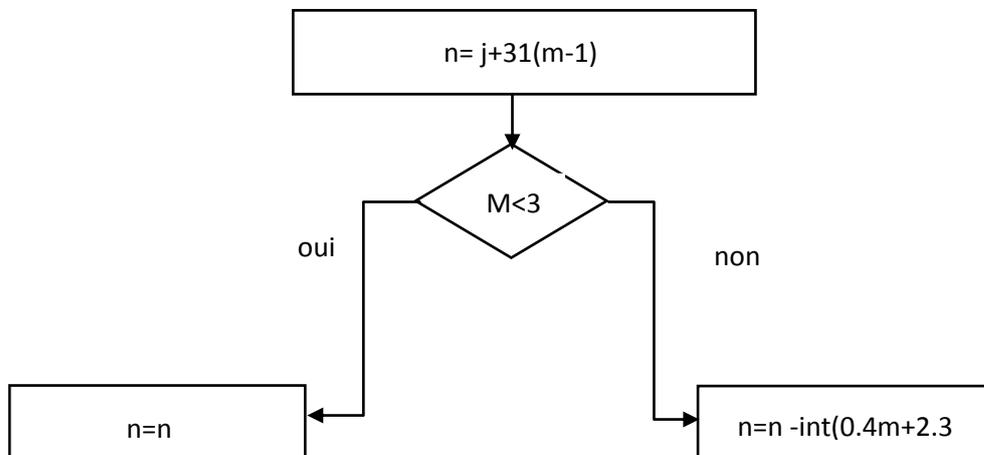
Dans ce paramètre de flux il faut utiliser le rayonnement solaire direct diffus et globale sur un plan et utilise plusieurs modèles de calcul comme le modèle ASHRAF et LUI JOURDAN

Les équations mathématiques qui identifient ces deux modèles choisis sont données par la déclinaison solaire :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 81)\right)$$

Pour ce travaille on utilise le modèle de LUI & JOURDAN

L'organigramme donné ci-dessous permet de calculer le numéro (n) du jour à partir de la date écrite :



La hauteur solaire est donnée par la formule :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)$$

III-6-1 PARAMETRES DE TEMPS :

III-6-1-1 Le temps solaire moyen :

Le jour solaire moyen est la moyenne d'un très grand nombre de jours solaires vrais. Le temps moyen a été imaginé pour remédier à l'inégalité des jours solaires vrais. Il est réglé sur l'hypothèse de deux soleils fictifs; le premier, parcourant l'écliptique d'un mouvement uniforme, ce qui corrige l'inégalité de la vitesse du soleil vrai, et passant en même temps que ce dernier au périhélie et à l'apogée; le second, le soleil moyen, parcourant l'équateur avec la même vitesse que le premier parcourant l'écliptique, ce qui corrige l'obliquité de celle-ci, et passant en même temps que lui à l'équinoxe. Le mouvement du soleil moyen et, du fait que le soleil moyen parcourt l'équateur avec une vitesse constante, l'intervalle entre deux passages consécutifs de ce soleil au méridien d'un même lieu est appelé jour solaire moyen (également appelé jour moyen) est aussi constant. On introduit la notion de Temps Solaire Moyen (T.S.M), qui varie par rapport au T.S.V, où le terme correctif (ET) désigne l'équation du temps :

$$TSM = TSV - ET$$

-L'équation du temps (le terme correctif) :

$$ET = -0.0002 + 0.4197 \cdot \cos(\beta) - 7.3509 \cdot \sin(\beta) - 3.2265 \cdot \cos(2 \cdot \beta) - 9.3912 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \\ - 0.0903 \cdot \cos(3 \cdot \beta) - 0.3361 \sin(3 \cdot \beta)$$

III-6-1-2 L'angle horaire :

C'est l'angle à travers lequel la terre tourne en rotation diurne autour de son axe qui correspond à une augmentation de l'angle horaire de 15° à chaque heure qui s'écoule pour amener le méridien d'un plan directement sous le soleil [91,99] . En d'autres termes, l'angle horaire décrit la course du soleil dans le ciel puisqu'il mesure le déplacement angulaire du soleil de l'est à l'ouest en passant par le sud du méridien local, donc c'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. L'angle horaire est nul à midi, négatif dans la matinée et positif l'après-midi pour l'hémisphère nord et vice versa pour l'hémisphère sud

$$\omega = (TSV - 12) \cdot 15$$

III-6-1-3 Angle horaire au coucher :

$$\omega_0 = \sin^{-1}[\cos(\delta - \varphi)]$$

III-6-1-4Durée du jour :

C'est le temps qui sépare le lever du coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donnent une hauteur h du soleil nul sont le lever et le coucher du soleil. Au moment du lever et du coucher du soleil

$$d = 2 \frac{\omega_0}{15}$$

III-6-2 Modèle LUI & JORDAN

III-6-2-1 Eclairage direct :

C'est le rayonnement qui se propage le long de la ligne reliant la surface de réception et le soleil.

$$S_{(i,y)}^* = [\sin(i) \cdot \cos(h) \cdot \cos(a - \gamma) + \cos(i) - \sin(h)]$$

III-6-2-2 Eclairage diffus :

C'est le rayonnement solaire diffusé par les aérosols, les poussières et les molécules, il n'a pas une direction unique. Normalement, le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus sont raccordés par rapport à une surface horizontale. Dans ce cas, on utilise les expressions qui suivent et qui concernent la projection des rayonnements solaires direct et diffus sur cette même surface.

$$D_i^* = \left[\frac{1 + \cos(i)}{2} \right] \cdot D_h^* \left[\frac{1 - \cos(i)}{2} \right] + a^* \cdot G_h^*$$

III-6-2-3 Eclairage Global :

Le tableau ci-dessous donne les éclairages solaires I^* et G^* . Les conditions de trouble correspondent à la teneur de l'atmosphère en poussières et autres polluants.

Conditions de Trouble	$I^* [w/m^2]$	$G^* [w/m^2]$
Ciel trouble	$1260 \exp \left[-\frac{1}{2.3 \sin(h+3)} \right]$	$955 (\sin(h))^{1.25}$
Ciel Moyennement Troublé	$1230 \exp \left[-\frac{1}{3.8 \sin(h+1.6)} \right]$	$1080 (\sin(h))^{1.22}$
Ciel très pur	$1210 \exp \left[-\frac{1}{6 \sin(h+1)} \right]$	$1130 (\sin(h))^{1.15}$

Table III.2 : les éclairages solaires et Les conditions de trouble

$$G^* = S^* + G_i^*$$

$$D_h^* = G_h^* - I^* - \sin(h)$$

Pour ce cas on utilise le modèle de « ciel très pur »

Tab.1 Expressions empiriques des éclairagements solaires I^* et G^* . la valeur de la hauteur h du soleil doit

être exprimée en degré

Les rapports de clairément :

a-Eclairément direct :

$$R_s = \frac{S_{(i,y)}^*}{S_h} = \frac{\sin(i) \cdot \cos(a - \gamma)}{\tan(h)} + \cos(i)$$

b-Eclairément diffus :

c-Eclairément global :

$$R_G = \left(R_s \frac{1 + \cos(i)}{2} \right) \frac{S_h^*}{G_h^*} + \left(\frac{1 + \cos(i)}{2} \right) + \left(\frac{1 - \cos(i)}{2} \right) a^*$$

III-7-

les

nombre

$$R_D = \left[\frac{1 + \cos(i)}{2} \right] + \left[\frac{1 - \cos(i)}{2} \right] a^* \frac{G_h^*}{D_h^*}$$

s adimensionnelle :

Une grandeur sans dimension (ou grandeur adimensionnelle) est une quantité permettant de décrire une caractéristique physique sans dimension ni unité explicite d'expression. Elle est constituée du produit ou rapport de grandeurs à dimensions, de telle façon que le rapport des unités équivaut à un. L'analyse dimensionnelle permet de définir ces grandeurs sans dimension. L'unité SI dérivée associée est le nombre 1. On trouve parmi ces grandeurs l'indice de réfraction ou la densité par exemple.

III-7-1 - Le nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds nous dit si on a un écoulement laminaire ou turbulent. Il est défini comme :

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot x}{\mu} = \frac{U \cdot x}{\nu}$$

Avec :

ρ : la densité [kg/m³],

U : la vitesse [m/s],

x : la dimension caractéristique du système étudié

μ et ν : la viscosité respectivement dynamique [Pa · s] et cinématique [m²/s].

Vu sa définition, le nombre de Reynolds est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

Pour les écoulements internes la dimension caractéristique du système à utiliser dans le calcul du nombre de Reynolds est le diamètre hydraulique [m] qui est donné par :

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{P}$$

S: est la surface du tuyau [m²]

P: est son périmètre [m].

Pour l'écoulement externe, par contre, la dimension caractéristique est la longueur du système dans la direction de l'écoulement.

Si le nombre de Reynolds du système est plus petit que sa valeur critique récrit, l'écoulement est laminaire, si par contre sa valeur dépasse Re_{crit} on retrouve un écoulement turbulent.

Écoulement interne $Re_{crit} = 2300$

Écoulement externe $Re_{crit} = 300000$

III-7-2-Le nombre de Grashof :

Le nombre de Grashof est le rapport entre l'effet de flottaison par force motrice d'Archimède et l'effet résistif de l'écoulement.

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (L)^3 \cdot (T_p - T_{ext})}{\nu^2}$$

g : est l'accélération de la pesanteur [m/s²],

β : le coefficient de dilatabilité ou d'expansion thermique [1/K],

T_p : la température au parois

T_{ext} : la température externe.

Le nombre de Grashof joue un rôle identique à Re en convection forcée.

Le rapport $\frac{G_r}{Re^2}$ détermine quel type de convection on a :

$$\frac{G_r}{Re^2} \ll 1 \Rightarrow \text{convection forcée}$$

$$\frac{G_r}{Re^2} \gg 1 \Rightarrow \text{convection naturelle}$$

$$\frac{G_r}{Re^2} \approx 1 = \text{convection mixte}$$

III-7-3-Le nombre de Rayleigh :

Le nombre de Rayleigh regroupe les nombres de Prandtl et Grashof et est donné par :

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (L)^3 \cdot (T_p - T_{ext})}{\nu \cdot \alpha}$$

Sa valeur nous indique si on est en laminaire ou turbulent pour un systèmes convection naturelle

III-7-4-Le nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt est défini comme :

$$Nu = \frac{h \cdot \langle L_f \rangle}{K_f}$$

(L_f) est la longueur selon laquelle se fait l'écoulement et

K_f est la conductivité du fluide [$W / (m \cdot K)$].

Le nombre de Nusselt est, contrairement au nombre de Biot, un rapport de deux longueurs. Même si on retrouve la même écriture que pour le nombre de Biot, la signification physique est tout à fait différente

III-7-5 -Le nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl est défini comme

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Où α est la diffusivité thermique [m^2/s]. Le nombre de Prandtl est donc le rapport entre l'épaisseur de la couche limite et l'épaisseur de la couche limite thermique. Vu la définition de la diffusivité thermique α , le nombre de Prandtl peut aussi être écrit comme

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$$

avec

C_p : la chaleur spécifique à pression constante [$J / (kg \cdot K)$].

III-7-6 Le nombre de Biot :

Le nombre de Biot est défini comme :

$$Bi = \frac{h \cdot L_s}{k_s}$$

Où L_s est la longueur selon laquelle la conduction se passe, h est le coefficient de transfert de chaleur par convection [$W / (m^2 \cdot K)$] et k_s est la conductivité du solide [$W / (m \cdot K)$]. Le nombre de Biot est donc le rapport entre la résistance thermique de conduction et la résistance thermique de convection. Si le nombre de Biot est plus petit que 0.1 la variation de température dans le solide est inférieure à 5% et donc négligeable. L'approche de comportement en bloc est alors justifiée.

III-8 Condition aux limites :

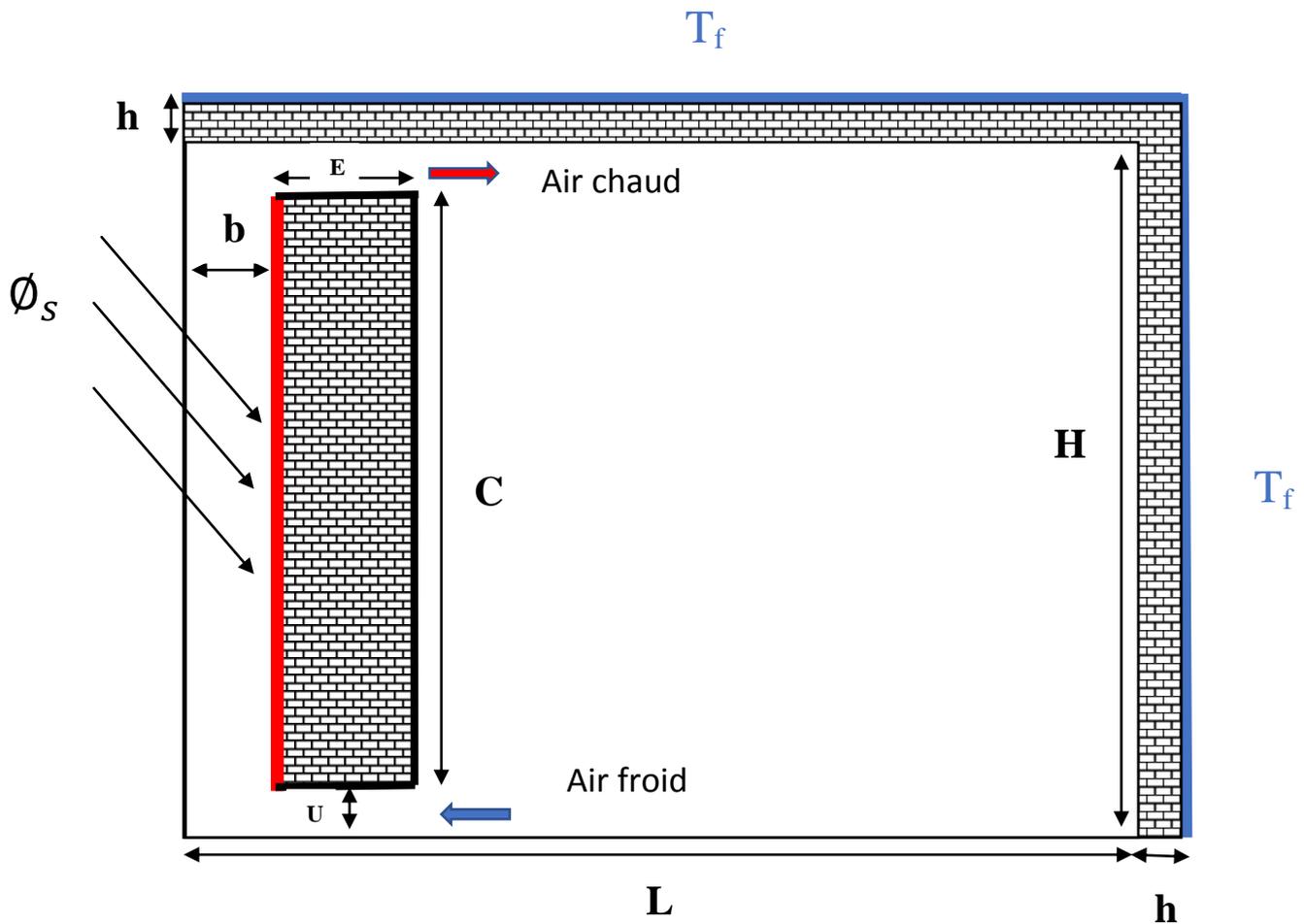


Figure III.2: condition aux limites

Cas étudiés	L(m)	H(m)	h(m)	U(m)	C(m)	E(m)
Les dimensions	4	3	0.2	0.15	2.7	0.2

Table III-3 : les dimensions de la chambre

Initialement, on ne considère que la température de l'air à l'intérieur du local et constante :

