



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université KASDI Merbah d'Ouargla



ooOoo

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

ooOoo

Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Amélioration de l'efficacité thermique d'un capteur solaire
à air avec système de stockage d'énergie thermique

Présenté et soutenu publiquement le (15/06/2021) par

Siad Redouane et Djouhri Sliman

Devant le jury :

ZIANI Lotfi

ACHOURI El Hadj

BOUBEKRI Abdelghani

BENHAMZA Abderrahmane

MCB

MAA

Professeur

Docteur

Président

Examineur

Encadreur

Co-encadreur

Année Universitaire : 2020 /2021

Remerciements

Le présent travail a été effectué dans le cadre du mémoire de Master académique en énergétique au département de génie mécanique et a été accueilli dans le laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides (**LENREZA**) à l'université de KASDI MERBAH Ouargla (Algérie).

Nous tenons tout d'abord à remercier très vivement monsieur **le professeur BOUBEKRI Abdelghani** qui a eu l'aimable volonté de diriger ce travail.

Nous adressons également nos remerciements particuliers au **Dr. Benhamza Abderrahmane** notre co-encadreur, pour sa participation active au suivi de ce travail et ses conseils constructifs tout au long du semestre.

Nous remercions également messieurs, **Dr. ZIANI Lotfi** et **Dr. ACHOURI El- Hadj** pour avoir gentiment accepté de juger le travail de ce mémoire.

Nous remercions également l'ensemble du corps enseignant du département Génie mécanique pour la qualité de la formation dont on a bénéficié sur toutes nos années d'étude.

Enfin nos vifs remerciements sont adressés à toute personne ayant participé ou aidé, de loin ou de près, à l'achèvement de ce travail.

Dédicaces

أهدي هذا العمل المتواضع إلى

من وضع المولى - سبحانه وتعالى - الجنة تحت قدميها، ووقَّرها في كتابه العزيز...

(أمي الحبيبة)

إلى خالد الذكر، الذي وفاته المنية منذ 7 سنوات، وكان خير مثال لرب الأسرة،

والذي لم يتهاون يوم في توفير سبيل الخير والسعادة لي..

(أبي الموقر)

إلى من أعتمد عليهم في كل كبيرة وصغيرة..

(اخوتي واخواتي)

إلى أصدقائي واحبابي ومعارفي الذين أُجلُّهم وأحترمهم..

إلى كل أساتذتي في كلية الهندسة الميكانيكية عامة ولأستاذ بن حمزة عبد الرحمان خاصة.

سليمان جوهري

Je Dédie Ce Mémoire à :

Mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, Leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A mes sœurs ainsi qu'à mes frères pour leur tendresse, leur SUPPORT.

A toute ma famille ainsi qu'à mes amis.

Redouane Siad

Sommaire

Sommaire	I
Nomenclature	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Introduction générale	1
<u>Chapitre 1 : Capteurs solaires</u>	<u>4</u>
1.1. Définition	4
1.2. Classification des capteurs solaires à air	4
1.3. Différents types des capteurs solaires à air	5
1.3.1 Les capteurs à absorbeur perméable	6
1.3.2 Capteur à absorbeur à géométrie variable	6
1.3.3 Capteur solaire à absorbeur plan	7
1.4. Principe de fonctionnement du capteur solaire à air	7
1.5. Domaines d'application des capteurs	8
<u>Chapitre 2 : Matériaux à changement de phase</u>	<u>10</u>
2.1. Introduction	10
2.2. Méthodes de stockage d'énergie thermique	10
2.2.1 Stockage par chaleur sensible	10
2.2.2 Stockage par chaleur latente	11
2.2.3 Matériaux à changement de phase	12
2.2.4 Comment choisir MCP ?	14
2.3. Les application du matériaux à changement de phase pour le stockage d'énergie	15
2.3.1 Stockage thermique dans les bâtiments	15
2.3.2 Chauffage et refroidissement de l'eau	16
2.3.3 Industries textiles	17
2.3.4 Biomédical et biomatériau	18
2.3.5 Stockage d'énergie solaire	20
<u>Chapitre 3 : Présentation du problème Physique</u>	<u>22</u>
3.1. Introduction	22
3.2. Géométrie du problème	22
3.3. Propriétés thermo-physiques	24

3.4.	Hypothèses simplificatrices	24
3.5.	Equations gouvernantes dimensionnelles	25
3.6.	Conditions initiales et aux limites.....	25
3.7.	Equation de la variation de température ambiante en fonction du temps	27
3.8.	L'équation de la variation de l'intensité solaire en fonction de temps	28
3.9.	Principales étapes pour définir un problème de CFD	29
3.10.	Présentation du code FLUENT	29
3.11.	Résolution du problème avec le code ANSYS FLUENT	30
3.12.	Schéma du maillage du modèle physique adopté	31
Chapitre 4 : Résultats et discussion.....		33
4.1.	Introduction.....	33
4.2.	Choix du maillage optimal.....	33
4.3.	Choix du meilleur MCP	34
4.3.1	Simulation du capteur solaire avec intégration du MCP comme couche plate.....	34
4.3.2	Simulation du capteur solaire avec intégration du MCP comme cylindre ondulé.....	36
4.4.	Effet de la géométrie du MCP	39
4.4.1	Etude de l'effet d'utiliser trois MCP différents	41
Conclusion générale.....		47
Références.....		48

Nomenclature

Lettres latines

Symbole	Désignation	Unité
H	Hauteur	m
L	Longueur du capteur	m
I	Rayonnement solaire	$W.m^{-2}$
T	Température	K
T _a	Température ambiante	K
T ₀	Température de référence	K
P	Pression	Pa
P _{atm}	Pression atmosphérique	Pa
h _a	Coefficient de transfert thermique avec l'extérieur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
G	La gravité	$m.s^{-2}$
V _{vent}	Vitesse du vent	$m.s^{-1}$
t	Temps	s
u	La vitesse axiale	$m.s^{-1}$
V	La vitesse radiale	$m.s^{-1}$

Lettres grecques

Symboles	Désignation	Unité
ρ	La masse volumique	$kg.m^{-3}$
ρ_p	Masse volumique du polystyrène	$kg.m^{-3}$
ρ_c	Masse volumique du cuivre	$kg.m^{-3}$
ρ_A	Masse volumique de l'aluminium	$kg.m^{-3}$
ρ_{Ai}	Masse volumique de l'acier inoxydable	$kg.m^{-3}$
λ_v	Conductivité thermique de verre	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_p	Conductivité thermique du polystyrène	$W.m^{-2}.K^{-1}$
λ_c	Conductivité thermique du cuivre	$W.m^{-2}.K^{-1}$
λ_A	Conductivité thermique de l'aluminium	$W.m^{-2}.K^{-1}$
λ_{Ai}	Conductivité thermique de l'acier inoxydable	$W.m^{-2}.K^{-1}$
C_v	Conductivité thermique de verre	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_p	Conductivité thermique du polystyrène	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_c	Conductivité thermique du cuivre	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_A	Conductivité thermique de l'aluminium	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_{Ai}	Conductivité thermique de l'acier inoxydable	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
β	Coefficient d'expansion thermique	K^{-1}

Liste des figures

Figure 1.1 les composants principaux d'un capteur solaire à air.	4
Figure 1.2 Classification des capteur solaires à air.	5
Figure 1.3 Capteurs à absorbeur à perméable.	6
Figure 1.4 Capteurs à absorbeur à géométrie variable.	6
Figure 1.5 Ecoulements de l'air dans les capteurs solaires.	7
Figure 2.1 Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente.....	11
Figure 2.2 Classification des matériaux a changement de phase.	12
Figure 2.3 Chauffage passif par intégration de MCP dans les murs (A), le sol (B), le plafond (C) et le toit (D). (La couche verte est MCP) [39].....	16
Figure 2.4 Capsule MCP pour revêtements textiles.	17
Figure 2.5 Capsule MCP pour fibres textiles.	17
Figure 2.6 MCP microencapsulé utilisé pendant la cryochirurgie.	19
Figure 3.1 Schéma du capteur solaire à air sans MCP.	23
Figure 3.2 Schéma du capteur solaire avec les deux cas d'intégration du MCP.....	23
Figure 3.3 Variation de la température ambiante en fonction du temps.	28
Figure 3.4 Variation de l'intensité solaire en fonction du temps.	29
Figure 3.5 Schéma du maillage du modèle physique adopté.	31
Figure 4.1 Températures du canal d'air pour différents maillages.	34
Figure 4.2 Température à la sortie pour le cas couche plate.	35
Figure 4.3 Température du canal d'air pour le cas couche plate après couché de soleil.	36
Figure 4.4 Température à la sortie pour le cas cylindre ondulée.	37
Figure 4.5 Vecteurs de vitesse à la sortie.	37
Figure 4.6 Contour de température à la sortie.....	38
Figure 4.7 Température du canal d'air pour le cas cylindre ondulée.....	39
Figure 4.8 Température du canal d'air des deux cas avec MCP Wax après couché de soleil.	40
Figure 4.9 Fraction de liquide du MCP dans cylindrique ondulée.....	40
Figure 4.10 Contour de Fraction de Paraffine Wax dans cylindrique ondulée (t=16 :10 h).	41
Figure 4.11 Variation de température du MCP dans l'canal a 'air (t=13 :00 h).	42
Figure 4.12 Emplacement des MCPs dans le cas mixte.....	42
Figure 4.13 Fraction de liquide des MCPs en cas d'utiliser trois MCP différents.....	43
Figure 4.14 Température à la sortie du canal dans le cas mixte et le cas wax.	44
Figure 4.15 Contour de température en cas d'utiliser trois MCP différents dans un cylindrique ondulée (t=16 :10 h).	44
Figure 4.16 Contours de la fraction liquide à différents moments de la journée en cas d'utiliser trois MCP différents.	45

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Dimensions géométriques du capteur solaire	23
Tableau 3.2 Propriétés thermo-physiques des différents composants du capteur [61, 62]	24
Tableau 3.3 Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations[63-66]	24
Tableau 4.1 Caractéristiques des différents maillages	34

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis l'Antiquité, l'énergie est le moteur des activités humaines. C'est un élément qui intervient dans tous les comportements humains quotidiens. L'énergie joue un rôle de premier plan dans le confort d'un pays et joue un rôle important dans le développement de la technologie, de l'industrie, de l'économie et de la société.

Sur terre, l'énergie solaire est à l'origine des cycles de l'eau, du vent et de la photosynthèse dans le règne végétal. Le règne animal, y compris les humains, dépend des plantes sur lesquelles reposent toutes les chaînes alimentaires. Par conséquent, l'énergie solaire est la source de toutes les formes d'énergie utilisées sur la terre aujourd'hui, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. Les humains utilisent l'énergie solaire pour la convertir en d'autres formes d'énergie: énergie chimique (nourriture utilisée par notre corps), énergie cinétique, énergie thermique et énergie électrique [1].

Le capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. Le capteur solaire récupère l'énergie envoyée par le soleil sous forme de chaleur (rayonnement) pour la transmettre à un élément caloporteur (air ou eau). Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considérée, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre [2].

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a fait le point d'intérêt de plusieurs travaux de recherches ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines notamment pour éviter le problème de l'intermittence des capteurs solaires.

Dans ce mémoire, nous présentons une étude numérique pour évaluer les performances thermiques des capteurs solaires à air avec intégration des matériaux à changement de phase (MCP). La simulation est réalisée par la méthode des volumes finis implémentée sur le code de calcul CFD "Fluent" utilisant un régime instationnaire, afin qu'il puisse être au plus près de la situation réelle. Des MCP avec différentes propriétés physiques sont placés dans le canal d'air sous deux différentes géométries (couche plate / couche cylindrique ondulée) pour stocker l'énergie solaire afin qu'elle puisse être utilisée pendant des heures avec peu ou pas de soleil.