- $T(x, y, 0) = 5 \text{ °C}$

- L'air est en repos (sans mouvement) : $U = 0$

- Au niveau de la surface gauche du mur Trombe $C = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{d}_z \mathbf{q}_0$

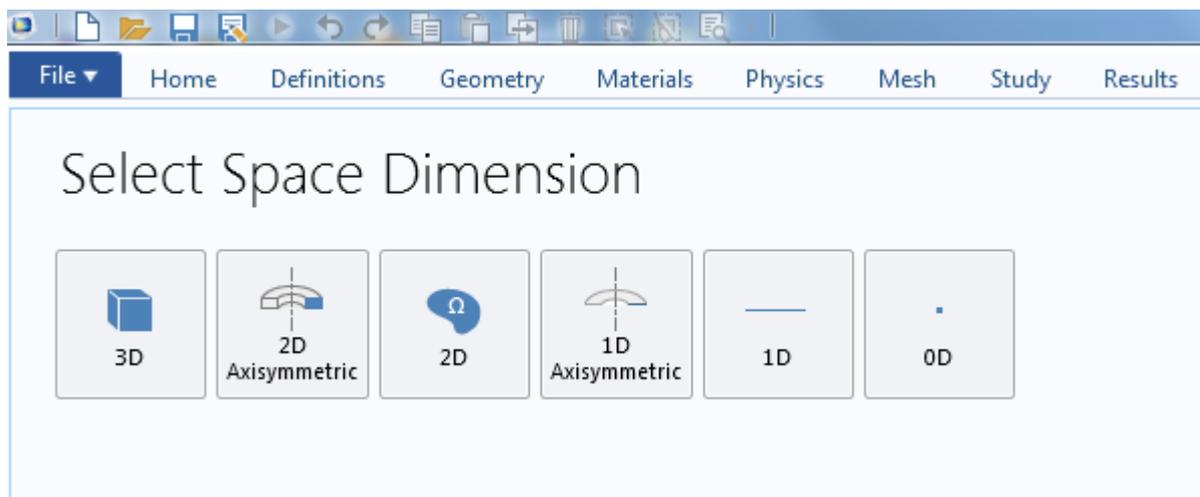
- Verticale droite (mur latéral à droite du local) $(H+h) = T = T_f$

- Horizontale haut $(L+h) = T = T_f$

- Horizontale haute et face droit et horizontale basse est adiabatique $L = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

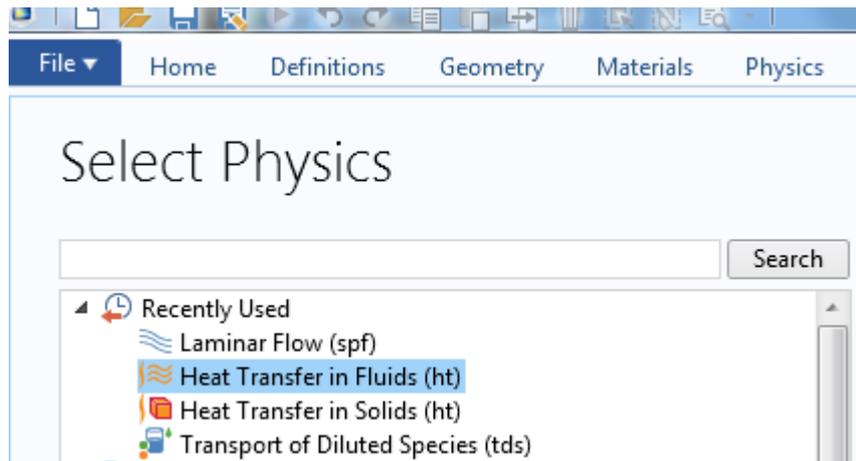
III-9 Etape de simulation:

Les différentes étapes permettant de simuler les propriétés d'un matériau sont détaillées ci-dessous :

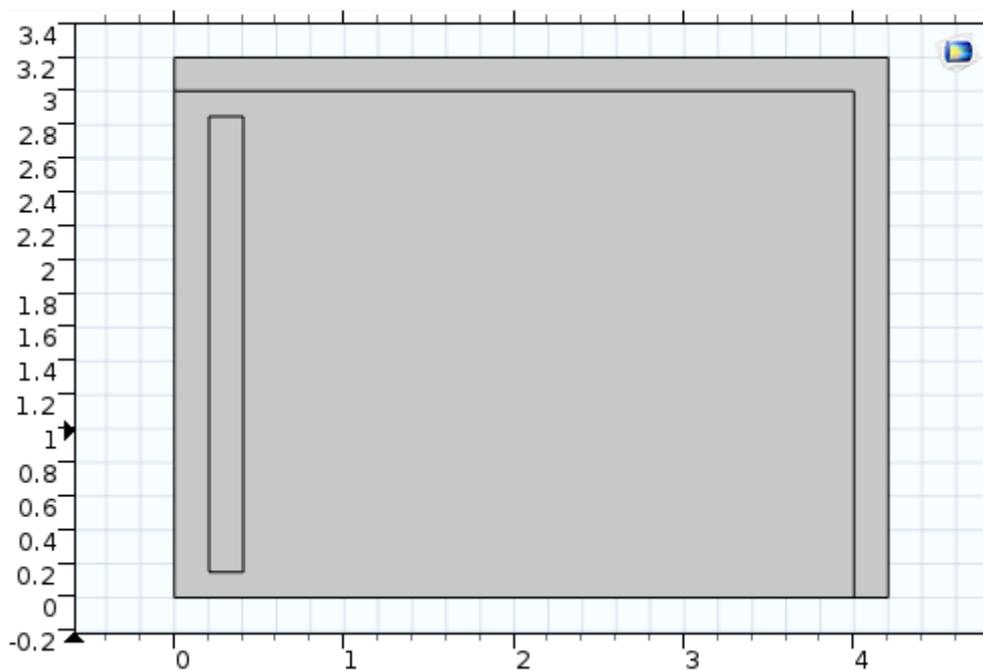


*Sélectionner la dimension d'espace

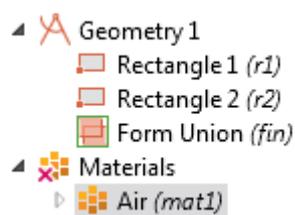
* sélectionne la physique, dans notre cas c'est le transfert de chaleur et l'écoulement laminaire



- **Création de géomètre :**



- **Définition de matériel**



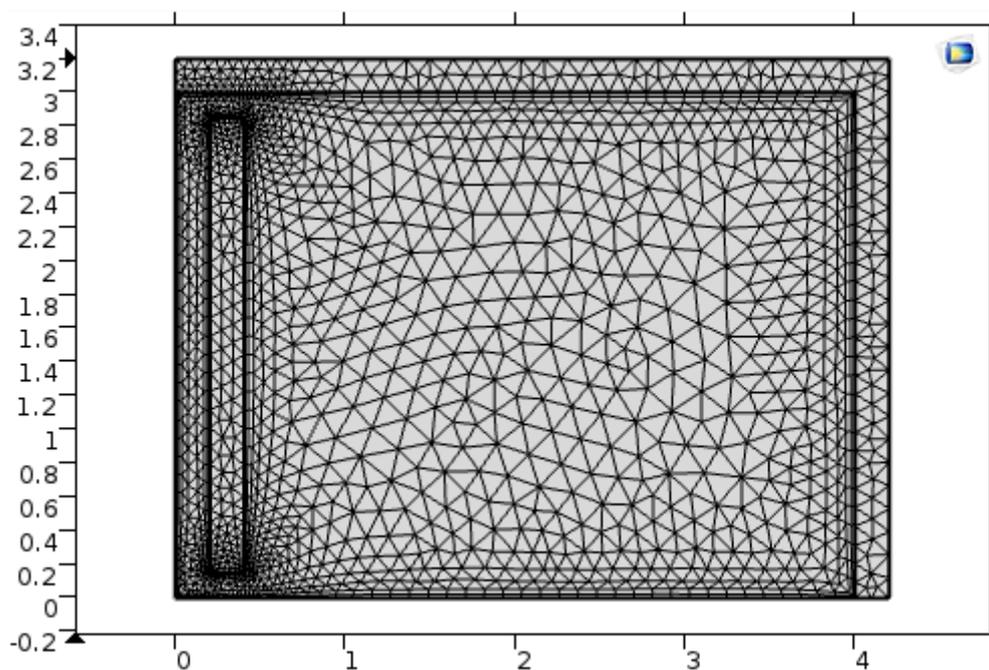
- **Maillage :**

Le maillage est une opération de génération d'une grille 2D de l'image par définition d'une partition, en éléments polygonaux, basée sur des caractéristiques homogènes pour la représentation réduite des données de cette image. Le but de cette opération est que l'image approchée par cette représentation soit la plus fidèle possible à l'image originale. Les sommets des polygones sont appelés nœuds et ces nœuds sont reliés entre eux par des arcs.

En général les difficultés rencontrées au cours de la génération d'une grille sont de deux types :

- la création de l'ensemble des nœuds (position et nombre).
- La création de la partition (le type de découpage).

Ce dernier point peut être de nature purement géométrique ou alors dépendre de données initiales de manière à minimiser certains critères.



III-10 Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté brièvement la méthode des volumes finis, les étapes de modèle mathématique.

Une résolution numérique bidimensionnelle des équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie a été mise en œuvre pour simuler la circulation de l'air et le champ de température dans l'enceinte. La résolution est effectuée par le code CFD «Comsol», basé sur la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus par ce code sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultat et Discussions

IV-1 Introduction :

Ce travail consiste à étudier le transfert thermique d'un mur Trombe à deux dimensions, le quel fait apparaître des états de chaleur produite, les températures maximales et minimales ressenties sur le mur, la température dans la zone interface etc...

Utilisant le logiciel « COMSOL », nous avons varié, à chaque fois type de mur pour étudier l'effet de mure et son influence sur le système. Les autres paramètres ont été utilisés deux murs froide Les caractéristiques du système ont été gardés constantes.

Les types choisis dans ce travail :

- Le mur de brick.
- Le mur de sel.
- Le mur d'argile.

On peut remarquer facilement que les températures dans la chambre changent en fonction du temps et de l'emplacement.

IV-2 le flux de chaleur le long d'un jour :

Le temps t est exprimé en seconde. Le flux solaire incident sur le mur Trombe ϕ (W/m²) 43200 s = 12h : c'est le temps d'ensoleillement, correspondant à la durée du jour en hiver, soit $\phi_{\max} = 537$ (W/m²), c'est le flux solaire maximum à 13 h 00. (Région de Naâma)

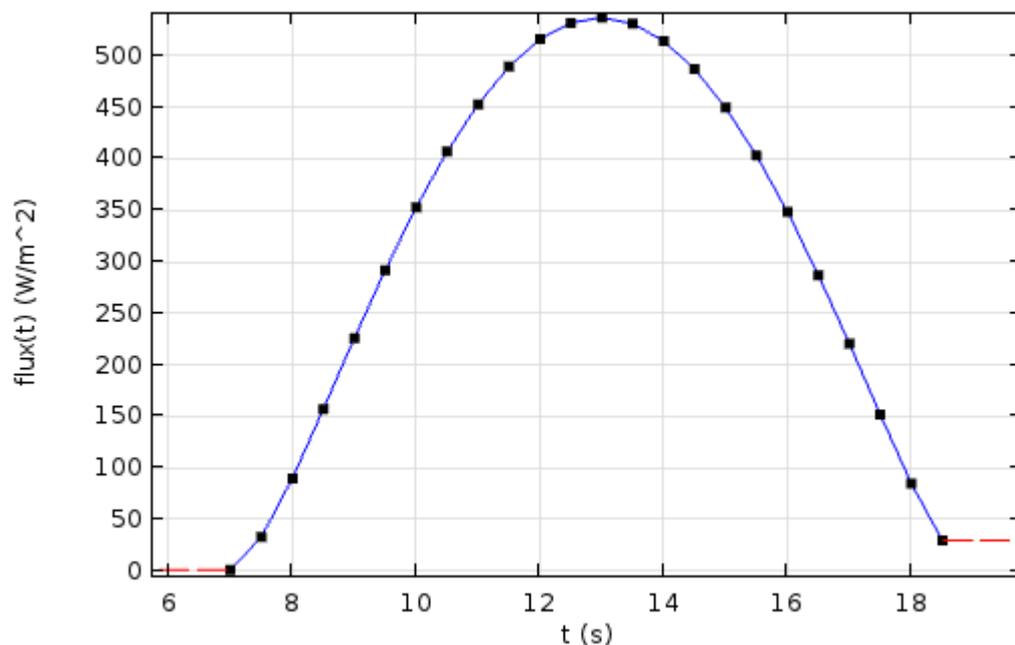


Figure IV-1 : flux de chaleur à travers une journée (01/01/2017) a Naâma

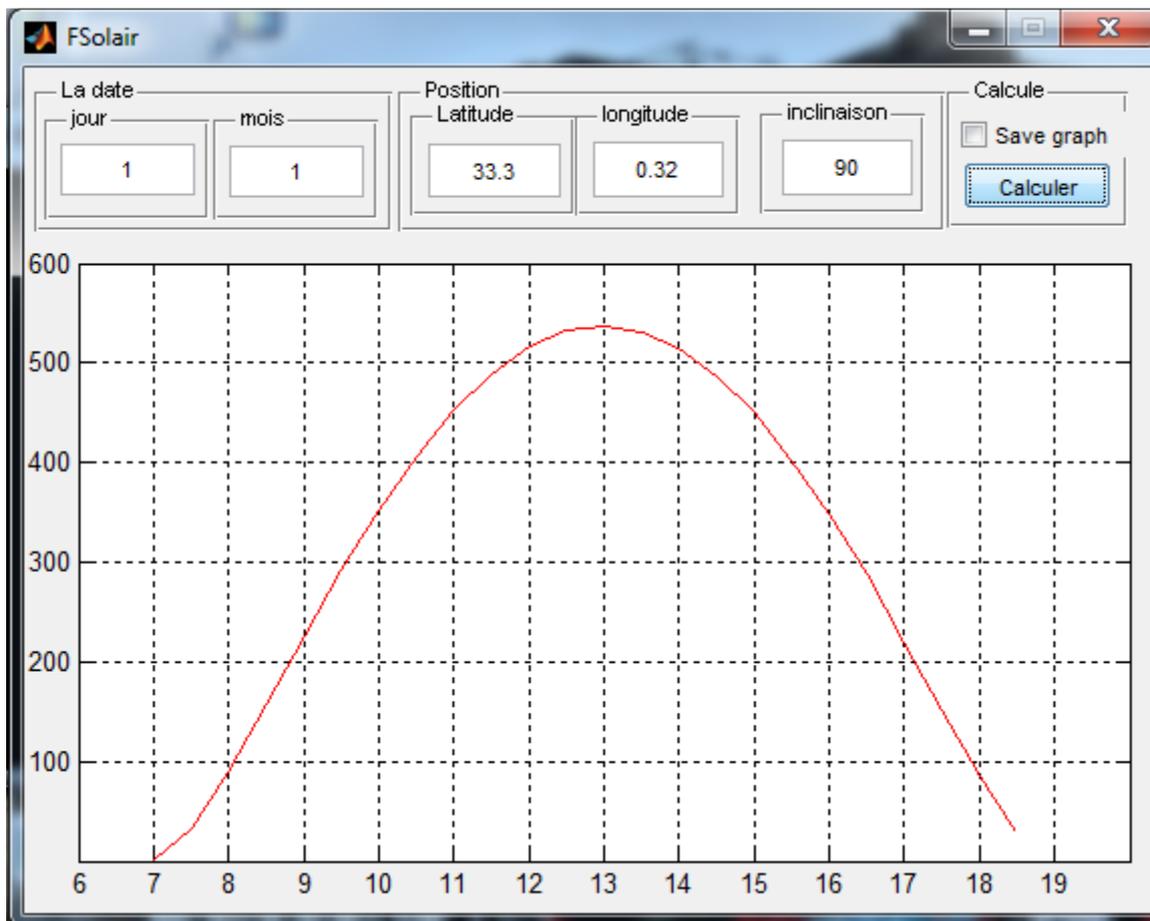


Figure IV-2 : programme de calcule de flux solaire en fonction de la date

Ce graphe est donné par un programme de calcule de flux solaire a travers une journée en fonction de position (latitude, longitude), inclination de capture et la date.

Ce programme élaboré par langage « MATLAB GUI » par **BEGHNI[15]** basé sur les équations de model solaire de LUI & JOURDAN

IV-2 Résultat et discussion :

IV-2-1 La chambre avec mur Trombe en brick : (01/01/2017)

- Le transfert chaleur dans la chambre à 8 :00 :

Dans ce cas le flux est 89.81 w/m^2 et le résultat :

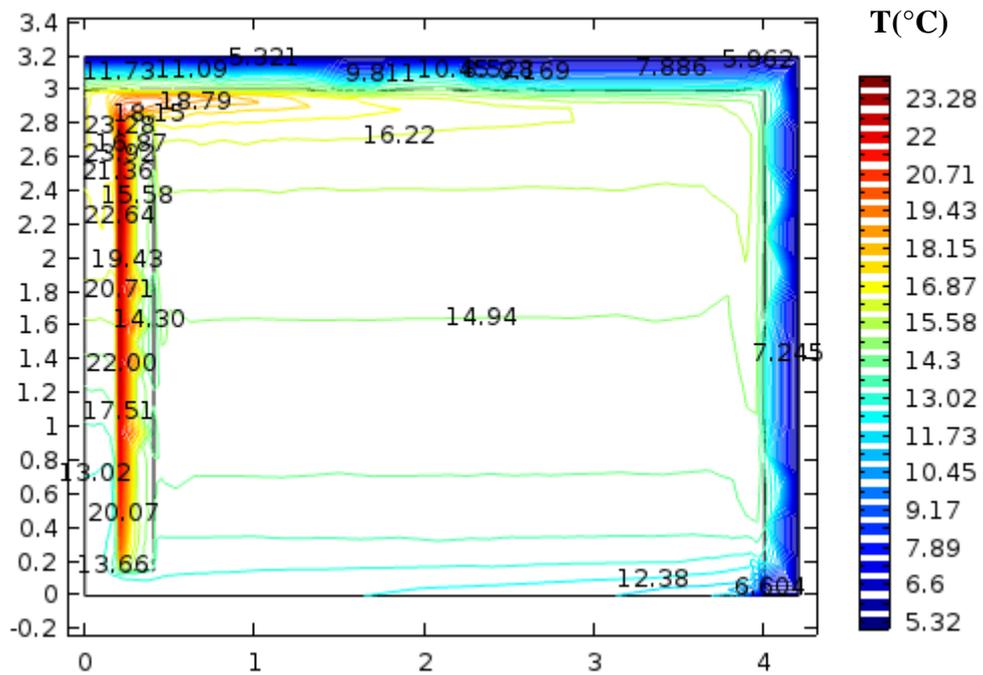


Figure IV-3 : isotherme à 8 :00 h

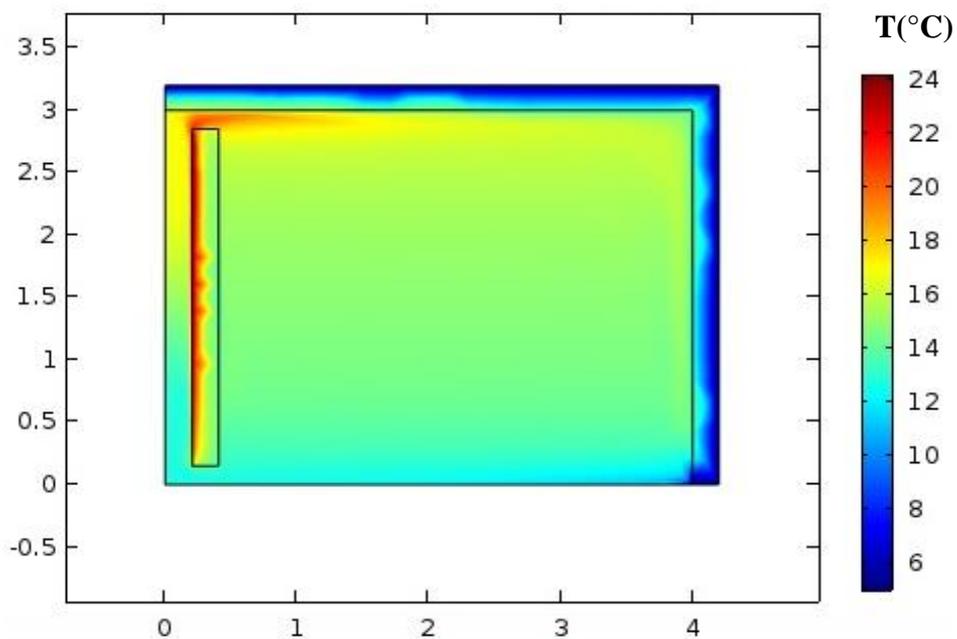


Figure IV-4 : surface Temperature à 8:00

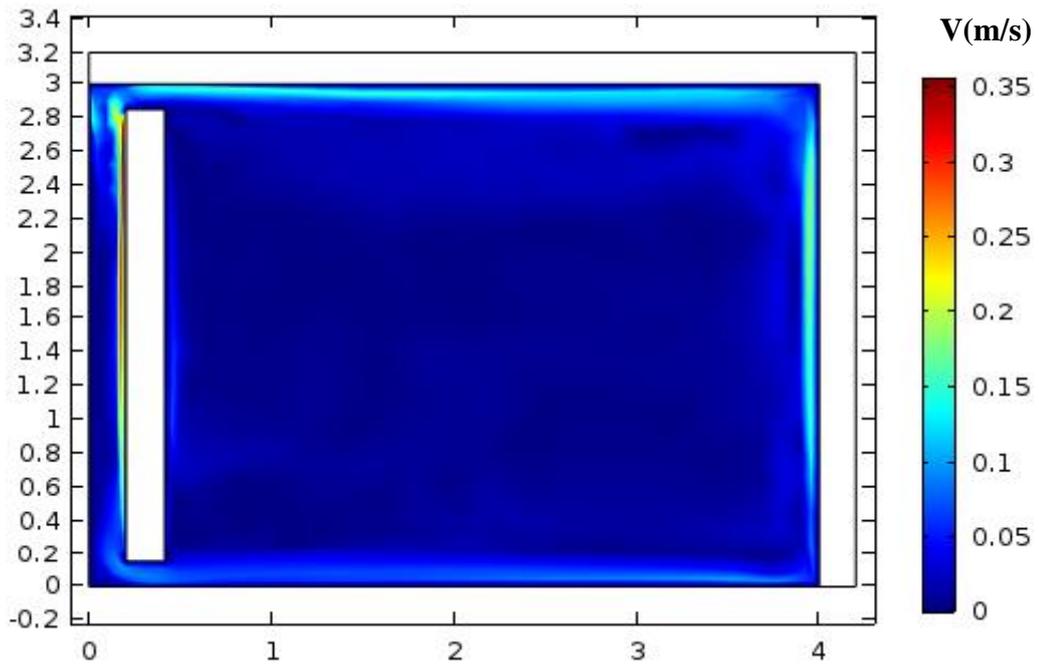


Figure IV-5 : Velocity magnitude à 8 :00

- Le transfert chaleur dans la chambre à 13 :00 :
 Dans ce cas le flux max est de 537 w/m2 et le résultat :