La rédaction du présent mémoire a été structurée en une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion. Le premier chapitre est consacré à présenter les capteurs solaires à air avec une explication des rôles du capteur, passant aux différents types des capteurs et leurs domaines d'application. Le second chapitre étudie le stockage de l'énergie thermique sous différentes formes basant sur le stockage par la chaleur latente (matériaux à changement de phase) ainsi que la classification des MCP et leurs différentes formes disponibles. La présentation du domaine d'étude ainsi que les différentes équations qui modélisent mathématiquement le comportement thermique du capteur solaire à étudier sont présentées dans le troisième chapitre. Dans le quatrième et dernier chapitre, les résultats de simulation obtenus sont regroupés en deux parties, la première concerne le capteur solaire avant l'intégration du stockage par MCP et le deuxième fait ressortir l'effet de différentes géométries (couche plate / cylindrique ondulé) ainsi que différentes natures de MCP. En fin une conclusion générale fait état des principaux résultats obtenus confrontés à la problématique.

Chapitre 01

Capteurs solaires

Chapitre 1 : Capteurs solaires

1.1. Définition

Le capteur solaire à air, convertit l'énergie d'irradiation solaire en énergie thermique pour les fluides (l'air, MCP, ...etc.) dans les applications solaires thermiques. Pour les applications solaires thermiques, l'irradiation solaire est absorbée par un collecteur solaire sous forme de chaleur qui est ensuite transférée dans le fluide de travail (air, eau ou huile) [3, 4]. La chaleur transportée par le fluide de travail peut être utilisée soit pour fournir de l'eau chaude domestique/ chauffage, soit pour charger un réservoir de stockage d'énergie thermique à partir duquel la chaleur peut être absorbée pour une utilisation ultérieure (la nuit ou les jours nuageux) [5]. La Figure 1.1 ci-dessous présente les composants principaux d'un capteur solaire à air.

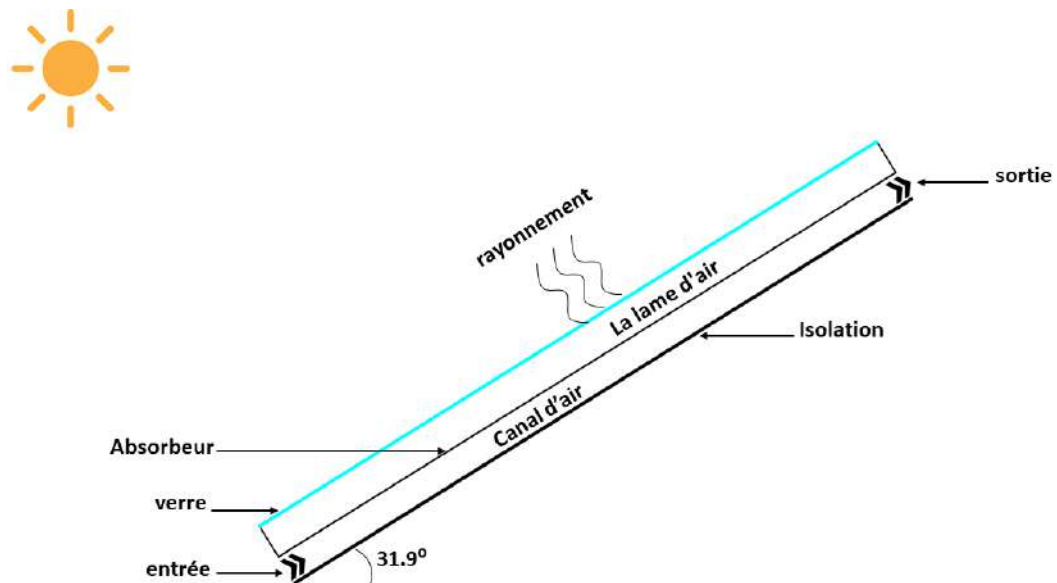


Figure 1.1 les composants principaux d'un capteur solaire à air.

1.2. Classification des capteurs solaires à air

Les Capteur solaire à air peuvent être utilisés à de nombreuses applications, y compris le séchage des produits ou bien le chauffage de d'habitat. Il est difficile de classer les capteurs solaires à air de manière appropriée. Il existe un grand nombre de configurations et beaucoup d'entre elles sont des constructions empiriques. On peut les classer selon le mode de fonctionnement en actif, hybride et passif. Ekechukwu et Norton [6] ont fait un examen complet des divers principes de conception, de construction et d'exploitation d'une grande variété des capteurs solaire pour le séchage. Ici, nous essayons de classer le réchauffeur solaire sur la base du stockage de l'énergie

(Figure 1.2), le nombre de couvertures, la surface étendue et leur axe de suivi. L'air chaud est généré à différents endroits et le diriger vers l'utilisation dans les systèmes de chauffage solaire actif de l'air, mais il peut être plus coûteux à construire par rapport [6-8].

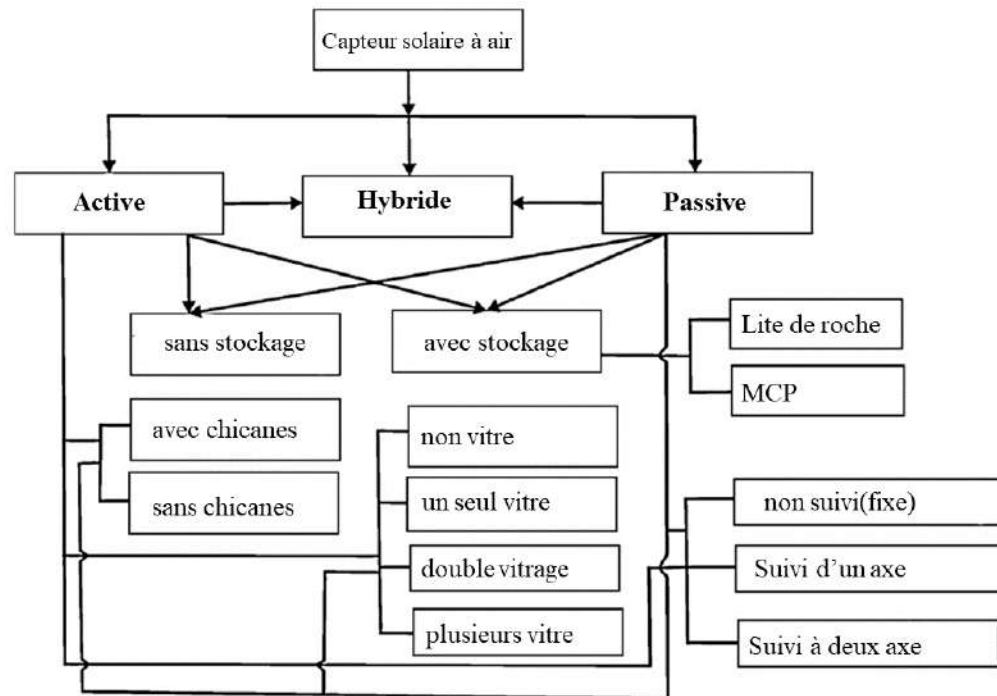


Figure 1.2 Classification des capteurs solaires à air.

1.3. Différents types des capteurs solaires à air

On peut regrouper les types des capteurs solaires plans à air en trois grandes classes :

- Les capteurs à absorbeur perméable.
- Les capteurs à absorbeur à géométrie variable.
- Les capteurs à absorbeur plan.

1.3.1 Les capteurs à absorbeur perméable

Dans ce type, l'absorbeur est une matrice perméable (voir la Figure 1.3). Ainsi l'énergie solaire incidente pénètre dans la masse de l'absorbeur. Le capteur à absorbeur perméable se compose toujours d'un caisson isolé, l'air pénètre dans l'espace, vitre et absorbeur où il commence à s'échauffer par convection sous le vitrage. Ensuite l'air continue de s'échauffer par passage dans la matrice absorbante.

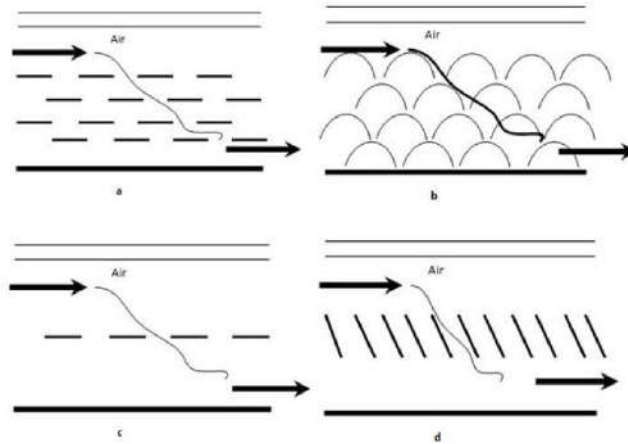


Figure 1.3 Capteurs à absorbeur à perméable.

1.3.2 Capteur à absorbeur à géométrie variable

Ces capteurs se présentent sous de nombreuses variantes, l'idée présidant à ces variantes consiste à jouer sur la géométrie de l'absorbeur, de façon à augmenter la surface d'échange (voir la Figure 1.4).

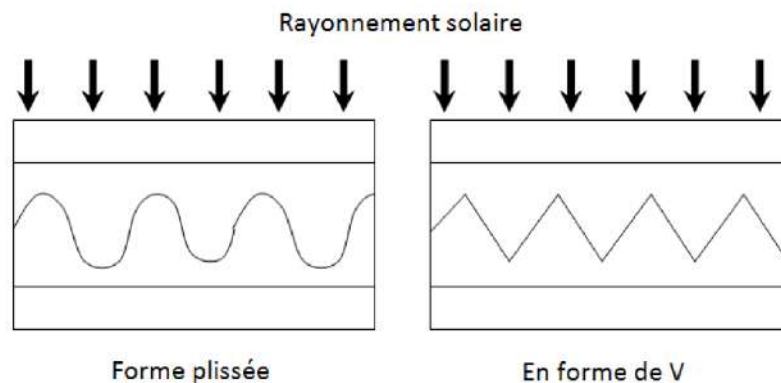


Figure 1.4 Capteurs à absorbeur à géométrie variable.

1.3.3 Capteur solaire à absorbeur plan

Comme son nom l'indique, l'absorbeur est une tôle plane. La différence entre ces capteurs réside dans le nombre de vitrage utilisés et dans le type d'écoulement de l'air dans ces capteurs.

Plusieurs types d'écoulement d'air sont envisageables dans ce genre de capteur :

- Ecoulement dessus de l'absorbeur [9, 10]
- Ecoulement au-dessous de l'absorbeur [11]
- Ecoulement des deux côtés de l'absorbeur [12].

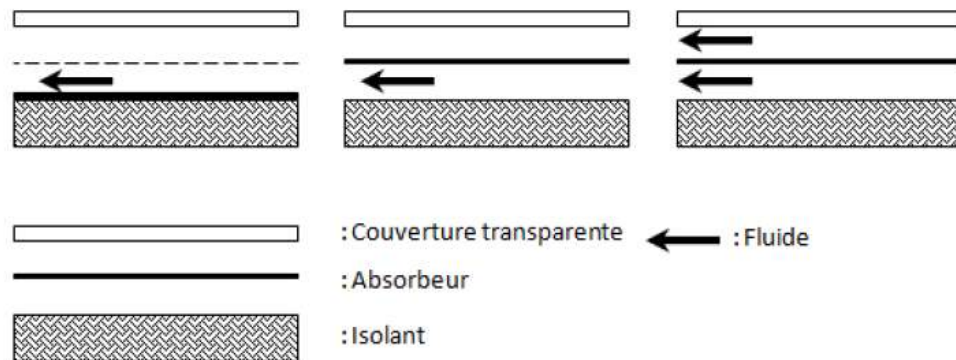


Figure 1.5 Ecoulements de l'air dans les capteurs solaires.