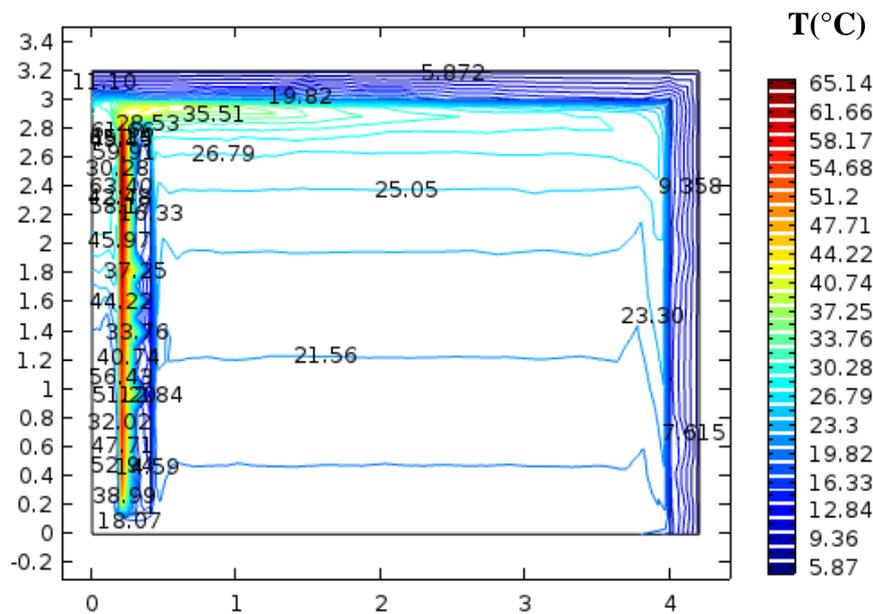


Figure IV-6 : isotherme à 13 :00

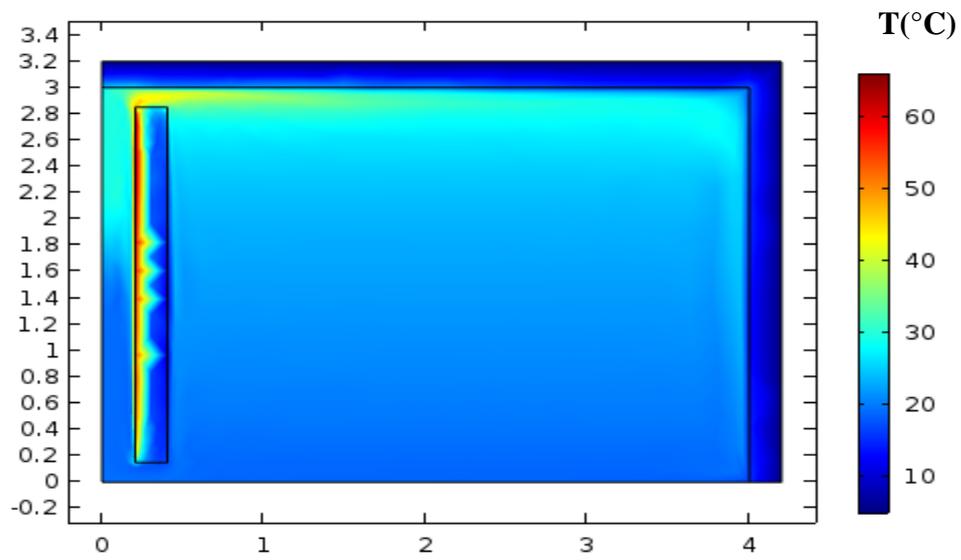


Figure IV-7 : la température en 17:00

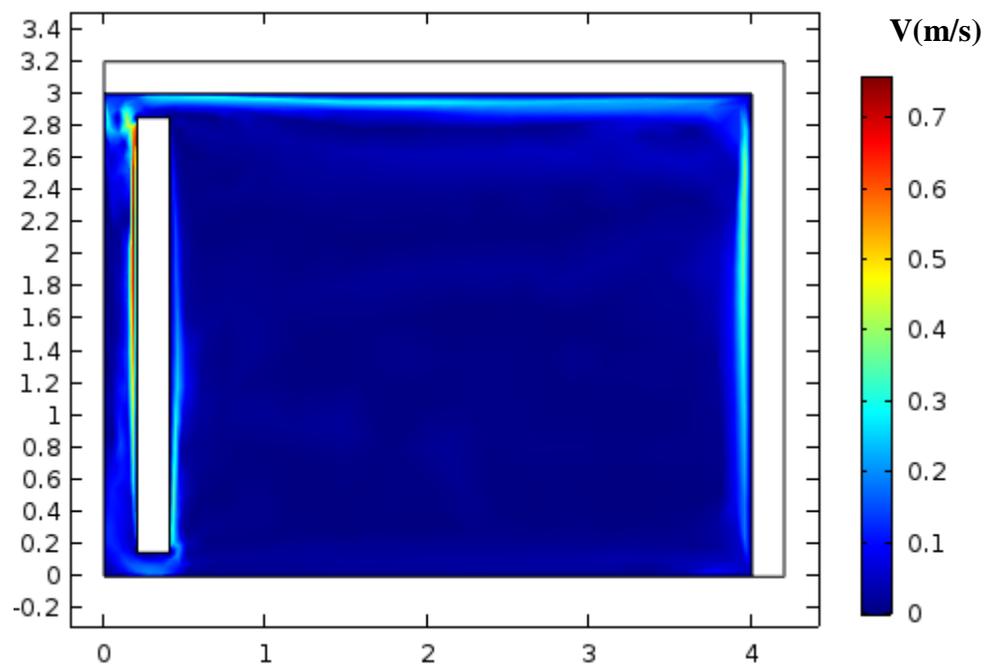


Figure IV-8 : Magnitude de Vitesse à 13 :00

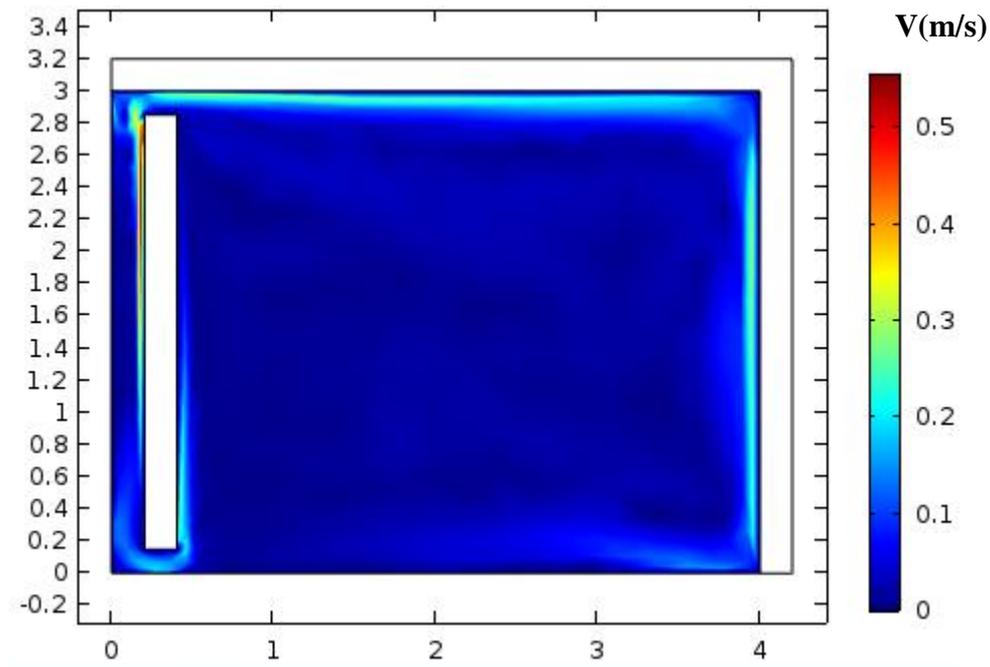


Figure IV-11 : surface (Magnitude de la Vitesse) à 17 :00

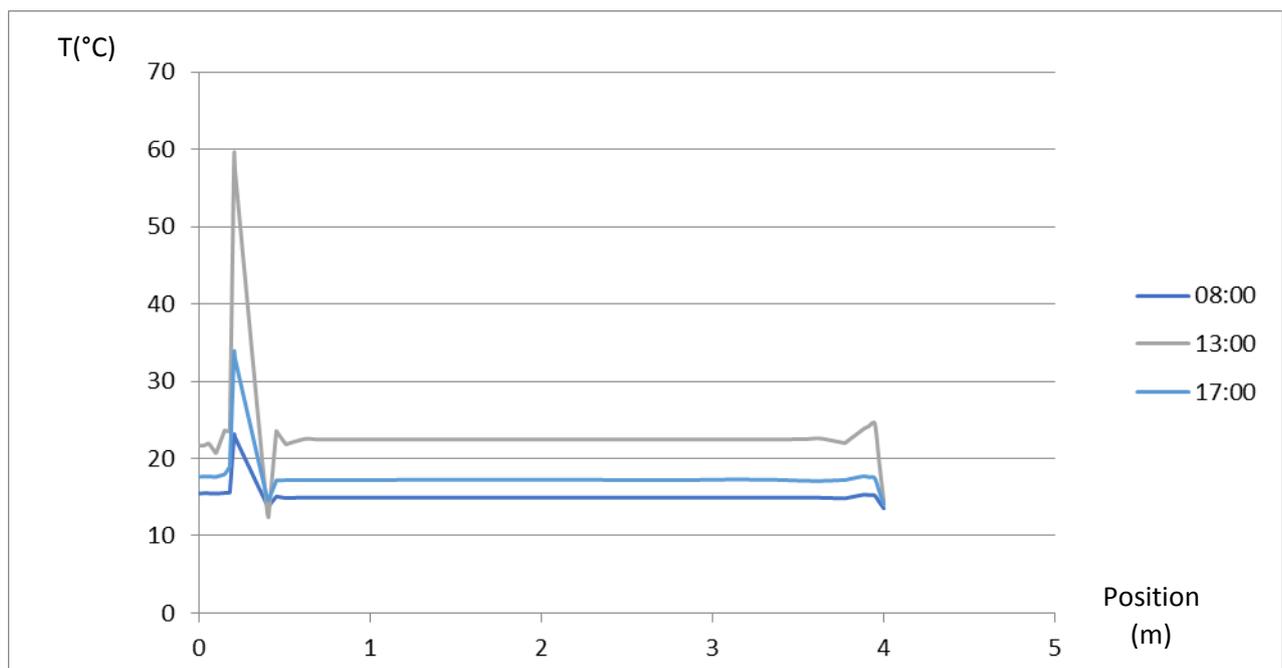


Figure IV-12 : transfert de la température dans la chambre par différents temps 8 :00 h,13 :00h ,17 :00h (mur Trombe en brick)

Les figures (IV-3.....IV-11) représentent les isothermes et les contours de vitesse dans une chambre avec mur trombe de brick à travers toute la journée, nous avons remarqué une augmentation maximale de température et parallèle augmentation de la vitesse dans le midi et après 17 :00 heures on a remarqué la température et la vitesse à être diminuée dans la Figure (IV-12), qui représente le graphe de la température en fonction de la distance de la chambre pendant

trois moments différents. En constate qu'à 13 :00 heures la température est élevé par rapport aux autres heures (08 :00 h, 17 :00 h)

IV-2-2 La chambre avec mur Trombe en sel : (01/01/2017)

- Le transfert de chaleur dans la chambre à 8 :00 :

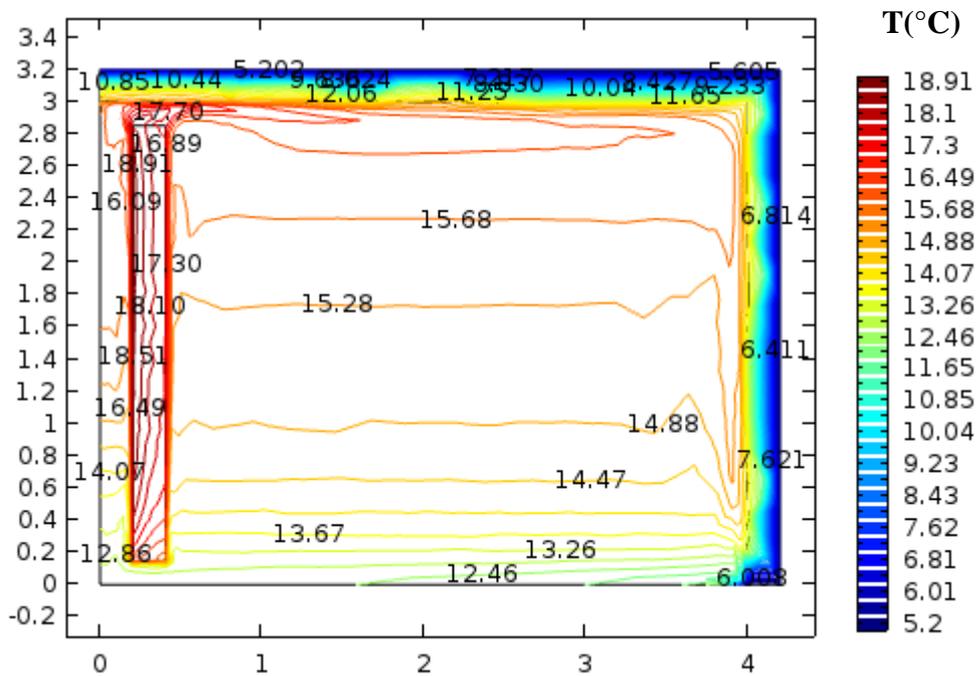


Figure IV-13 : isotherme à 8 :00

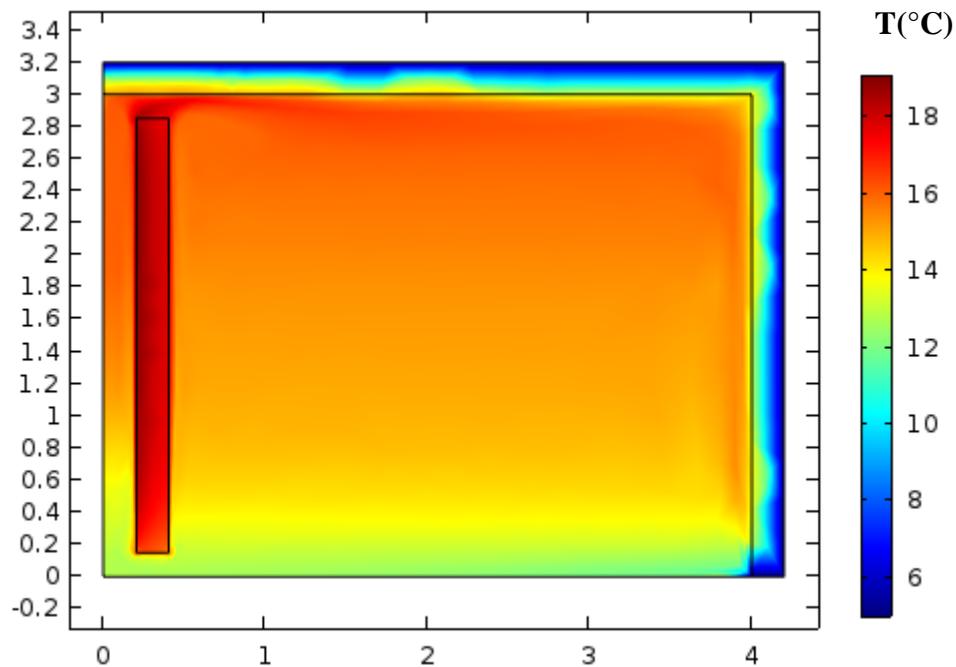


Figure IV-14 : surface à 8 :00

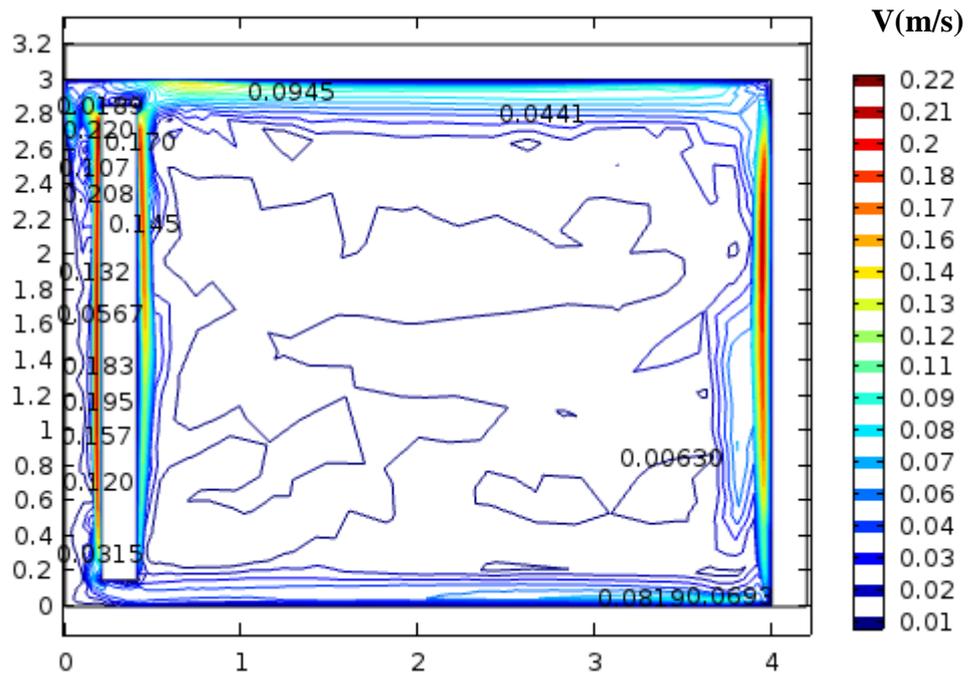


Figure IV-15 : Velocity magnitude à 8 :00

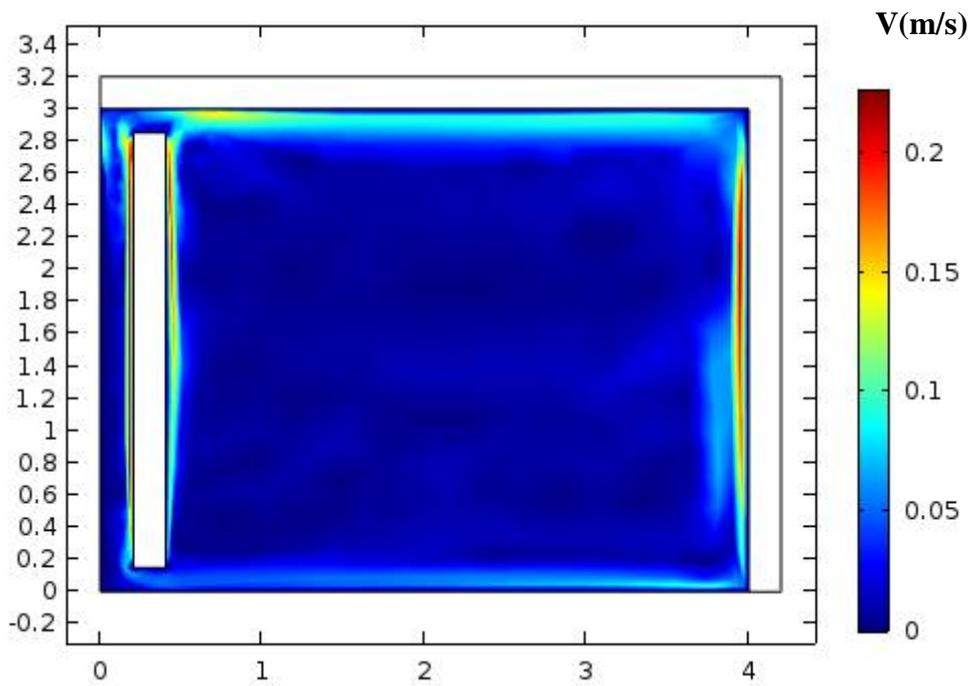


Figure IV-16: Velocity magnitude à 8 :00

- Le transfert de chaleur dans la chambre à 13 :00 :

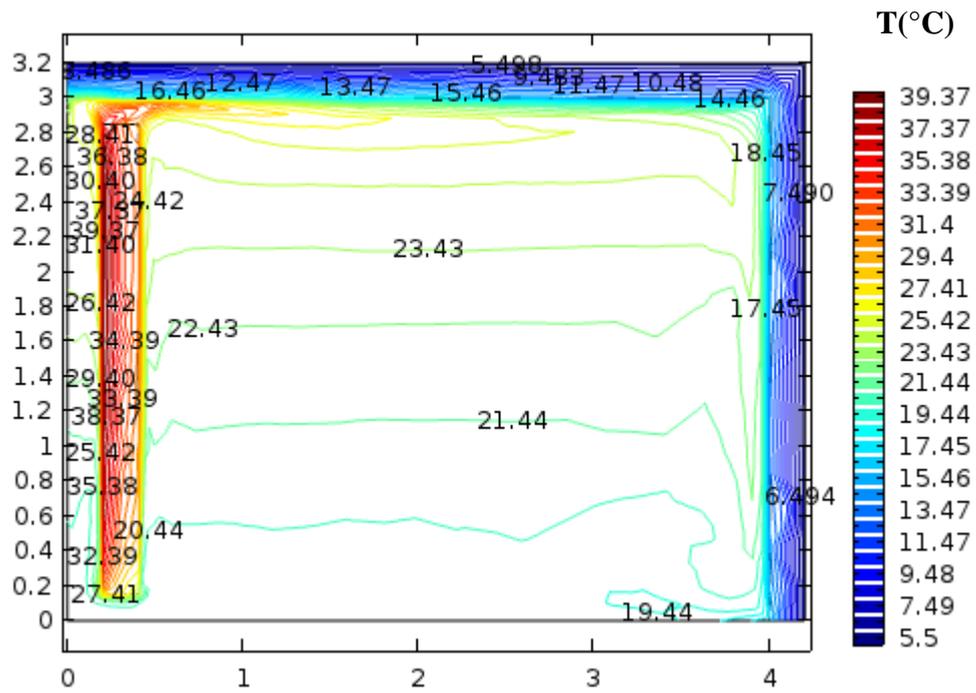


Figure IV-17: isotherme à 13 :00

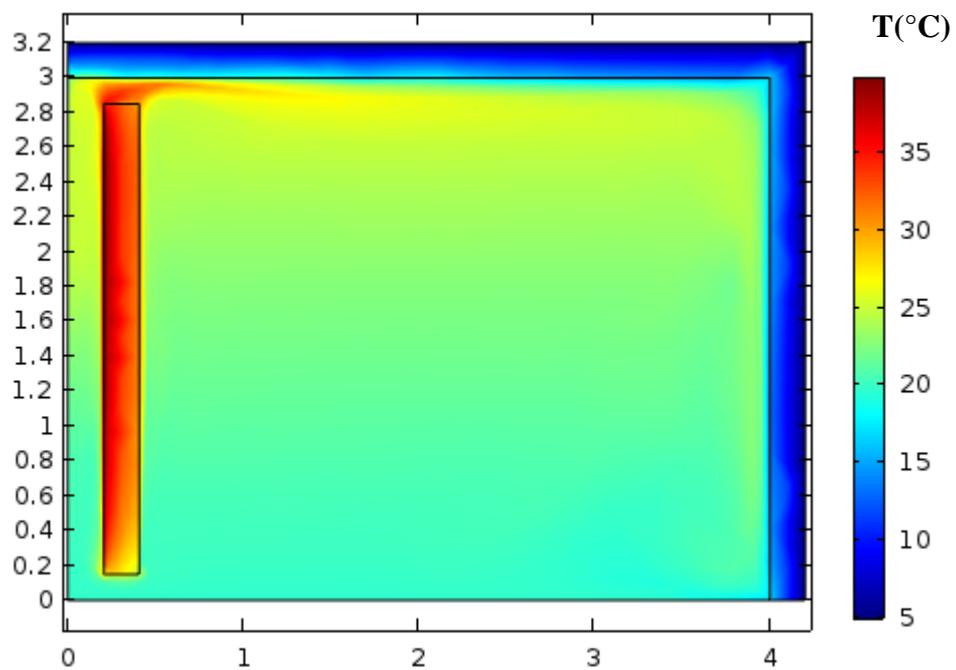


Figure IV-18 : surface à 13 :00

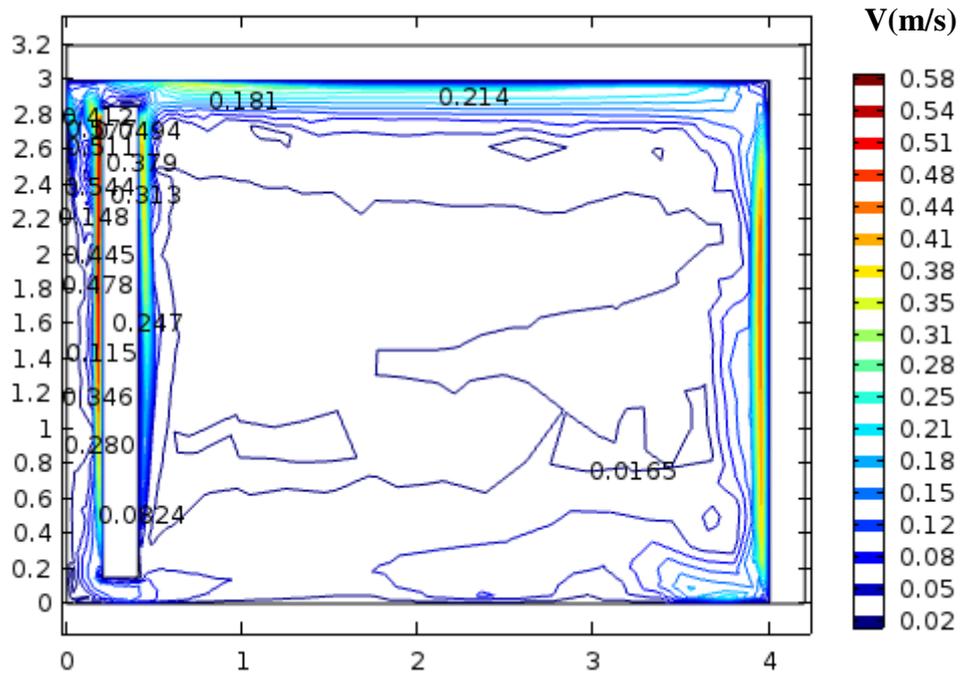


Figure IV-19 : Velocity magnitude 13 :00

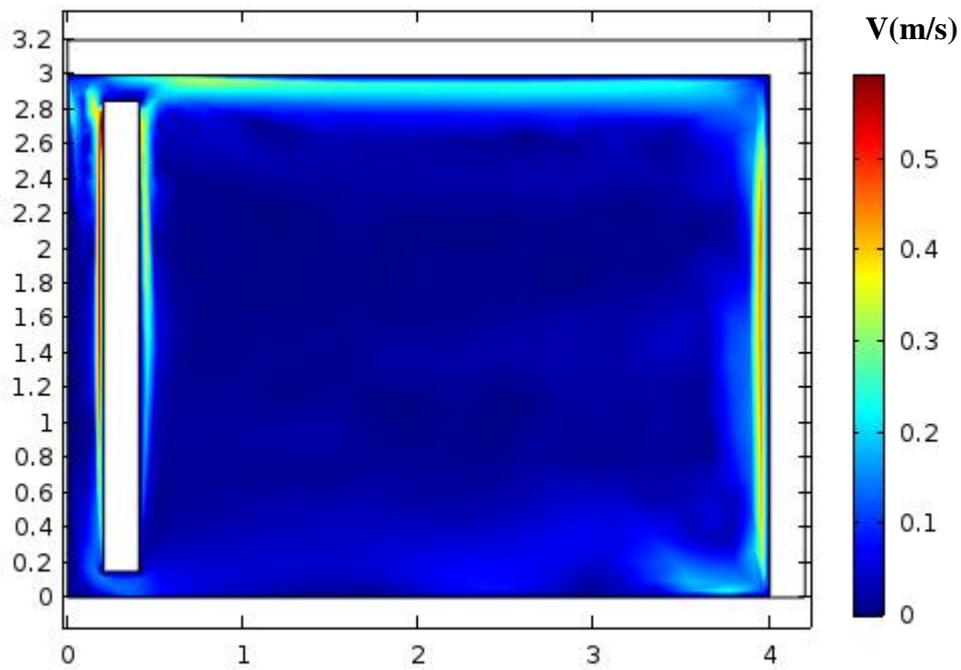


Figure IV-20 : surface (Velocity magnitude) à 13 :00

- Le transfert chaleur dans la chambre à 17 :00 :