1.4. Principe de fonctionnement du capteur solaire à air

Un capteur solaire à air a pour rôle de convertir l'énergie solaire incidente en une énergie thermique à basses et moyennes températures et de la transférer à l'air qui la traverse. Sa technologie repose sur le pouvoir absorbant d'une surface sélective ou non sélective (absorbeur). En absorbant les rayons solaires, l'absorbeur cède à l'air une partie de cette énergie reçue, et réémet une autre partie dans l'infrarouge. Le meilleur absorbeur est donc une surface fortement absorbante dans le visible et faiblement émissive dans l'infrarouge.

Une couverture alvéolée en polycarbonate est placée au-dessus de l'absorbeur. Celle-ci est transparente aux rayonnements solaires visibles et opaque à l'infrarouge qu'elle absorbe et réémet vers l'absorbeur. Elle permet de piéger les rayonnements entre ce dernier et la couverture et d'augmenter ainsi la température de l'absorbeur. C'est ce qu'on appelle 'effet de serre'. Pour ce qui est de l'isolant latéral et arrière, elle est assurée par des parois recouvertes d'isolants thermiques. Les échanges thermiques entre les constituants du capteur peuvent avoir lieu

convection, conduction et rayonnement. Deux types de paramètres de fonctionnement, intérieurs et extérieurs au système, interviennent dans son fonctionnement [12].

1.5. Domaines d'application des capteurs

À travers le monde, la grande majorité des installations des capteurs solaires sont utilisées pour produire de l'eau chaude sanitaire pour des maisons individuelles. En fin 2012, 78 % des installations en services étaient dédiées à cet usage.

Les capteurs solaires sont aussi utilisés pour des systèmes combinés (eau chaude sanitaire et chauffage de bâtiment), pour le chauffage de piscines, pour des centrales de chauffage solaire, pour des procédés industriels ou encore pour de la climatisation solaire ainsi que le séchage des produits agroalimentaires et biologique [11, 13].

Le séchage, opération importante dans toute transformation de produits issus l'industrie agro-alimentaire [14], est un procédé très énergivore. Cela explique le recours de plus en plus fréquent aux énergies renouvelables et principalement l'énergie solaire par l'utilisation des séchoirs solaires direct [15, 16] ou bien indirect [17, 18]. Le capteur solaire est un des principaux composants du séchoir solaire type indirect, donc l'amélioration des performances du capteur sert directement à minimiser la durée et le cout des opérations de séchage [19].

Chapitre 02

Matériaux à changement de
phase

Chapitre 2 : Matériaux à changement de phase

2.1. Introduction

En raison de l'augmentation rapide du taux de population, une grande quantité d'énergie est utilisée. A quelques jours des grands enjeux mondiaux comme la crise énergétique et les enjeux environnementaux. Le MCP peut aider à stocker l'excès d'énergie pour une utilisation future. La demande d'énergie change quotidiennement, hebdomadairement et saisonnièrement, la gestion de l'énergie devient donc très importante. Avec l'aide du MCP, le stockage d'énergie thermique peut être fourni, car la chaleur latente et la chaleur sensible deviennent plus importantes pour la gestion de l'énergie. L'utilisation du MCP dans le stockage d'énergie thermique peut fournir une bonne solution pour améliorer l'efficacité du stockage. Cette énergie stockée peut être utilisée dans de nombreux ménages et secteurs industriels [20-23].

Par rapport au volume relativement petit de l'unité de stockage, le MCP avec une grande enthalpie de fusion peut stocker et transférer une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latente lors de la fusion et de la solidification. Pour une application donnée, la température de transition de phase doit se situer dans la plage de température de fonctionnement. Les matériaux à changement de phase nécessitent une conductivité thermique élevée pour effectuer efficacement le transfert de chaleur à changement de phase afin d'éliminer la séparation irréversible de leurs composants [24].

2.2. Méthodes de stockage d'énergie thermique

Le stockage de l'énergie thermique pourrait se faire par refroidissement, chauffage, fusion, solidification ; vaporiser un matériau lorsque le processus est inversé, de l'énergie sera disponible. Les méthodes de stockage d'énergie thermique sont données ci-dessous :

2.2.1 Stockage par chaleur sensible

Dans ce système, l'énergie peut être stockée ou retirée en augmentant ou en abaissant la température d'un liquide ou d'un solide et aucun changement de phase ne se produit pendant ce processus. L'exécution du stockage d'énergie thermique est spécifiée par la capacité de stockage, le taux d'entrée de chaleur et le taux de sortie pendant la charge et le déchargement et l'efficacité du stockage [25].

2.2.2 Stockage par chaleur latente

C'est la méthode la plus efficace pour stocker l'énergie thermique. Dans ce système de stockage, lorsque la chaleur est donnée au matériau, il transforme sa phase de solide en liquide en captant la chaleur sous forme de chaleur latente de fusion et de chaleur latente de vaporisation pendant la transformation de phase liquide en phase vapeur [25].

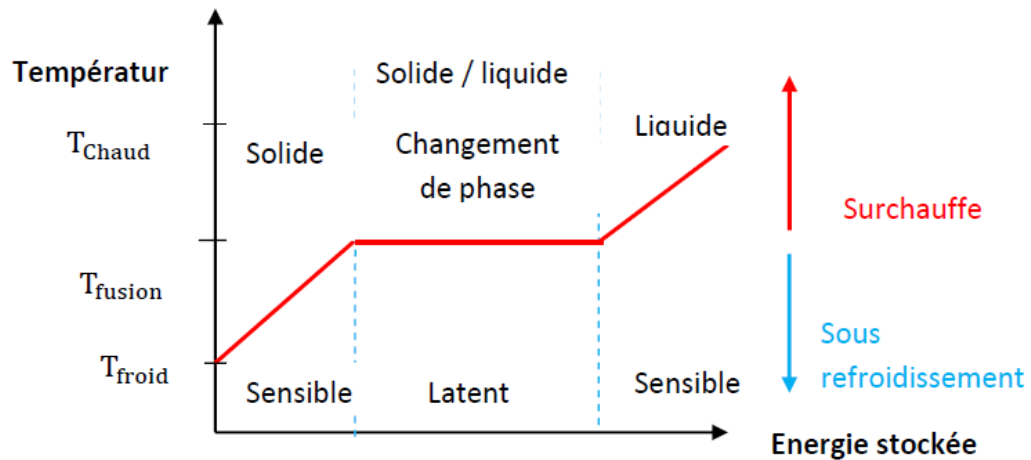


Figure 2.1 Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente.

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi :

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface du MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse[26].

2.2.3 Matériaux à changement de phase

Lorsqu'un matériau passe d'un état physique à un autre, un changement de phase se produit. Par exemple, la fusion définit la transition du solide au liquide, ou la vaporisation indique la transition du liquide au gaz. Ce changement se produit lorsque le matériau atteint une certaine température. L'exemple le plus connu est celui de l'eau qui passe du solide au liquide (fondu) à 0 ° C. Pendant ce changement de phase, le matériau stocke de l'énergie (sous forme de chaleur) à une température stable jusqu'à ce que le changement de phase soit terminé. Pour MCP, ce principe est utilisé.

Le MCP considéré pour une utilisation dans les bâtiments est un matériau qui change son état physique dans une plage de température restreinte de 18 à 28 ° C basée sur le MCP. Ces températures sont les plus utiles dans la vie quotidienne (climatisation, chauffage, etc.). Le changement de phase utilisé sera défini en fonction de l'application [27]. La figure (2.2) présente le type de MCP.

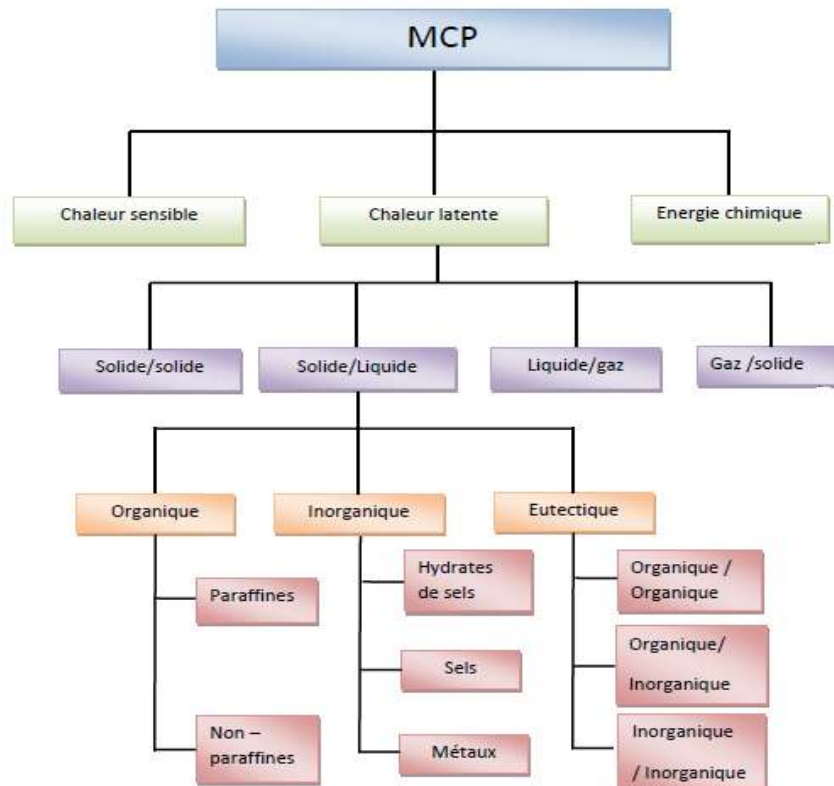


Figure 2.2 Classification des matériaux à changement de phase.

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux

2.2.3.1 Les MCP Organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables[28].

a. La paraffine

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes composés de chaînes de n - atomes de carbone auxquels sont attachés $2n+2$ atomes d'hydrogène (C_nH_{2n+2}). La paraffine la plus simple est le méthane (CH_4). Sa température d'ébullition est très basse : $-162^\circ C$. C'est le constituant principal du gaz naturel [28].

b. Non paraffine

Les non-paraffines sont les plus abondants matériaux de changement de phase ayant des propriétés très différentes. Ces matières organiques ont d'autres sous-groupes d'acides gras et autres composés organiques non paraffinés tels que les esters, alcools, glycols, etc [28].

2.2.3.2 Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre $-100^\circ C$ et $+1000^\circ C$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion $0^\circ C$), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à $0^\circ C$), des sels hydratés (température de fusion comprise entre $5^\circ C$ et $130^\circ C$), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à $150^\circ C$). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les

problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables[28].

2.2.3.3 Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique, organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels[28].

2.2.4 Comment choisir un MCP ?

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [29]:

➤ **Considérations thermiques**

- Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.
- La valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ / kg pour être compétitif).
- Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage. (Si le cas d'un MCP liquide/Gaz)

➤ **Propriétés physiques**

- Un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.
- Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.
- Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.

- **Considérations cinétiques**
 - Des cinétiques de charge et de décharge rapides.
 - Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.
- **Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux**
 - Stabilité du corps lors des cycles thermiques.
 - Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.
- **Considérations chimiques**
 - Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température.
 - Un bon taux de cristallisation et ininflammabilité et non-toxicité.
- **Considérations économiques**
 - Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

2.3. Les applications des matériaux à changement de phase pour le stockage d'énergie

Le MCP est utilisé dans de nombreuses industries, telles que le textile, l'automobile, la construction et l'installation solaire. Ces dernières années, nombre de ses applications se multiplient, notamment les industries électroniques et pharmaceutiques utilisées dans les industries traditionnelles, telles que l'industrie de la construction, les dispositifs avancés de stockage d'énergie thermique pour les textiles et les matériaux biologiques à température réglable[30-32].

2.3.1 Stockage thermique dans les bâtiments

Les systèmes de stockage d'énergie thermique utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) offrent la possibilité de stocker efficacement l'énergie pour une utilisation ultérieure. La densité énergétique élevée des MCP et leurs performances isothermes les rendent adaptés aux applications du bâtiment [33]. En général, l'analyse énergétique des bâtiments intégrés au MCP dépend fortement du point de fusion, des propriétés thermiques, de l'emplacement et du montant du MCP incorporé dans le bâtiment, ainsi que de l'état climatique et de la conception du bâtiment [34]. Habituellement, le confort thermique est de l'ordre de 22 C et 27 C en été et 18 C et 25 C en hiver [35]. Par conséquent, pour répondre au confort thermique du secteur du bâtiment, le PCM choisi doit avoir une température de fusion de 18 C et 27 C [36]. Les MCP peuvent être intégrés dans les bâtiments de manière passive [37] ou active [38]. Dans la méthode passive, le MCP est intégré dans les matériaux de construction des bâtiments, tels que les plaques de plâtre, le gypse ou le

béton, sans nécessiter aucun équipement auxiliaire pour fonctionner. Les applications typiques d'un système de stockage thermique passif (PTSS) comprennent l'intégration de MCP dans les tissus de construction des murs, des sols et des toits (Fig. 2.3). De plus, ils peuvent également être intégrés dans les systèmes de fenestration, d'isolation, de façade, de volets roulants et d'ombrage [39]. De nombreuses études montrent que l'application du PTSS dans les bâtiments a considérablement réduit leur consommation d'énergie et amélioré le confort thermique intérieur.

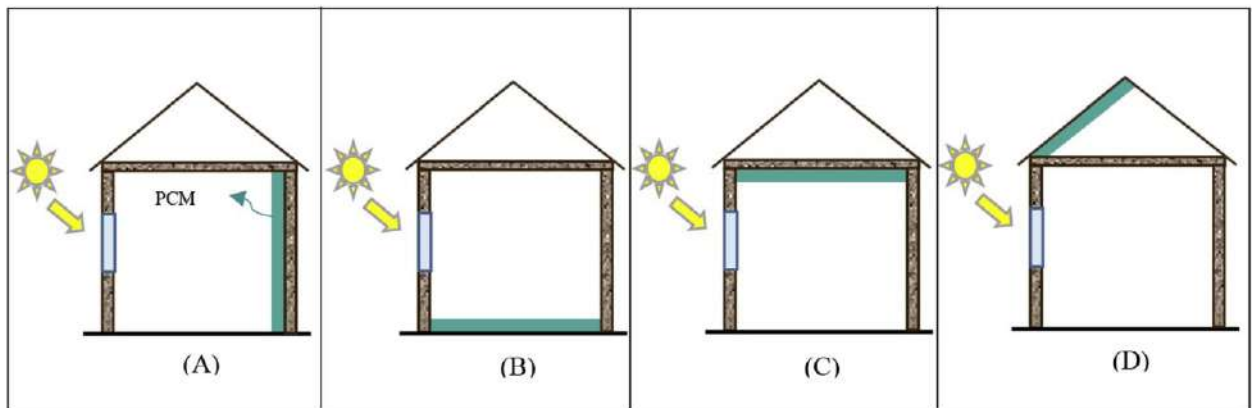


Figure 2.3 Chauffage passif par intégration de MCP dans les murs (A), le sol (B), le plafond (C) et le toit (D). (La couche verte est MCP) [39].

2.3.2 Chauffage et refroidissement de l'eau

Cabega et coll[40]. Ont étudié un ballon d'eau chaude avec couche entretenant un module MCP contenant de nombreux cylindres. Une poudre MCP était sous l'expérience qui résulte de l'introduction du MCP module dans le réservoir d'eau peut fournir de l'eau chaude pendant une longue durée de temps hors fourniture d'énergie extrinsèque. Sole et al [41] avaient fait un test de charge avec différentes décharges d'eau et d'eau MCP Char. En utilisant une petite quantité de MCP dans le réservoir MCP, un supplément l'énergie capturée était de 3%. L'auteur a également étudié l'utilisation du module MCP dans le ballon d'eau chaude sanitaire. L'auteur a effectué un test dans dont 81% en poids de paraffine et d'acide gras dissemblable comme (Acides stéariques, acide palmitique) comme MCP, au cours des expériences, il a été noté que la température de 14 à 36 L d'eau dans le réservoir d'eau chaude a été augmenté de 3 C à 4 C avec l'utilisation de 3 kg de MCP et il a été noté dans les 10 à 15 min. Les meilleurs résultats ont été associés avec des acides stéariques MCP.

2.3.3 Industries textiles

Pour de meilleures performances de contrôle des caractéristiques thermiques des combinaisons spatiales, des vêtements en tissu, la NASA en 1980 a fait une technologie pour utiliser la microcapsule MCP dans les fibres. Pour minimiser l'influence de la différence de température maximale subie par les astronautes au moment de la mission spatiale ils utilisaient un MCP par exemple nonadécane ont été encapsulés dans du textile. Vigo et Frost[42] fabriqué les fibres de contrôle thermique dans un tableau à température variable. Cela a été fait en combinant des fibres creuses avec une solution MCP comme solution humide de sel inorganique hydraté et P.E.G(polyéthylène glycol) avec de petites molécules poids, après des cycles thermiques répétés, température polyvalente les tissus présentent un mauvais comportement thermique. D'où la microencapsulassions utilisé pour améliorer le comportement thermique des fibres thermorégulatrices. La capsule MCP pour les fibres textiles et les revêtements en tissu est illustrée à la (Fig.2.4 et Fig.2.5).

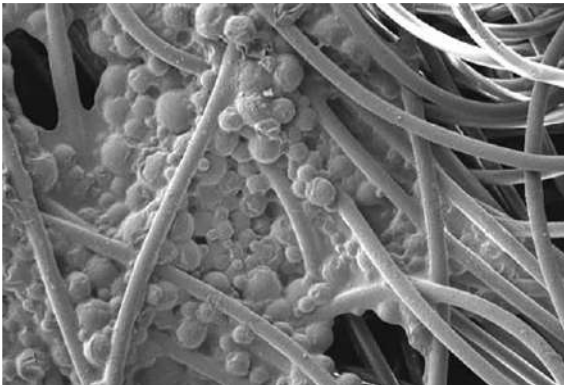


Figure 2.4 Capsule MCP pour revêtements textiles.

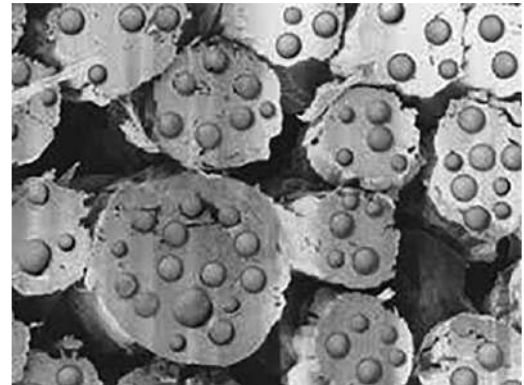


Figure 2.5 Capsule MCP pour fibres textiles.

Certaines applications sont comme des couvertures, des couettes, des matelas, des oreillers et les vêtements d'extérieur, le MCP avec du textile peut arrêter la surchauffe. Avant l'extrusion de fibres en ajoutant des MEPCM à la solution de polymère une propriété de régulation thermique peut être donnée aux fibres. Shin et coll.[43] fait microcapsules de mélamine formaldéhyde avec C20H42 (eicosane) mélangé avec des tissus tricotés en polyester par un processus de séchage à sec pour faire matière textile de régulation de la chaleur, après cinq nettoyage à sec, le tissu garde 45% de leur capacité de stockage d'énergie. Wang et al [44] ont discuté de la effet du MCP sur les

vêtements de protection contre la chaleur et a noté que les vêtements la collecte avec MCP a utilisé 30% d'énergie électrique en moins en comparaison avec assemblage de vêtements sans MCP.

Un autre MCP fait comme P. E.G fibres ultrafines / composites cellulosiques par électro-filage. C'était vu que P.E.G (polyéthylène glycol) était séparé en surface et à l'intérieur du noyau des fibres. Sarier et coll. [45] ont enquêté sur de nombreux les microcapsules MCP ou les cires de paraffine sont sans utilisation de mélange, trouvé une amélioration de la capacité thermique des tissus. Rothmair et coll. [46] ont étudié des composites à trois couches fabriqués à partir de deux imperméables et membrane à vapeur d'eau avec corps en tissu hydrophile la température évapore l'eau à l'intérieur du tissu pour le refroidissement objectif. Sanchez et coll. [47] ont étudié l'application textile à l'usage de microcapsule de polystyrène soignant la cire de paraffine synthétisée par procédure de polymérisation. Shin et coll. [48] avec l'aide de Méthode de sérigraphie par points dans laquelle le coton teint à l'indigo naturel tissus en introduisant une microcapsule contenant du n-octadécane et n-eicosane, après 20 cycles de nettoyage à sec, il retient 94% de la chaleur latente capacité et après le test de frottement L.H.C (capacité de chaleur latente) était conserver 70 à 89% et 92 à 96% après le test de repassage avec une housse en tissu. Izzo Renzi et coll. [49] ont découvert un revêtement de liant polymère MCP microencapsulé réalisé sur du cuir naturel pour donnent des propriétés de régulation de la chaleur aux consommateurs orientés vers le sport. Microcapsules amélioré la répliation thermique du cuir partout chauffage ou refroidissement. Oliveira et coll. [50] ont étudié l'effet du diélectrique traitement plasma à débit barrière sur adhérence de microcapsule MCP au tissu de laine. Un résultat intéressant est apparu tel qu'augmentation de l'énergie de surface et de l'adhérence du tissu de laine, également hydrophilie accrue.

2.3.4 Biomédical et biomatériau

Maintenant, un jour pour de nombreuses applications biomédicales telles que bandage ou pansement pour les brûlures MCP notre récemment observé comme bon matériau, P.E.G est des tissus traités (polyéthylène glycol) ayant un liquide les propriétés de transport et antibactériennes peuvent être utilisées pour le biomédical applications telles que les gazes chirurgicales, les couches et l'incontinence des produits. Textile thermo régulé avec MCP ayant la capacité de maintenir la température à l'intérieur de la plage désirée afin qu'elle puisse être utilisée comme pansement et thérapies thermo-froides. L'alliage moléculaire est un matériau pour le stockage d'énergie

thermique ayant une chaleur latente de fusion élevée. Mondieig et coll. [51] ont discuté d'une application de l'alliage moléculaire dans applications biomédicales telles que l'alliage de matériau MCP utilisé en double emballage de poche à paroi pour la protection thermique du sang pendant la situation polymérisation de la température maximale du (poly méthacrylate de méthyle : **P.M.M.A**) généré et il peut être réduit par MCP et cela peut être utilisé comme composites de ciment osseux. MCP a une bonne régulation thermique propriétés cela a été discuté par DE Santis [52]. C'est très important pour réguler la chaleur pendant le changement de phase de P.M.M.A (poly méthacrylate de méthyle) / MCP pour le ciment osseux inséré et la polymérisation in situ grâce à augmentation de la température pendant la réaction exothermique matière injectée peut entraîner la mort de la plupart des tissus hôtes voisins. MCP à base de paraffine micro-capsulée introduite dans la matrice P.M.M.A (poly méthacrylate de méthyle) pour améliorer les caractéristiques thermomécaniques. Température de pointe peut être diminué pendant la réaction exothermique en introduisant MCP dans le ciment. Pielichowska et coll. [53] ont discuté de l'application de MCP à base de P.E.G (polyéthylène glycol) pour réduire la température de polymérisation maximale dans le ciment osseux acrylique sans affecter les propriétés mécaniques de ciment, le MCP à base de P.E.G (polyéthylène glycol) peut diminuer la polymérisation du ciment température de 67 ° C à 45 ° C. MCP microencapsulé utilisé pendant la cryochirurgie, il a été noté que les tissus sains autour de la tumeur cancéreuse était thermiquement protégé et ce fascinant une réflexion a été donnée par LV et al. [54]. Le MCP microencapsulé ayant une grande chaleur latente et une conductivité thermique moindre peut sauver le tissu de santé en absorbant l'énergie par la chaleur latente comme indiqué sur la (Fig2.6).