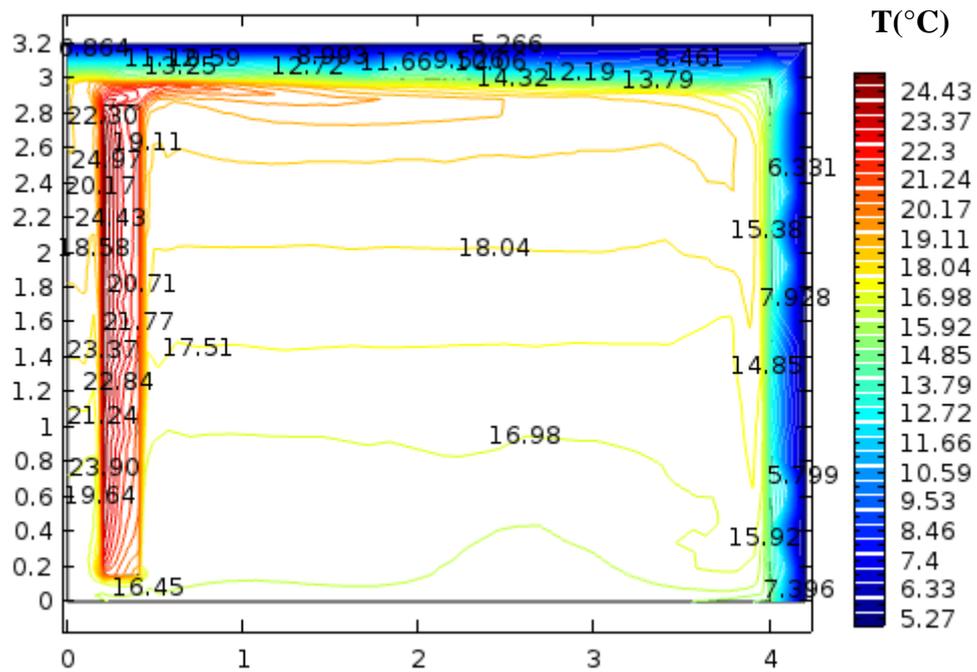


Figure IV-21 : isotherme à 17 :00

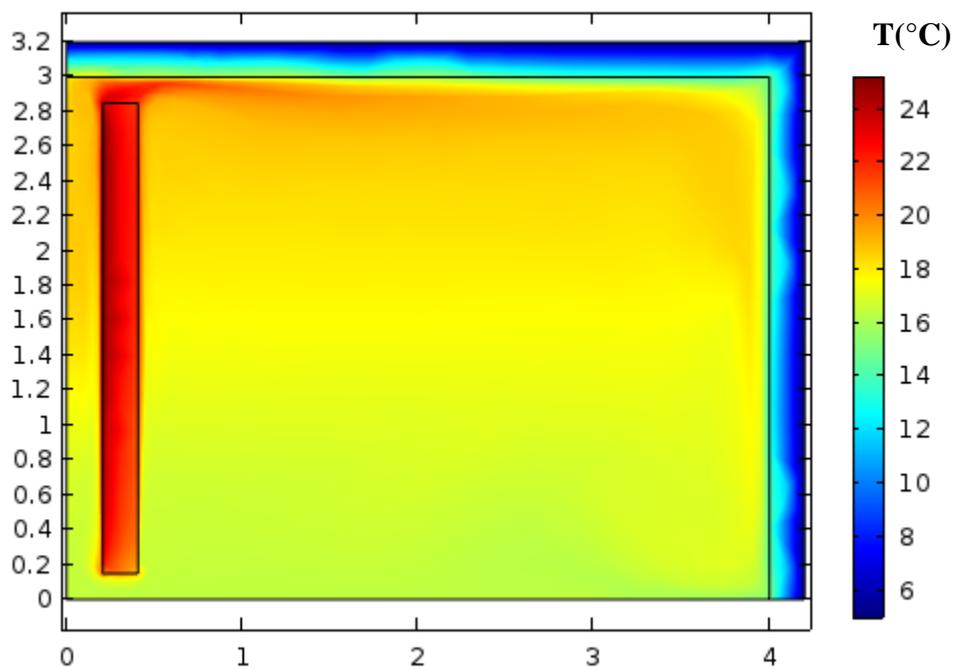


Figure IV-22 : surface à 17 :00

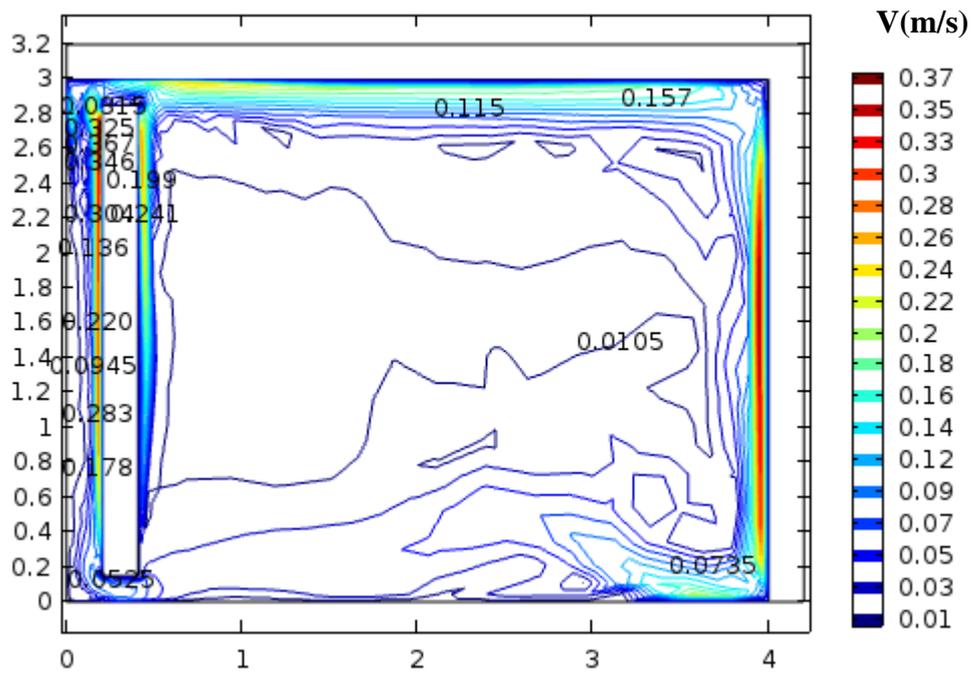


Figure IV-23 : Velocity magnitude à 17 :00

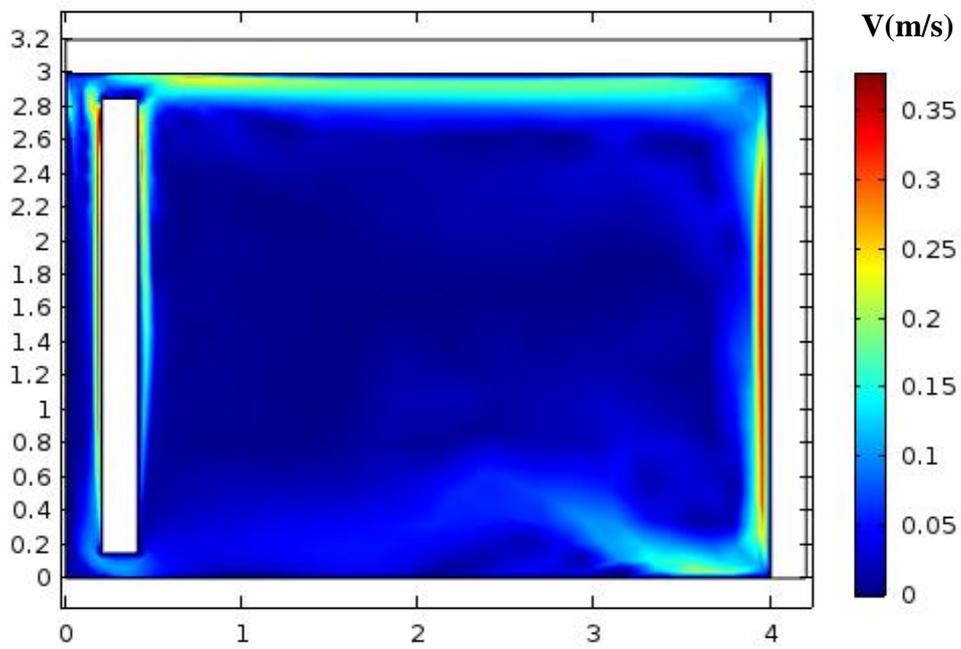


Figure IV-24 : surface (Velocity magnitude) à 17 :00

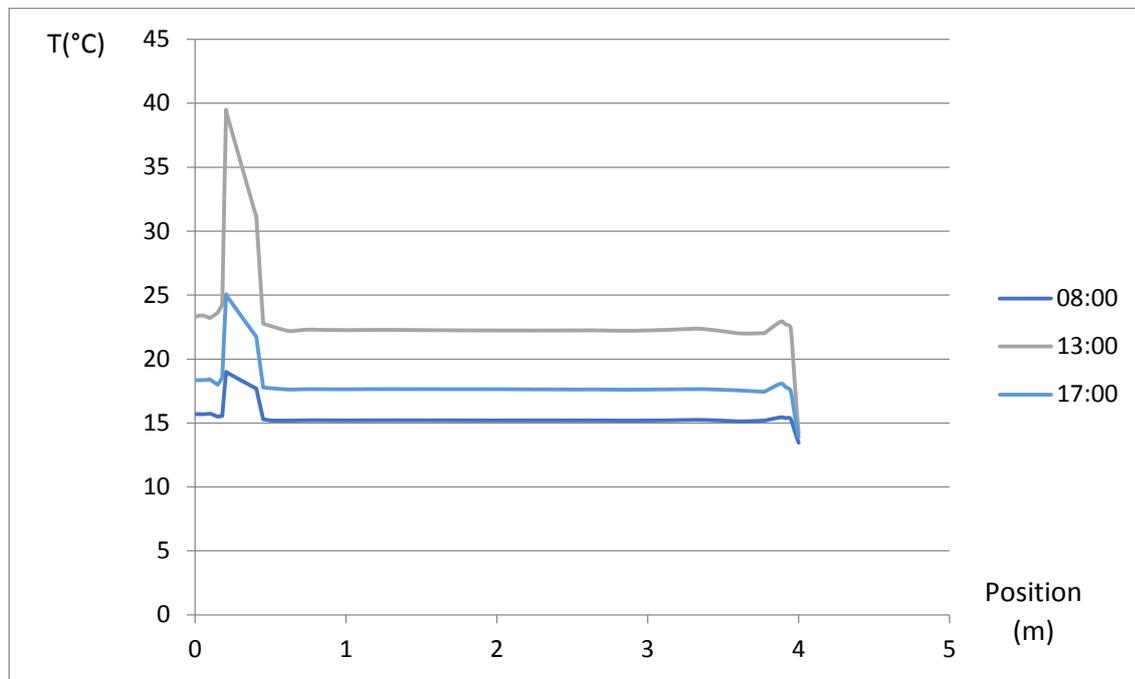


Figure IV-25 : transfert de la température dans la chambre par différence temps 8 :00 h,13 :00h ,17 :00h (mur Trombe en sel)

Les figures (IV-13.....IV-24) représenté les isothermes et les contours de vitesse dans une chambre avec mur trombe de sel à travers tout la journée, nous avons remarqué une augmentation maximale de température en parallèle d'une augmentation de la vitesse à midi et après 17 :00 heures on remarque que la température et la vitesse ont diminué.

Dans ce cas en remarqué la température dans le mur Trombe a 13 :00 h a été bas par rapporte le brick.

Dans le Figure (IV-25) représente le graphe de la température en fonction de distance de la chambre pendant trois moments différents en a remarqué à 13 :00 heures la température élevée par rapport les autres hures (08 :00 h, 17 :00 h)

IV-2-3 La chambre avec mur Trombe en argile : (01/01/2017)

- Le transfert chaleur dans la chambre à 08 :00 :

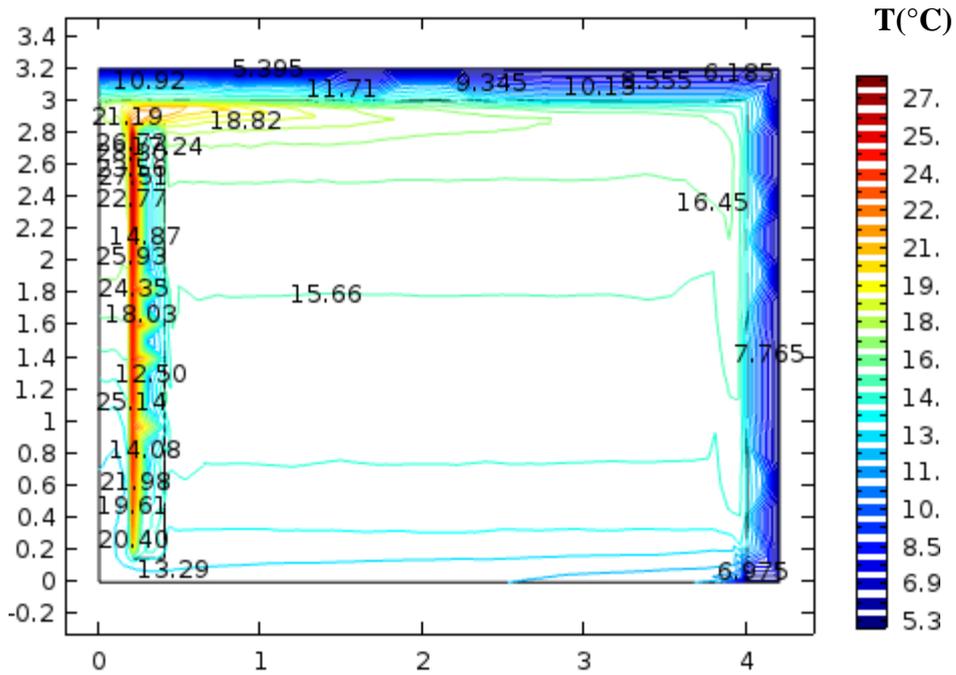


Figure IV-26 : isotherme à 08 :00

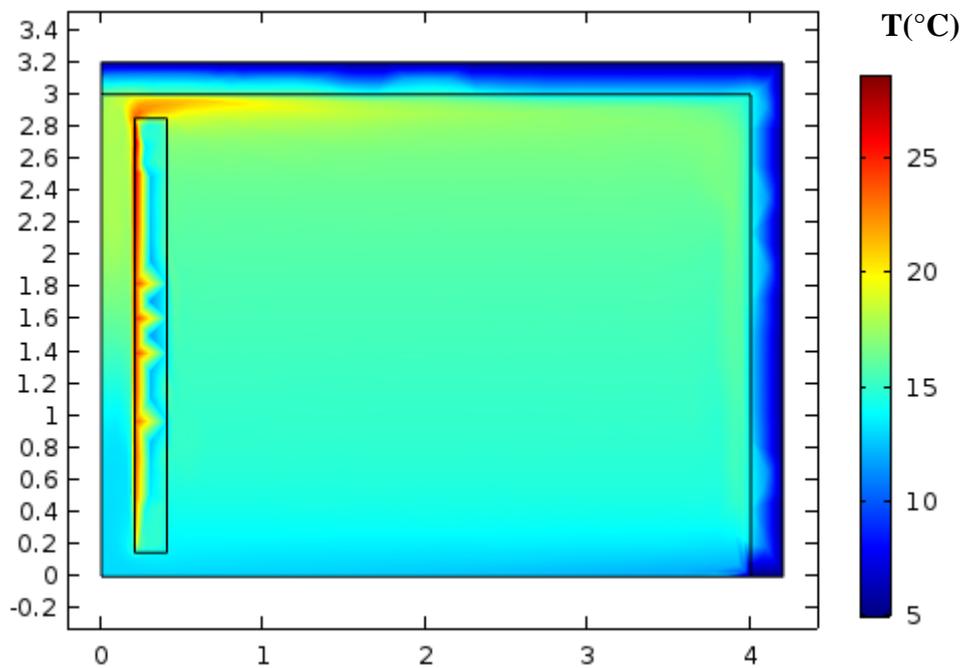


Figure IV-27 : surface à 17 :00

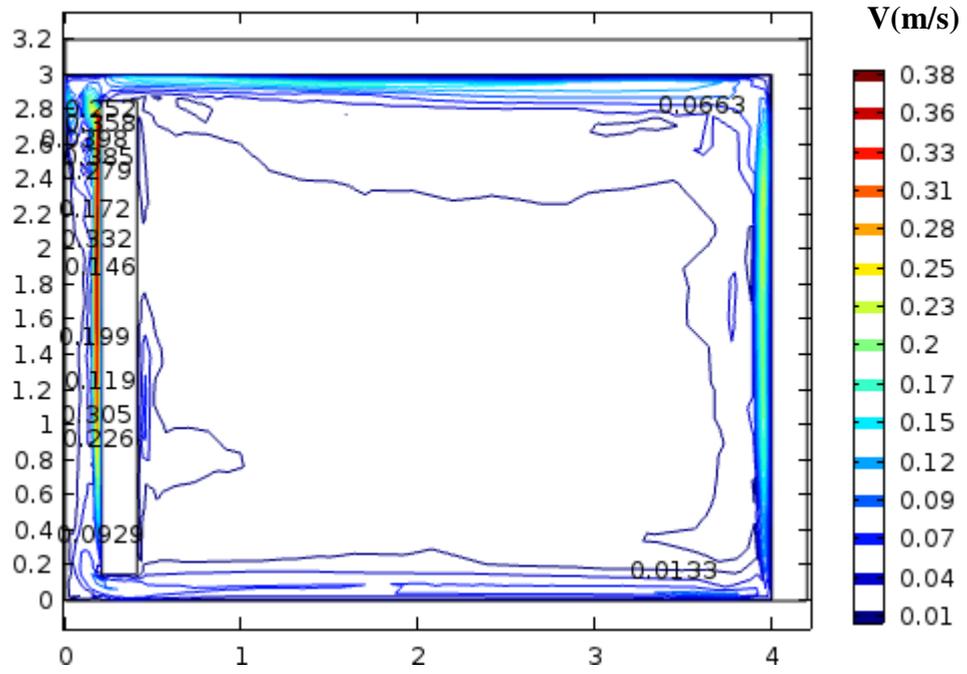


Figure IV-28 : vitesse contour à 08 :00

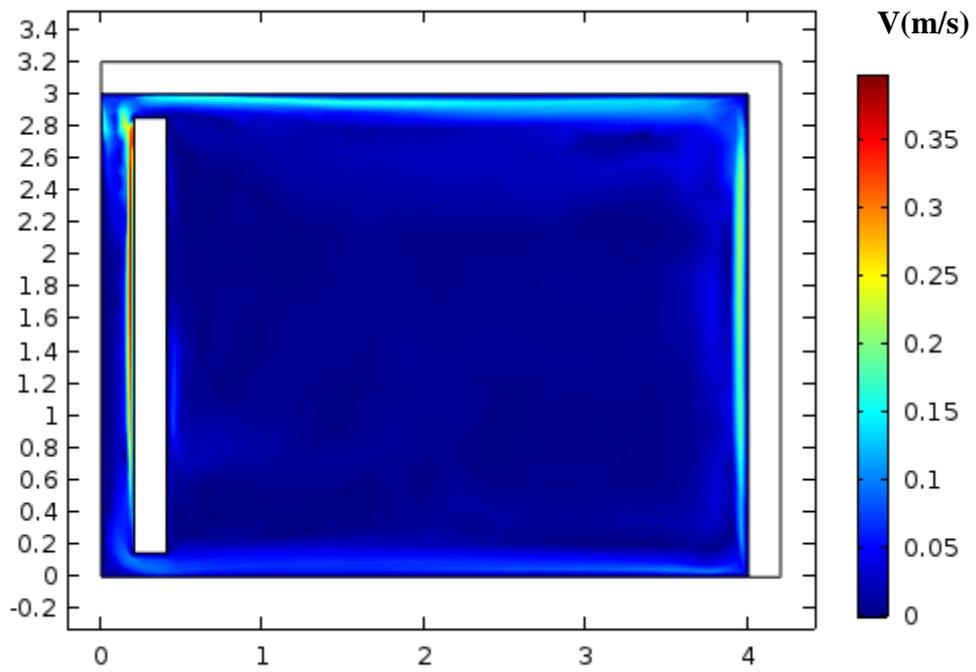


Figure IV-29: vitesse à 08 :00

- Le transfert chaleur dans la chambre à 13 :00 :