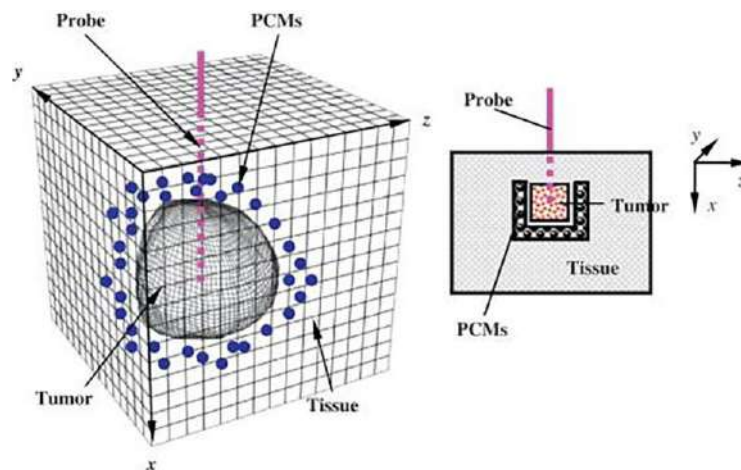


Figure 2.6 MCP microencapsulé utilisé pendant la cryochirurgie.

2.3.5 Stockage d'énergie solaire

L'aérotherme solaire avec système de stockage thermique basé sur MCP est la collecte de l'énergie solaire en dehors des heures de soleil. Une phase le matériau de changement est un solide et fondu qui stocke de l'énergie. Le la température de fusion peut être fixe ou peut varier sur une petite plage. L'énergie stockée est récupérée lors de la solidification du liquide. Dans ce système, l'énergie solaire stockée dans le système de stockage d'énergie thermique (TESS), pendant les jours ensoleillés et récupéré plus tard dans la nuit ou pendant jours nuageux. Différents matériaux à changement de phase (MCP) sont disponibles pour cette plage de température, généralement des sels hydratés (comme le calcium chlorure hexahydraté, sel de Glauber), paraffines, non paraffines et les acides gras [55-58] sont des matériaux très populaires.

Jurinak et Abdel-Khalik [59] ont présenté une analyse paramétrique étude pour déterminer les propriétés physiques optimales du changement de phase matériaux de stockage d'énergie pour les systèmes de chauffage solaire de l'air. Ils utilisé des techniques de simulation pour déterminer les performances du système pendant toute la saison de chauffage pour différentes charges de chauffage. Ils [60] ont également décrit le comportement transitoire de l'énergie de changement de phase unités de stockage (PCES) et présentation des techniques de simulation à utiliser en conjonction avec ces modèles pour déterminer les performances des systèmes de chauffage solaire utilisant (PCES). Ils ont utilisé du sulfate de sodium décabydrate et cire de paraffine comme support de stockage pour le système de chauffage de l'air et calculé des plages optimales de tailles de stockage, la variation de la fraction de charge fournie par l'énergie solaire avec taille de stockage et capteur zone pour les systèmes.

Chapitre 03

Présentation du problème

Physique

Chapitre 3 : Présentation du problème Physique

3.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le modèle physique adopté pour les différentes simulations qui seront détaillées dans le chapitre résultat et discussion. Il s'agit d'un capteur solaire à air dont nous étudierons les performances thermiques en considérant les cas sans et avec utilisation d'une couche de MCP. La configuration géométrique du capteur, les propriétés thermo-physiques de ses composants ainsi que les conditions aux limites adoptées seront exposées dans les paragraphes suivants. Ce chapitre sera achevé par une courte présentation des différentes étapes relatives à la mise en-œuvre du problème sur le logiciel CFD Fluent, utilisé pour la résolution numérique des équations gouvernantes.

3.2. Géométrie du problème

Dans notre étude, on s'intéresse au capteur solaire à air qui se compose d'un vitrage simple de 5mm d'épaisseur, de surface inclinée, L'absorbeur en tôle d'aluminium d'épaisseur 0.4 mm peints en noire mate de dimension 2m×1m. L'isolation thermique est en polystyrène pour notre cas on a utilisé du polystyrène au-dessus du contreplaqué et sur les parties latérales du 3 cm d'épaisseur. La distance entre l'absorbeur et le vitrage est de 5cm. Le capteur est supposé comme une cavité inclinée avec $\theta = 31.9^\circ$.

Cette géométrie a été utiliser, pour 1) analyser les phénomènes convectifs et conductifs qui se passent au sein de canal d'air, 2) étudier l'effet d'ajouter d'un MCP et la différence de MCP, 3) ensuite différentes géométries ont été simulé afin de sélectionner le meilleur MCP, la meilleure géométrie, et le meilleur emplacement. Les dimensions géométriques du problème sont présentées sur le Tableau 3.1. la Figure 3.2 décrire les deux formes à étudier (couche plate / cylindrique ondulé).

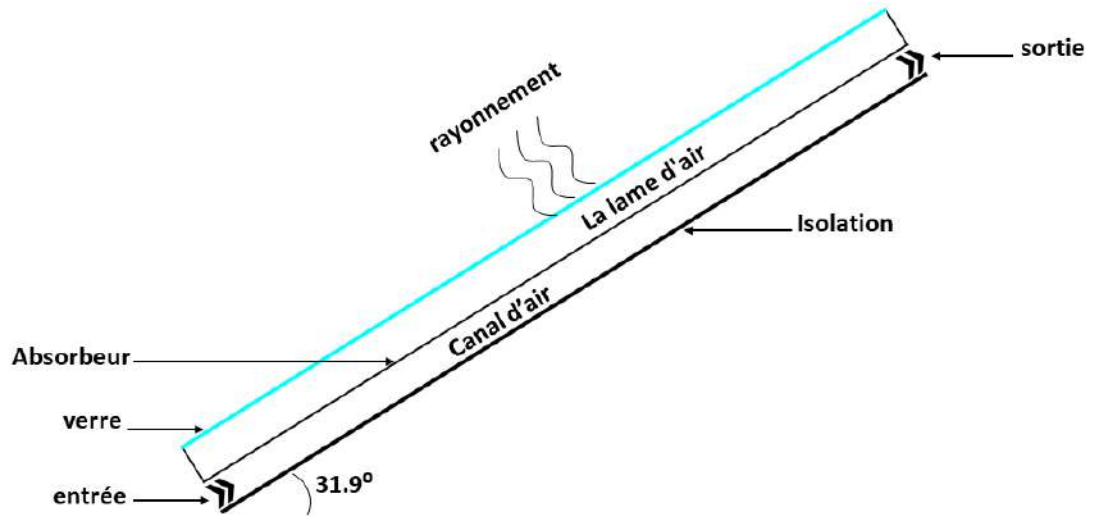


Figure 3.1 Schéma du capteur solaire à air sans MCP.

Tableau 3.1 Dimensions géométriques du capteur solaire

Dimension	Valeurs [m]
Largeur du capteur	1
Langueur du capteur	2
Epaisseur de l'isolation	0.03
Epaisseur du vitrage	0.005
Epaisseur de l'absorbeur	0.0004
Hauteur de la lame d'air	0.05
Hauteur de canal d'air	0.05

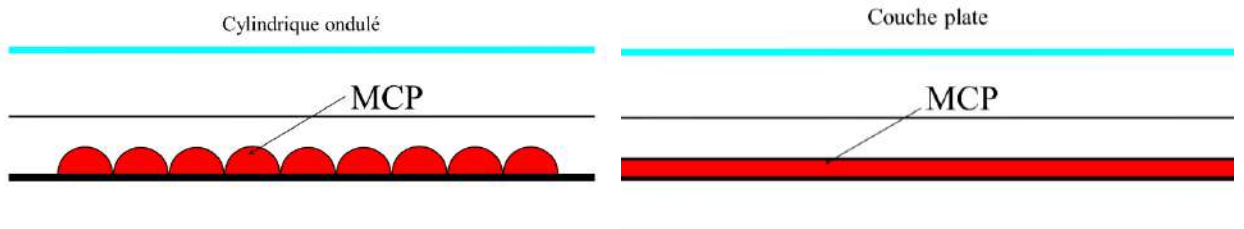


Figure 3.2 Schéma du capteur solaire avec les deux cas d'intégration du MCP.

3.3. Propriétés thermo-physiques

Les propriétés thermo-physiques des éléments constituant le capteur plan ainsi que les propriétés des matériaux MCP à envisager dans cette étude, sont exposées dans les Tableau 3.2 et Tableau 3.3 ci-dessous.

Tableau 3.2 Propriétés thermo-physiques des différents composants du capteur [61, 62]

Matériaux	Propriétés physiques					
	Masse volumique		Conductivité thermique		Chaleur spécifique	
	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs
Verre	ρv	2500	λv	0.81	Cv	840
Polystyrène	ρp	700	λp	0.320	Cp	2310
Aluminium	ρA	2719	λA	202.4	CA	871

Tableau 3.3 Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations[63-66]

MCP	Les propriétés Thermo-physiques					
	Température de solidus/liquidus [K]	Chaleur Latente [KJ/Kg]	Densité [Kg/m ³]	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur spécifique [j/kg.K]	Coefficient de dilatation thermique[L/Kg]
Paraffine RT58	321/335	180	840	0.2	2100	0.00011
Paraffine RT42	311/316	174	760	0.2	2000	0.0008
Paraffine wax	326.5	266	780	0.21	2500	0.00010

3.4. Hypothèses simplificatrices

La formulation du problème étudié est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, hypothèses liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transferts et aux problèmes de changement de phase. Afin de permettre une résolution simple et réaliste, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- Le fluide est incompressible.
- Les phases solides et liquide du MCP sont homogènes et isotropies.
- L'écoulement instationnaire en régime turbulence.

- Fluide visqueux newtonien.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide (C_{pf}, λ_f, μ_f) et du solide ($C_{ps}, \rho_s, \lambda_s, \mu_s$) sont considérées constantes.
- Les variations du volume dues au changement de phase sont négligeables.
- Les propriétés physiques sont les mêmes dans les deux phases pour le MCP.
- On utilise d'autre part l'approximation de Boussinesq.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \quad 3.1$$

3.5. Equations gouvernantes

→ *Equation de continuité :*

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad 3.2$$

→ *Equations de quantité de mouvement :*

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_c)\cos\theta \quad 3.3$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_c)\sin\theta \quad 3.4$$

→ *Equation de l'énergie :*

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad 3.5$$

3.6. Conditions initiales et aux limites

➤ *Conditions initiales :*

Initialement, l'air est supposé au repos à la température ambiante.

$$\text{à } t = 0 \quad \begin{cases} u(0, y, 0) = u_{int} \cdot \cos\theta \\ v(0, y, 0) = u_{int} \cdot \sin\theta \\ T = T_a \end{cases} \quad 3.6$$

➤ **Conditions aux limites**

◆ *Aux frontières des parois*

Sur la paroi supérieure :

À $0 \leq x \leq L, y = H$

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T(x, H, t) - T_a) + \varepsilon\sigma(T^4(x, H, t) - T_s^4) + I \quad 3.7$$

La température du ciel est donnée par la formule de Swinbank [67]:

$$T_s = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad 3.8$$

Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation suivante [68] :

$$h_a = 5,7 + 3,8V_{vent} \quad 3.9$$

À $x=0$ et $x=L, Hi+Ha+Hl \leq y \leq H$ (faces latérales de la vitre)

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T_v(t) - T_a) \quad 3.10$$

À $x=0$ et $x=L, Hi \leq y \leq Hi+Ha$ (faces latérales de l'absorbeur)

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a(T_{ar}(t) - T_a) \quad 3.11$$

À $x=0$ et $x=L, 0 \leq y \leq Hi$ (faces latérales de l'isolant)

$$-\lambda_i \frac{dT}{dy} = h_a(T_i(t) - T_a) \quad 3.12$$

À $0 \leq x \leq L, y=0$ (face inférieure de l'isolant)

$$-\lambda_i \frac{dT}{dx} = h_a(T_i(t) - T_a) \quad 3.13$$

➤ **Dans le cas d'utilisation de MCP :**

À $x=0$ et $x=L$, $H_i \leq y \leq H_i + H_{mcp}$ (faces latérales de la couche MCP)

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a (T_{mcp}(t) - T_a) \quad 3.14$$

➤ **A la sortie du capteur :**

À $x=L$, $H_i + H_a \leq y \leq H_i + H_a + H_1$

$$\begin{cases} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{(0,y,t)} = 0 \\ P = P_{atm} \end{cases} \quad 3.15$$

➤ **A L'entrée du capteur**

À $x=0$, $H_i + H_a \leq y \leq H_i + H_a + H_1$

$$\begin{cases} u(0, y, t) = u_{int} \cdot \cos\theta \\ v(0, y, t) = u_{int} \cdot \sin\theta \\ T = T_a \end{cases} \quad 3.16$$

3.7. Equation de la variation de température ambiante en fonction du temps

La Figure 3.3 présente la variation de la température ambiante en fonction du temps pour une journée bien éclairée. Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante :

$$T_{ao}(\tau) = \bar{T}_{ao} + \bar{T}_{ar} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 14)\right) \quad 3.17$$

\bar{T}_{ao} : Température ambiante moyenne = 35°C (valeur relative à la journée 3/05/2015 au site de l'étude)

\bar{T}_{ar} : Amplitude de température = 6°C

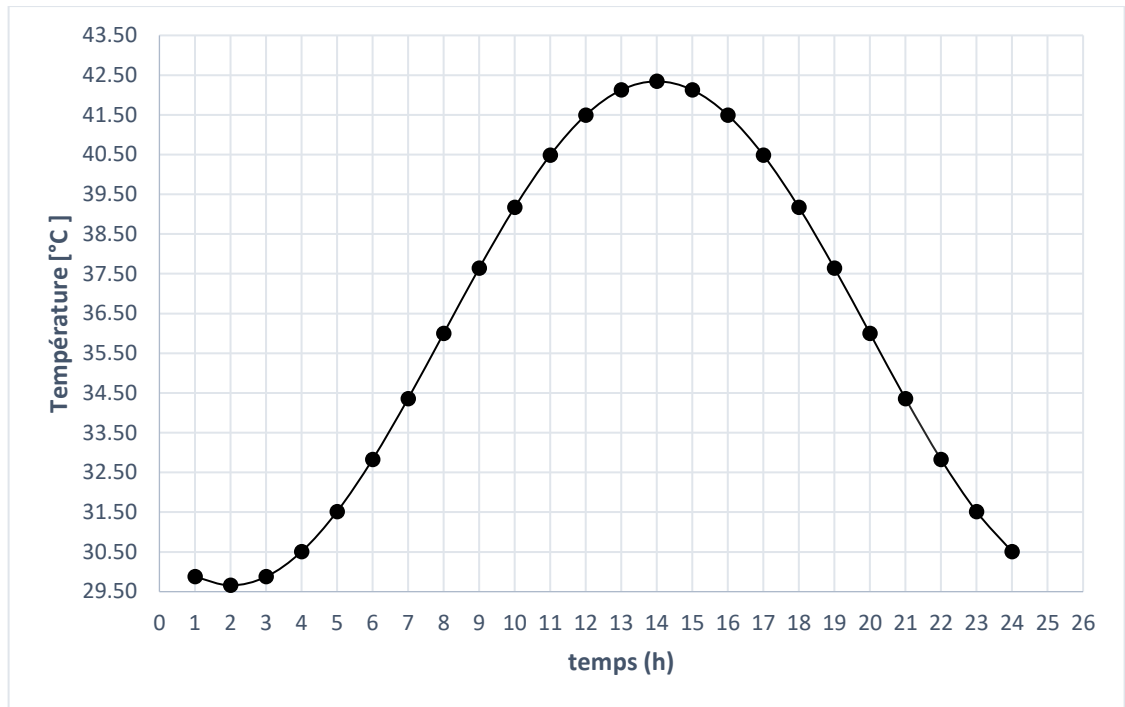


Figure 3.3 Variation de la température ambiante en fonction du temps.

3.8. L'Equation de la variation de l'intensité solaire en fonction du temps

La Figure 3.4 présente la variation de l'intensité solaire en fonction du temps. Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante :

$$G_{sun}(\tau) = \hat{G}_{sun} \sin\left(\frac{\tau - a}{b - a} \pi\right) \quad 3.18$$

\hat{G}_{sun} : L'irradiation solaire maximale = 1034 W/m² (valeur relative à la journée du 03/05/2015 au site de l'étude)

τ : Le temps en heure, $a < \tau < b$.

a : Heure de lever de soleil = 05 :30 h.

b : Heure de coucher de soleil = 19 :20 h.

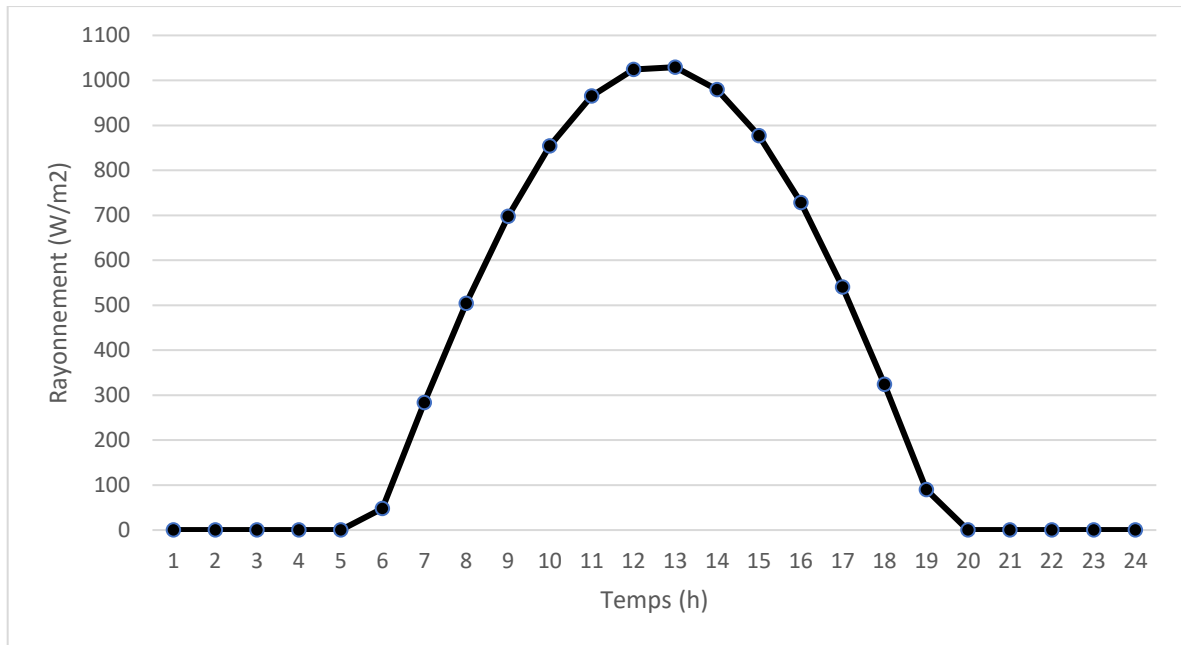


Figure 3.4 Variation de l'intensité solaire en fonction du temps.

3.9. Principales étapes pour définir un problème de CFD

Les étapes suivantes constituent la procédure à suivre pour simuler les écoulements à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT R21

- Lancer SPACECLAIM
- Définition du modèle (la géométrie)
- Charger son fichier du maillage
- Vérifier son maillage
- Choix des conditions aux limites
- Lancer FLUENT
- Choix du modèle physique
- Contrôle de la convergence
- Afficher les résultats

3.10. Présentation du code FLUENT

Le calcul numérique a été effectué à l'aide du code "ANSYS Fluent" R21. Le logiciel Fluent est un code CFD (anonyme de : Computational Fluid Dynamics) qui permet la prédiction des écoulements fluides par résolution des équations de bilan en se basant sur la méthode des volumes finis et des schémas de discrétisation existant dans sa banque de données.

Fluent permet de simuler tous les écoulements fluides, incompressibles ou compressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que les écoulements multiphasiques, la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques... etc.

3.11. Résolution du problème avec le code ANSYS FLUENT

Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme Suit :

a. Choix du type de solveur

Space	2D
Time	Unsteady, 2nd-Order Implicit
Viscous	turbulence
Heat Transfer	Enabled
Solidification and melting	Enabled (juste dans le cas de MCP)
Radiation	SURFACE TO SURFACE

b. Choix de matériau

Le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes, sinon il faut les introduire selon nos besoins.

c. Solver Controls

- Equations :

1. mouvement
2. Energie

- Paramètres de calcul instationnaire :

1. Pas de temps : 600
2. Max. Itérations par pas de temps : 300

- Facteurs de sous-relaxation	
1. Pression	0.3
2. Densité	0.8
3. Forces	0.9
4. Mouvement	0.7
5. Update de Fraction Liquide	0.89999998
6. Energie	1
- Couplage pression-vitesse	
	COUPLED
- Schéma de discrétisation	
1. Pression	PRESTO !
2. Mouvement	Second Order Upwind
3. Énergie	Second Order Upwind

3.12. Schéma du maillage du modèle physique adopté

Pour les différentes simulations appliquées dans notre étude nous avons choisi de travailler avec le maillage montré par la Figure 3.5.

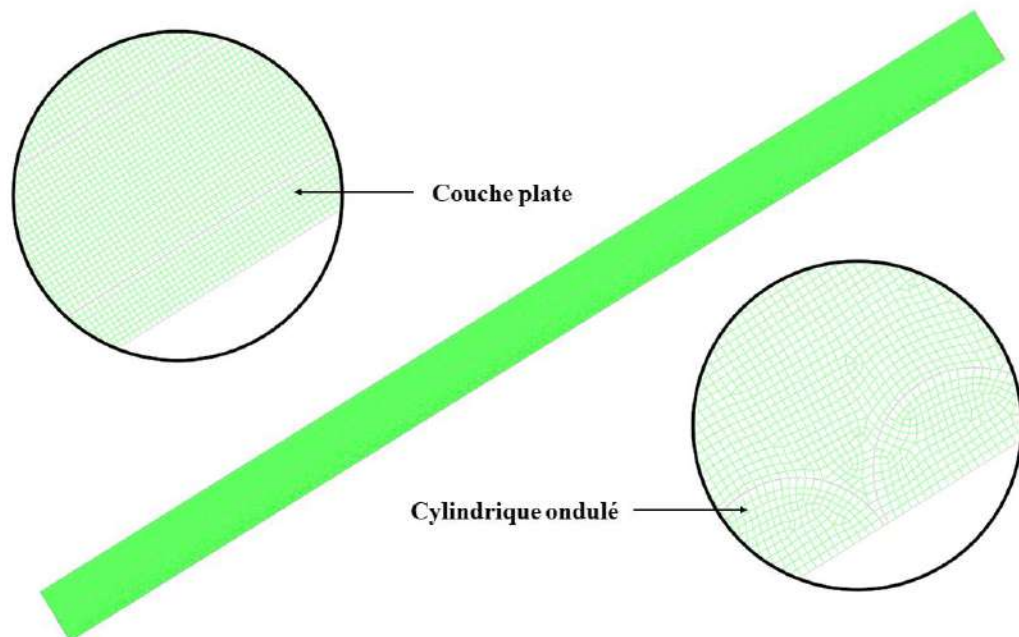


Figure 3.5 Schéma du maillage du modèle physique adopté.