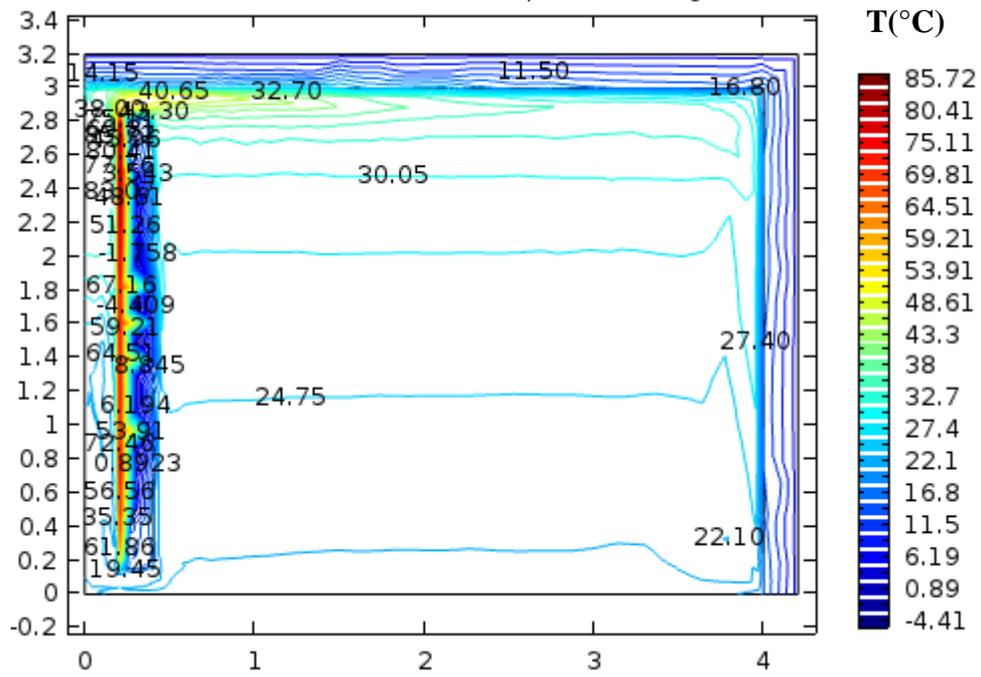


Figure IV-30 : isotherme à 13 :00

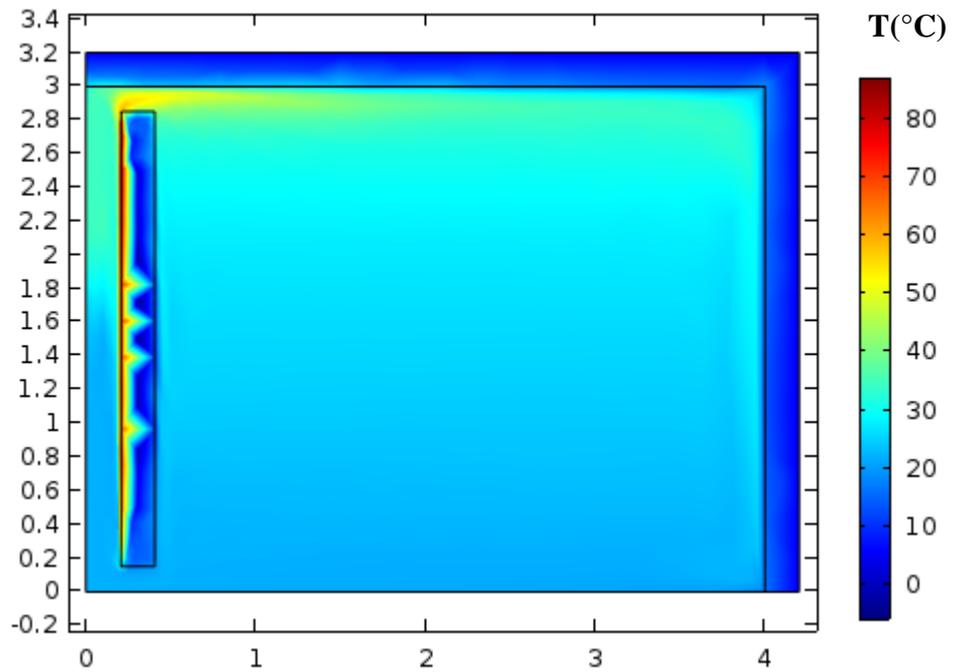


Figure IV-31 : surface à 13 :00

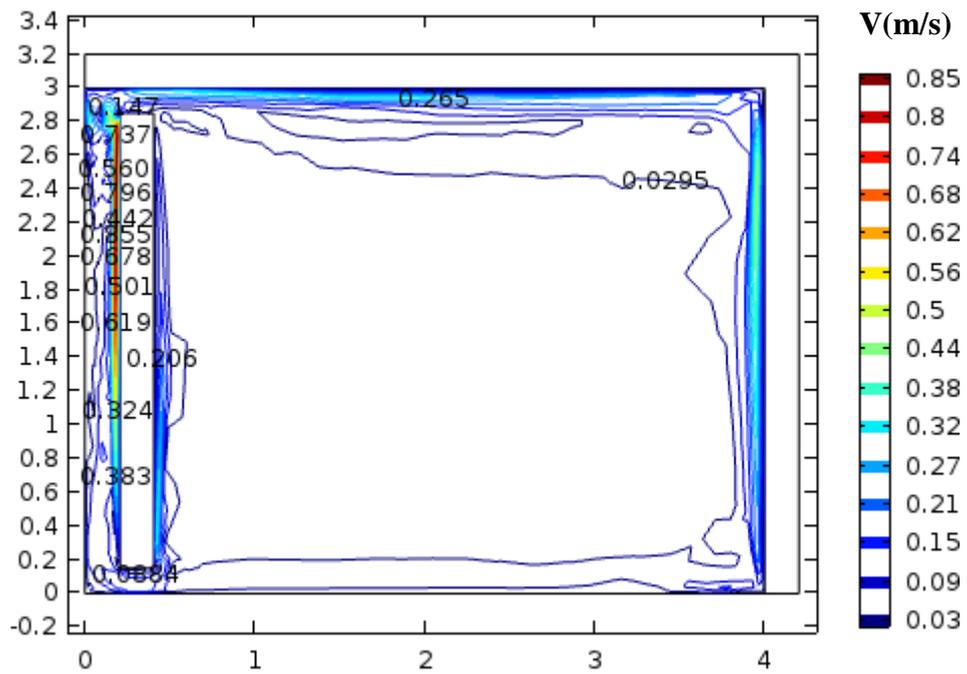


Figure IV-32 : vitesse contour à 13 :00

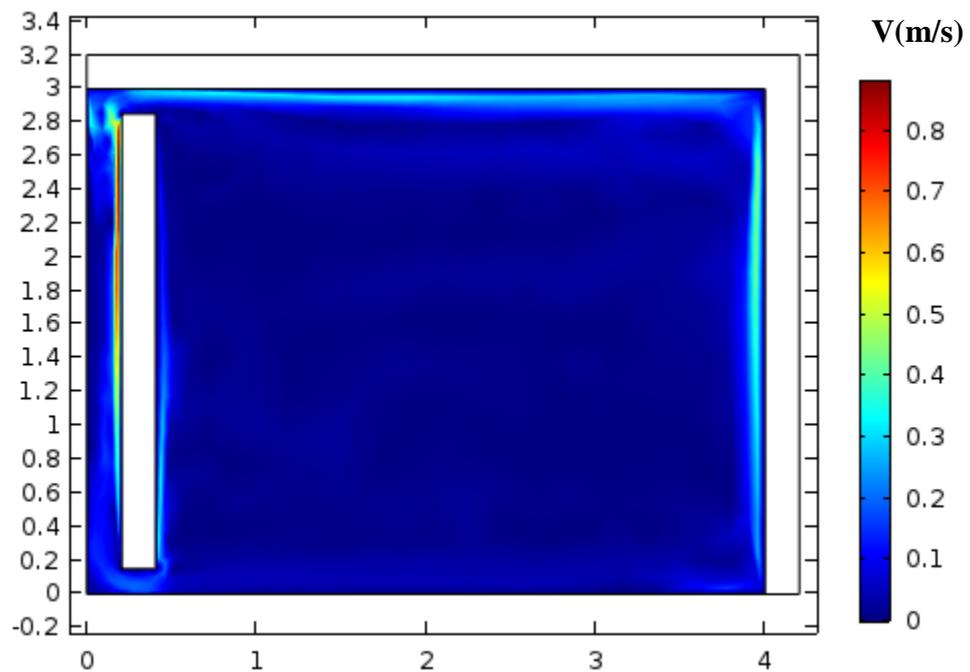


Figure IV-33 : vitesse à 13 :00

- Le transfert chaleur dans la chambre à 17 :00 :

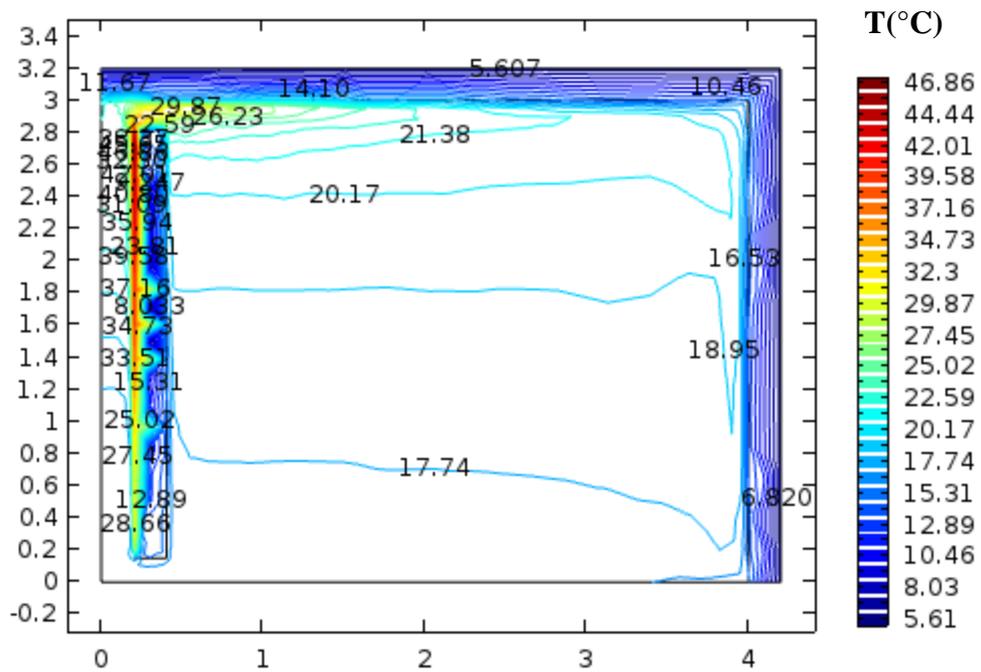


Figure IV-34 : isotherme à 17 :00

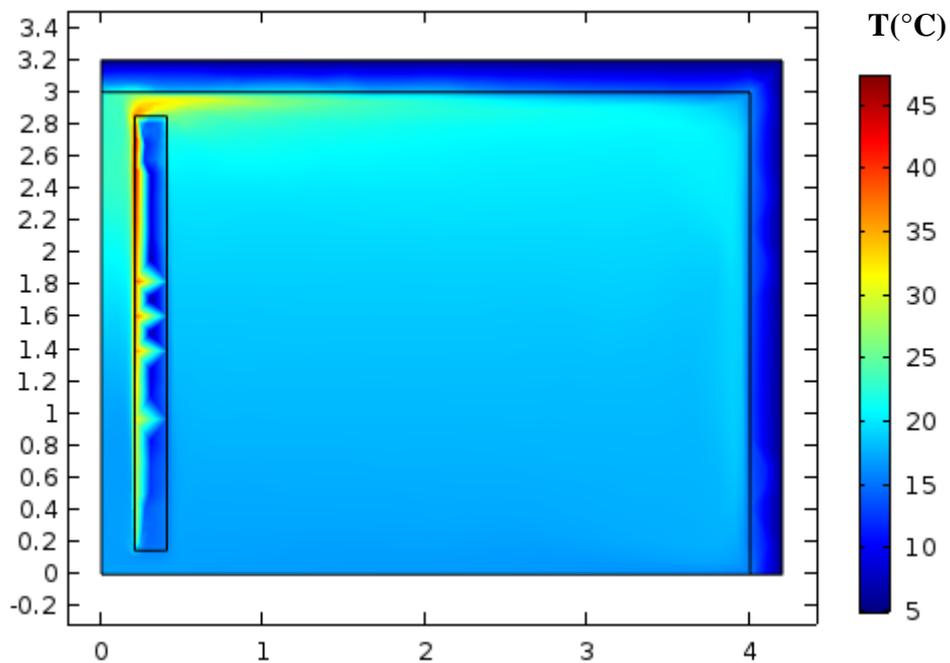


Figure IV-35 : surface à 17 :00

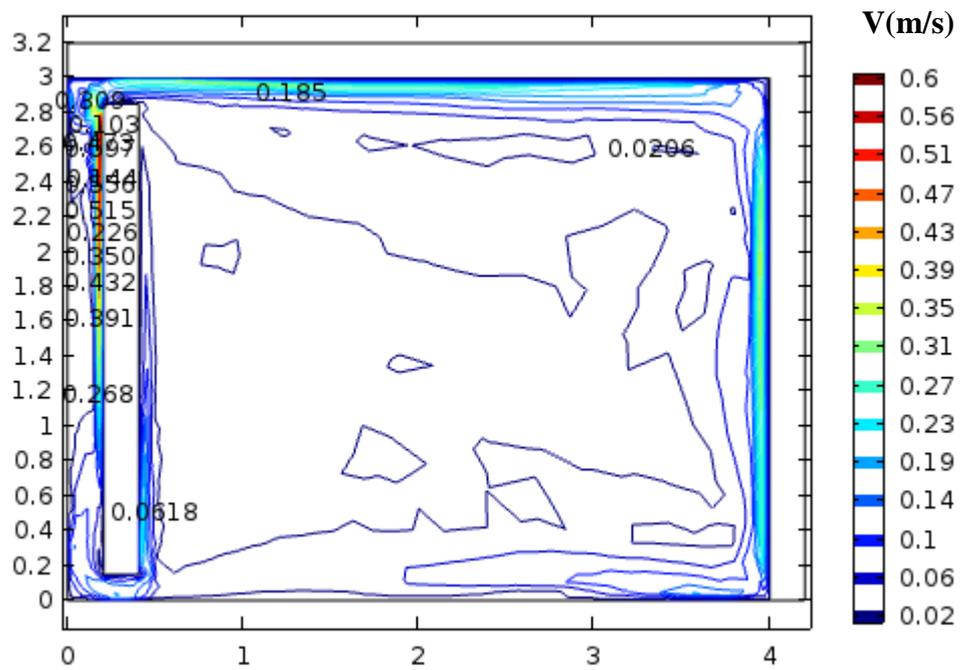


Figure IV-36: vitesse contour à 17 :00

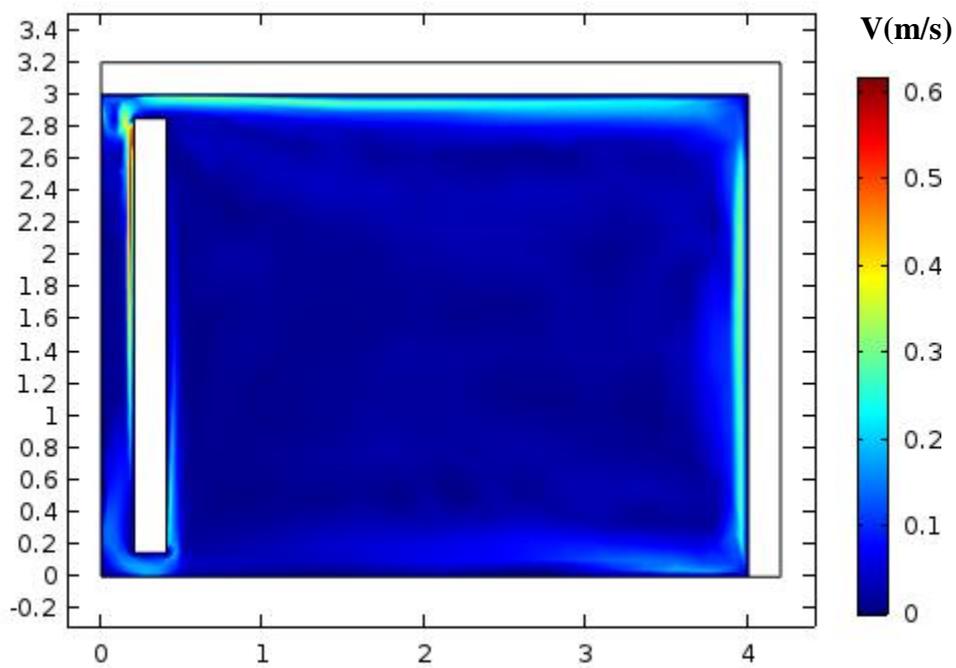


Figure IV-37 : vitesse contour à 17 :00

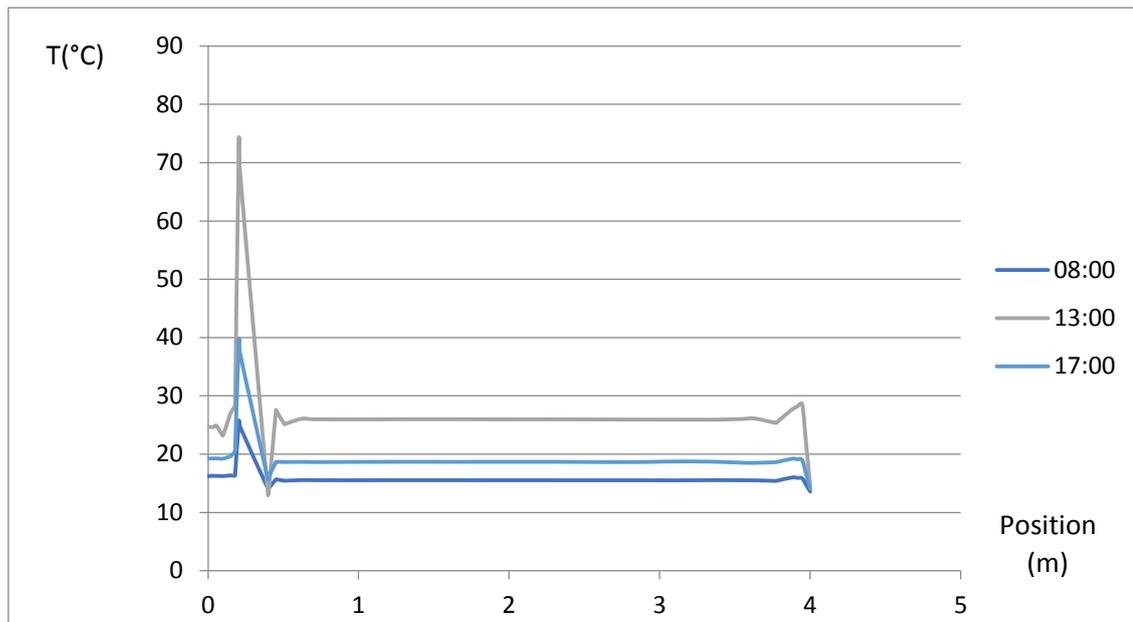


Figure IV-38 : transfert de la température dans la chambre par différent temps. 8 :00 h,13 :00h et17 :00h (mur Trombe en argile)

Les figures (IV-26.....IV-37) représenté les isothermes et les contours de vitesse dans une chambre avec mur trombe d'argile à travers tout la journée, nous avons remarqué une augmentation maximale de température et parallèle augmentation de la vitesse dans le midi et après 17 :00 heures en a remarqué la température et la vitesse a été diminué.

Dans ce cas en remarqué la température dans le mur Trombe a 13 :00 h a été trop élevé par rapporte les autres modelés (brick et le sel)

Dans le Figure (IV-38) représente le graphe de la température en fonction de distance de la chambre pendant trois moments différents en a remarqué qu'à 13 :00 heures la température est élevée par rapport aux autres heures (08 :00 h, 17 :00 h)

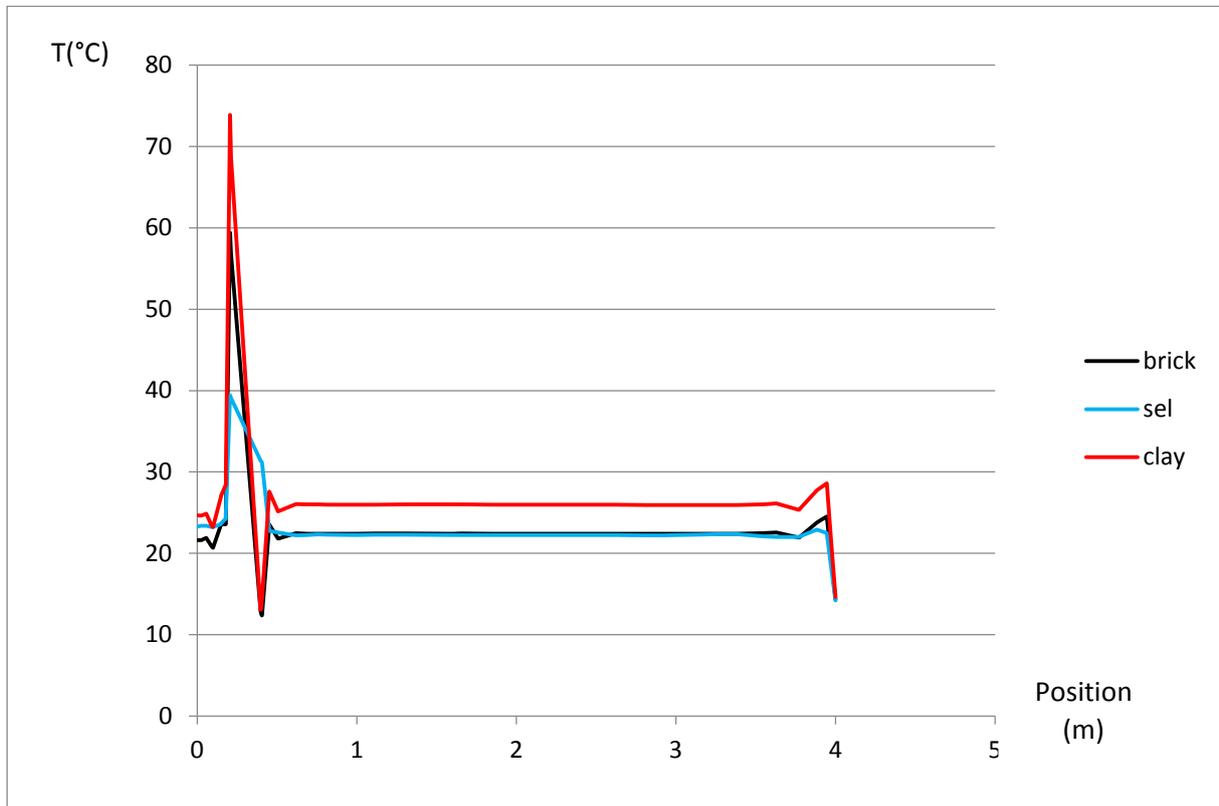


Figure IV-39: Différent température dans la chambre pour les trois mur

Dans le Figure (IV-39) on représente le changement de température pour les trois modèles de mur Trombe (brick, sel, argile) à 13 :00 h on remarque que la température a été augmenté pour les trois modèles mais dans le mur d'argile la température a été trop élevé. Et en déduit que le mur Trombe d'argile est le meilleur mur pour stocker la température et pour plus de confort.

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur la convection naturelle dans une enceinte. La configuration géométrique du modèle physique est un mur de trombe, soumise à un gradient de température vertical.

Le problème a été abordé selon une approche numérique, basée sur la méthode des éléments finis en utilisant le COMSOL

Nous avons pu déterminer les contours des lignes de courant et des isothermes, en différents temps Pendant (trois moments 8 :00h, 13 :00h, 17 :00h).

Les simulations étudiées dans ce travail nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

La température aux ouvertures en haut (air chaud) dépend fortement du flux solaire. Les résultats de la simulation fournissent une température et une vitesse d'air suffisantes à la sortie, afin d'assurer un bon confort thermique. L'utilisation de l'énergie solaire bénéficie de la contribution directe du rayonnement solaire. Nous devons considérer l'énergie solaire pendant la conception architecturale (façades double orientation vers le sud, surfaces vitrées, etc.). Les résultats obtenus pour la région de Naama semblent intéressants, ce qui peut faire beaucoup d'énergie.

Afin de continuer les recherches dans notre domaine d'étude, qui concerne les chambres de mur trombe, nous recommandons :

- D'étendre cette étude à d'autres formes et configurations plus complexes.
- D'élargir le domaine de simulation en trois dimensions.
- Etude du problème dans le cas de l'écoulement instationnaire et le régime turbulent.
- Introduire le mode de transfert de chaleur par rayonnement, ainsi que le champ magnétique.

Référence

- [1] **Kreith. F.** “ Transmission de la chaleur et Thermodynamique”. Masson – Paris 1967.
- [2] **Padet. J.** “Principes des transferts des chaleurs convectives” Polytechnique Paris 1997.
- [3] **C. DOREMUS** « *L'énergie* » Edition : Yves THOMAS Bordas Paris 1981
- [4] **Zhijie Yin** “Simulation and Modification of a Composite Trombe Wall to Adapt to the Climate in Victoria, Canada” BEng, Northwestern Polytechnical University, 2012
- [5] **Cammarata G., Petrone G.*,CammarataL** “Transient Analysis of the Buoyancy Driven Flow in a Passive Solar System for Indoor Heating” Corresponding author : Viale A. Doria 6 – 95125 Catania, gpetrone@diim.unict.it
- [6] **Pascal Henry Biwole, Patrick Achard** “Thermal behavior of a passive solar wall with silica aerogel and phase change materials” 9th International Energy Forum on Advanced Building Skins, Oct 2014, Bressanone, Italy.
- [7] **G. Guohui** , “ A Parametric study of Trombe Walls for Passive Cooling of Buildings” Energy and Buildings 27(1998).37-43.Elsevier
- [8] **Zohir YOUNSI, Laurent ZALEWSKI** “ étude expérimentale d'un mur trombe-composite à échelle réduit intégrant des matériaux à changement de phase” Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Technoparc FUTURA 62400 Béthune Cedex France b Department of applied sciences – Université du Québec à Chicoutimi, 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi Qc G7H 2B1 Canada
- [9] **Harry BOYER, Franck LUCAS** “Simulations de dispositifs du type Mur Trombe avec CODYRUN” ESIM 2006, May 2006, Toronto, Canada. pp.81-233, 2006. <Hal-00768185>
- [10] **K. Hami*, B. Draoui et O. Hami** “Modélisation d'un système de chauffage passif dans la région de Béchar” Faculté des Science et Technologie, Université de Béchar, B.P. 417, 08000 Béchar
- [11] **Mohammed BENSAFI. Nour Edine KAID** “Modeling the Energy Effect of a Passive Heating System Provided with a Trombe Wall” International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online): 2319 – 6734, ISSN (Print): 2319 – 6726 www.ijesi.org Volume 3 Issue 7 | July 20calci4 | PP.66-71
- [12] **K. Imessad et M. Belhamel** “Evaluation des Performances d'un Mur Trombe” Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger
- [13] **Jiyuan Tu , Guan-Heng Yeoh , Chaoqun Liu** “ Computational Fluid Dynamics A Practical Approach Second Edition” 2013, 2008, Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [14] **Hervé Oudin** “Méthode élément finis” Engineering school Ecole Centrale de Nantes, 2008, pp.63.
- [15] **BEGHNI Abdelghani**, programme de calcul de flux solaire « **FSolair** »