Chapitre 04

Résultats et discussion

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter et discuter les résultats de l'ensemble des essais de simulation conduits dans notre étude. La procédure de résolution et la présentation des résultats sont basées sur les deux volets suivants :

- a) Simulation du capteur solaire à air sans intégration de MCP.
- b) Simulation du capteur solaire à air avec intégration MCP pour étudier :
 1. Effet de la géométrie du MCP (couche plate / cylindrique ondulé).
 2. Effet de la nature du MCP (paraffine wax, paraffine RT 58, et RT42).
 3. Effet d'ajouter plusieurs MCP à la même configuration.

4.2. Choix du maillage optimal

Avant d'entamer les simulations des différentes configurations du capteur solaire. Le premier stage est de vérifier l'indépendance du maillage. Durant cette étape nous avons testés cinq maillages varie entre [1206 et 129320 nœuds] et nous avons calculé la variation de la température dans le canal d'air en fonction de temps pour chaque cas (*Figure 4.1*).

Les résultats obtenus confirment que la variation entre le maillage 4 et le maillage 5 est négligeable, où la valeur de l'erreur relative moyenne été 0.0327 %. Donc afin de gagner le temps et le cout computationnel le maillage 4 a été considéré pour simuler tous les cas.

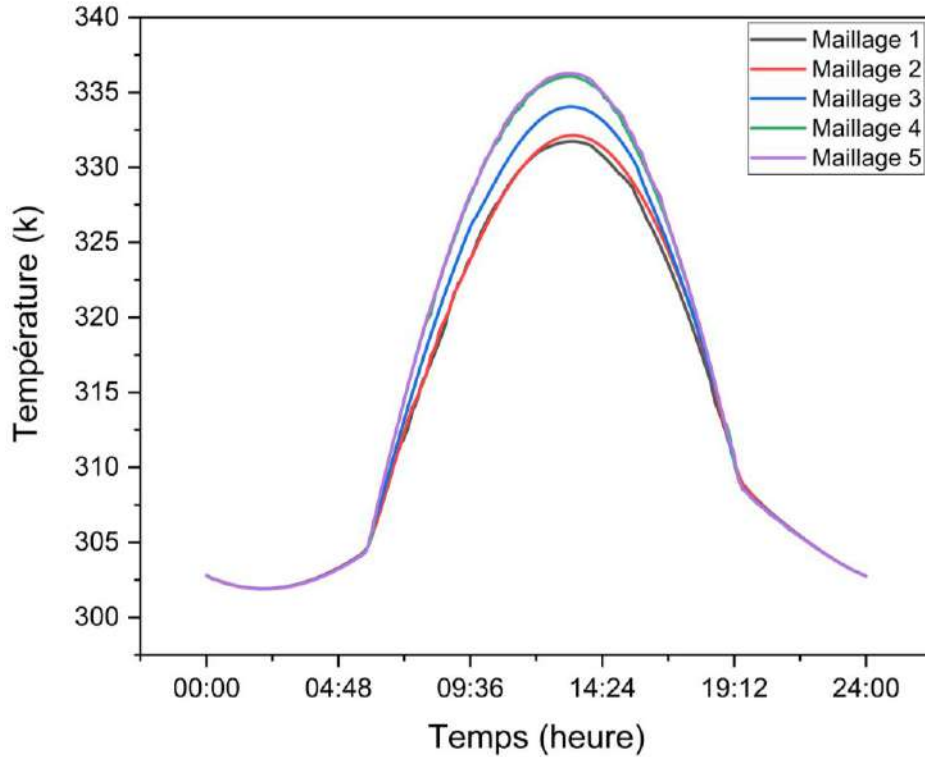


Figure 4.1 Températures du canal d'air pour différents maillages.

Le **Error! Reference source not found.** présente la taille d'élément et le nombre de nœuds pour chaque maillage.

Tableau 4.1 Caractéristiques des différents maillages

	Taille d'élément	Nombre des nœuds
Maillage 1	0.015	1206
Maillage 2	0.010	2613
Maillage 3	0.005	9223
Maillage 4	0.0015	94769
Maillage 5	0.0013	129320

4.3. Choix du meilleur MCP

Pour choisir un MCP nous avons testé trois MCP, Paraffine RT-42 Paraffine, RT-58 et Paraffine Wax chaque MCP se caractérise par une température de fusion et chaleur latente déterminé (**Error! Reference source not found.**). En outre, les simulations ont été effectuées pour deux différentes géométries de MCP, couche plate et cylindres ondulés.

4.3.1 Simulation du capteur solaire avec intégration du MCP comme couche plate

La Figure 4.2 présente la variation de la température à la sortie dans le cas couche plate en fonction de temps pour différente nature de MCP.

A partir d'utilisation des différents MCP avec un volume similaire (2.6 m^3) l'influence de ces configurations a été représentée dans cette partie d'étude.

Il été observé que l'ajout d'une couche plate de MCP améliore la température maximale à la sortie par 6.48, 3.85 et 3.12 °C pour Paraffine RT-42 Paraffine, RT-58 et Paraffine Wax respectivement.

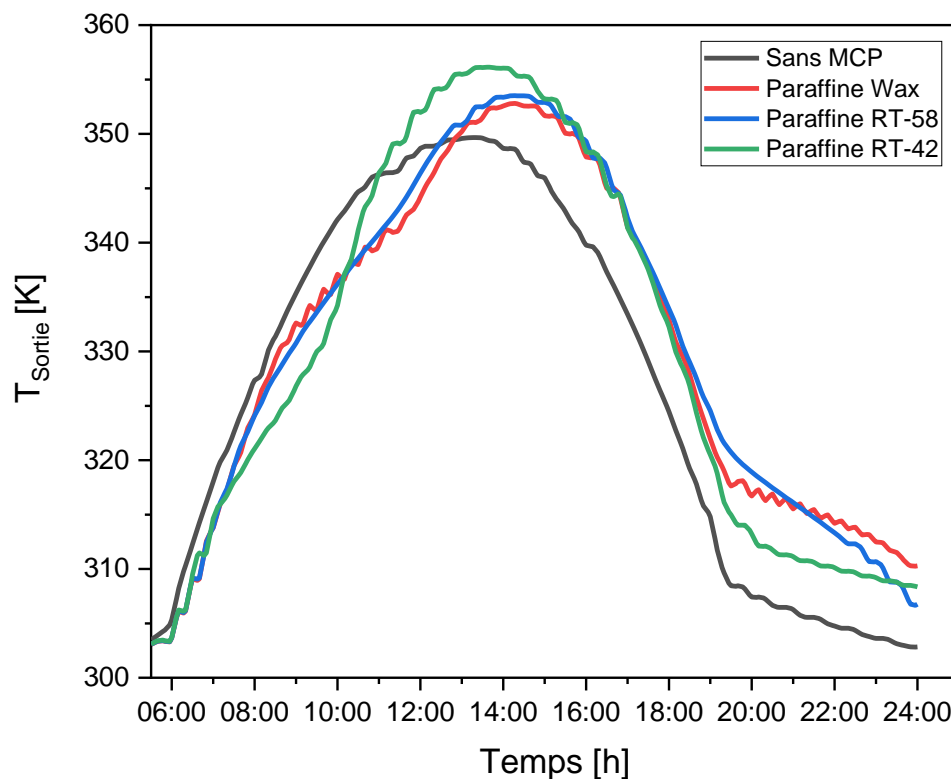


Figure 4.2 Température à la sortie pour le cas couche plate.

Pour bien étudié l'influences des différents MCP nous avons tracé sous forme d'un histogramme (Figure 4.3) la variation de température du canal d'air seulement après le coucher de soleil.

Après la comparaison des trois cas des différents MCP avec le capteur sans MCP, nous avons remarqué que la moyenne des différences des températures entre sans et avec MCP est 4.66, 3.91 et 3.026 pour le capteur avec paraffine wax, paraffine RT-58 et RT-42, respectivement. Donc le paraffine wax peut être considéré comme le meilleur MCP puisqu'il assure une durée de

fonctionnement importante (presque 5 heures après le coucher de soleil) et un gain en terme température acceptable (4.66 K).

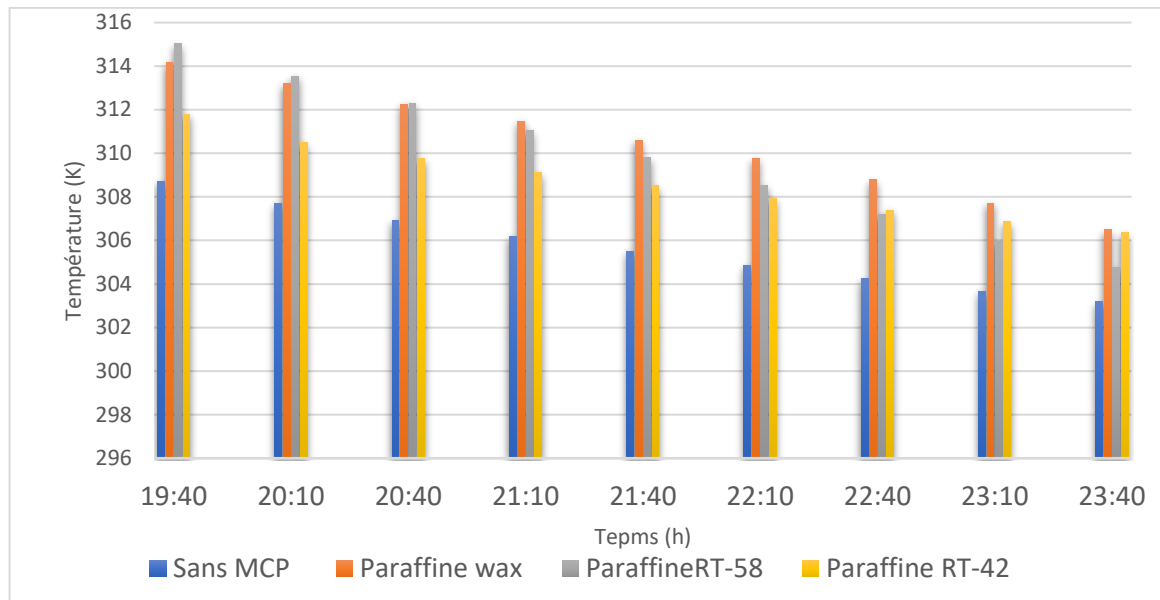


Figure 4.3 Température du canal d'air pour le cas couche plate après couché de soleil.

4.3.2 Simulation du capteur solaire avec intégration du MCP comme cylindre ondulé

L'effet de changer le MCP sur la performance du capteur solaire avec MCP intégré dans des demis cylindres ondulé est vérifié dans cette section. La Figure 4.4 présente la variation de la température à la sortie en fonction de temps pour différentes natures de MCP qui sont caractérisés par une température de fusion et chaleur latente déterminé. Afin de comparer les résultats pour les trois cas le volume a été considéré le même, avec une valeur similaire au cas d'une couche plate.

D'après Figure 4.4, d'une part et avant le coucher de soleil, il été observé que la température de l'air pour le cas cylindre ondulée est inférieure comparé au capteur sans MCP. Cet effet est à cause turbulence qui a provoqué d'air froid retourné (Figure 4.5 et Figure 4.6) qui minimiser la température moyenne.

D'autre part, après couché de soleil l'utilisation d'un MCP améliore la température de l'air par rapport au cas de sans MCP.

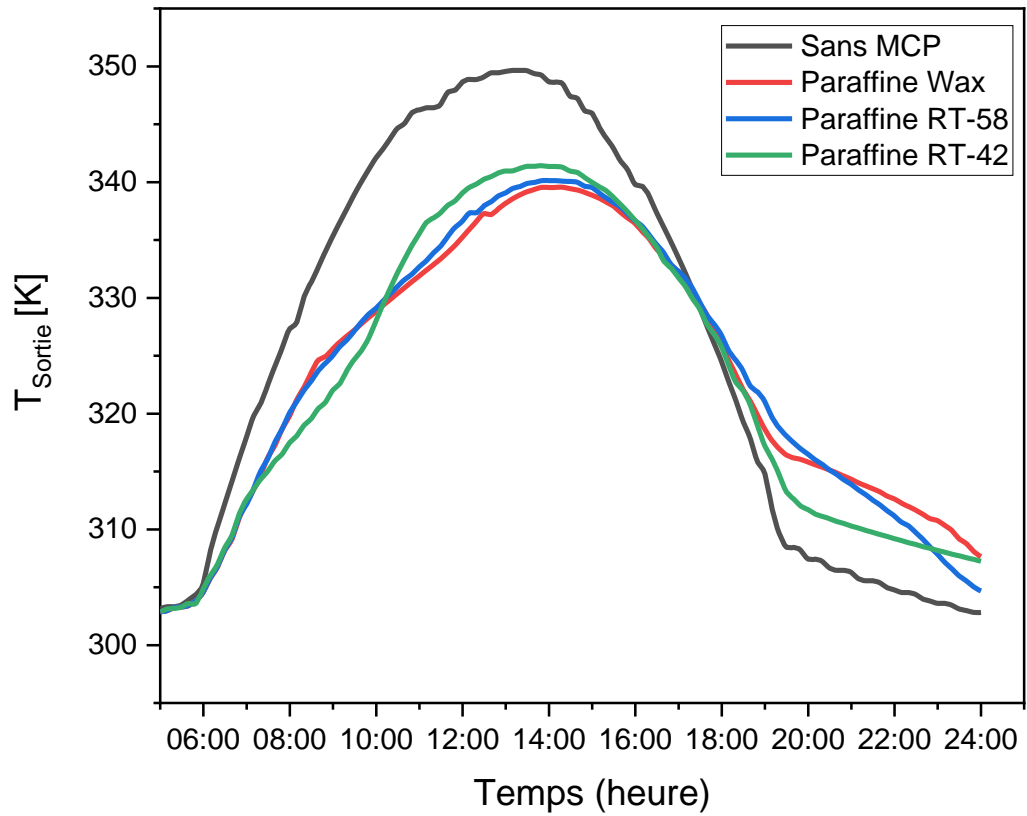


Figure 4.4 Température à la sortie pour le cas cylindre ondulée.

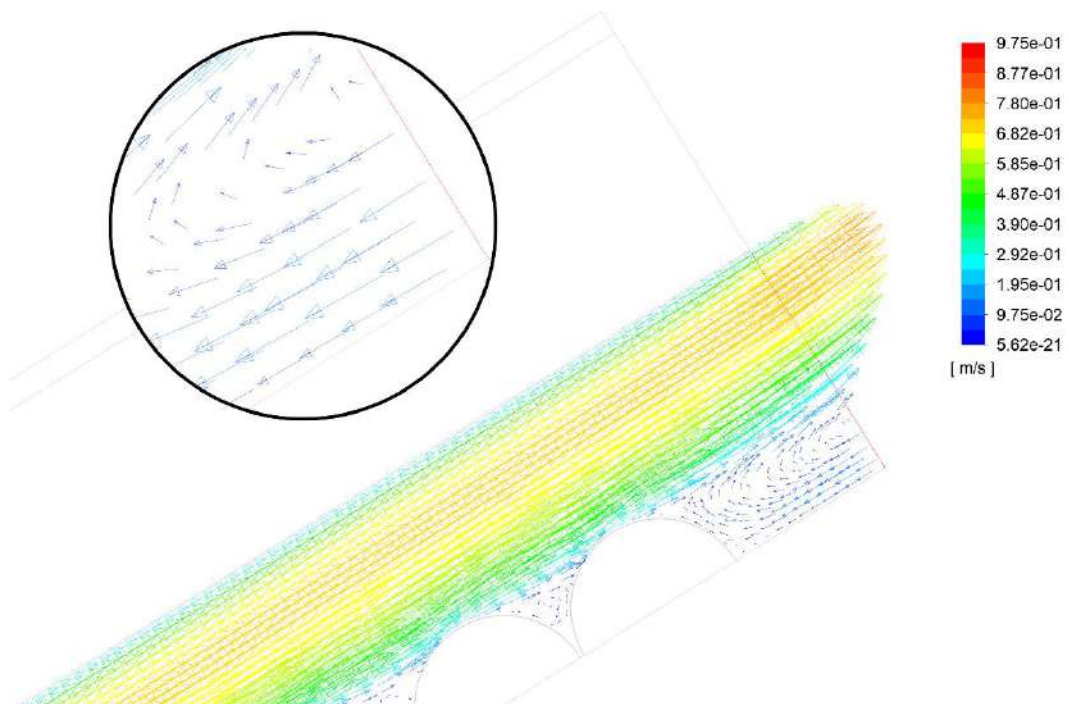


Figure 4.5 Vecteurs de vitesse à la sortie.

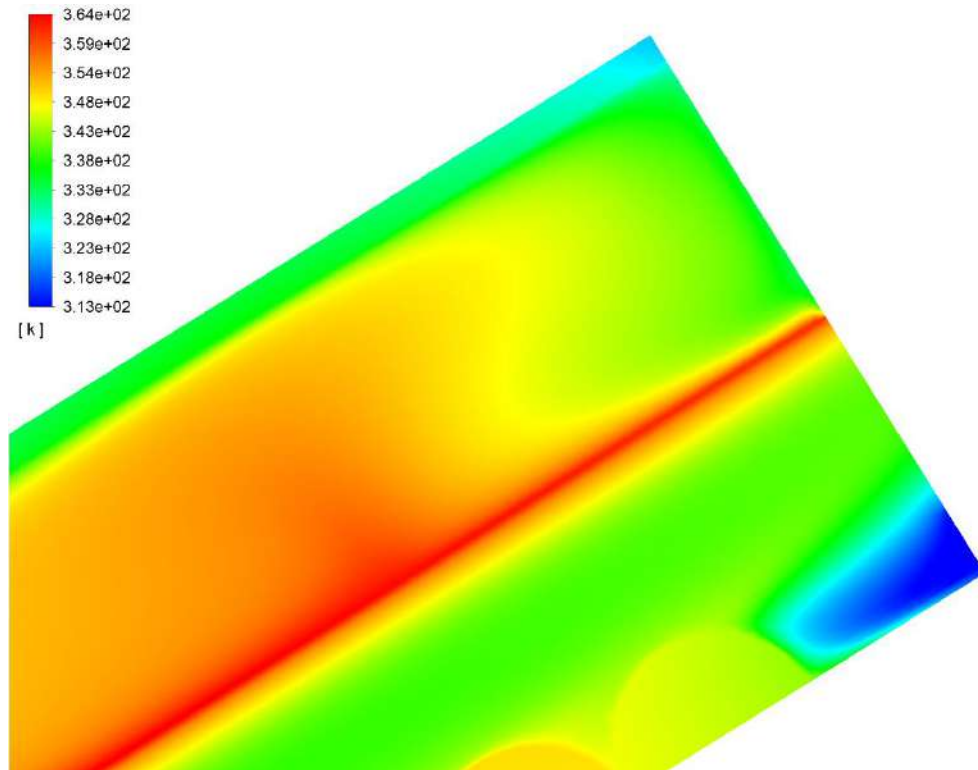


Figure 4.6 Contour de température à la sortie.

Pour bien étudier l'influence des différents MCP nous avons tracé sous forme d'un histogramme Figure 4.7 la variation de température du canal d'air seulement après le coucher de soleil.

Après la comparaison des trois cas des différents MCP avec le capteur sans MCP, nous avons remarqué que la moyenne des différences de température entre sans et avec MCP est 5.52, 4.48 et 3.57 pour le capteur avec paraffine wax, paraffine RT-58 et RT-42, respectivement. Donc le paraffine wax peut être considéré comme le meilleur MCP puisqu'il assure une durée de fonctionnement importante (presque 5 heures après le coucher de soleil) et un gain en terme température acceptable (5.52 K).

Il a été observé que l'ajout d'un cylindre ondulé de MCP améliore la température au canal d'air.

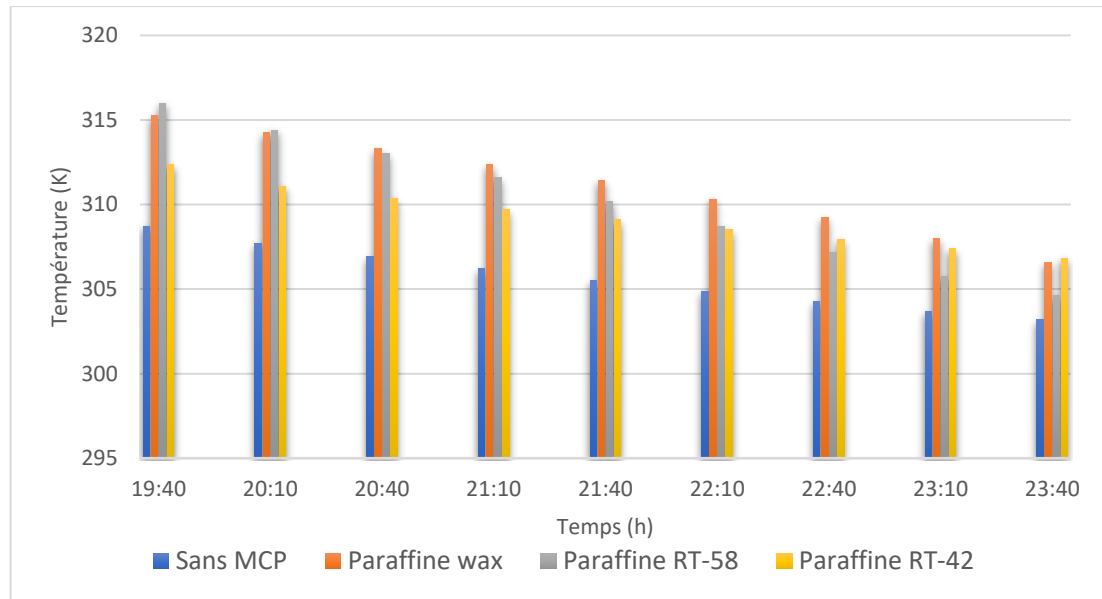


Figure 4.7 Température du canal d'air pour le cas cylindre ondulée.

Il été observé que l'ajout d'un cylindre ondulé de MCP améliore la température au canal d'air.

D'après la discussion des résultats de cette section nous avons obtenus comme un résultat principal que le paraffine wax est le meilleur MCP pour les des géométries étudiées (couche plate / cylindrique ondulé).

4.4. Effet de la géométrie du MCP

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de la géométrie du MCP ajouté à l'intérieur du canal d'air. A cet effet, le MCP a été ajouté 1) sous forme d'une couche plate ou 2) cylindrique ondulé placé dans la partie inférieure du canal d'air.

D'après le résultat obtenu dans la section précédente le MCP paraffine wax été le meilleur MCP pour les deux cas. Donc, afin de sélectionner la meilleure géométrie de MCP les simulations ont été effectuées pour le même MCP (Paraffine wax).

La Figure 4.8 montre la variation de température en fonction de temps pour les deux cas après le couché soleil. Nous avons remarqué que la température moyenne d'air dans le cas cylindrique ondulée est supérieure deuxième cas (couche plate).

Ce gain en température au niveau du canal d'air a été causé par l'augmentation de la surface d'échange thermique dans le cas où la géométrie du MCP est cylindre ondulée. Ainsi que cette dernière améliore la turbulence ce qui favorise le transfert thermique par convection.

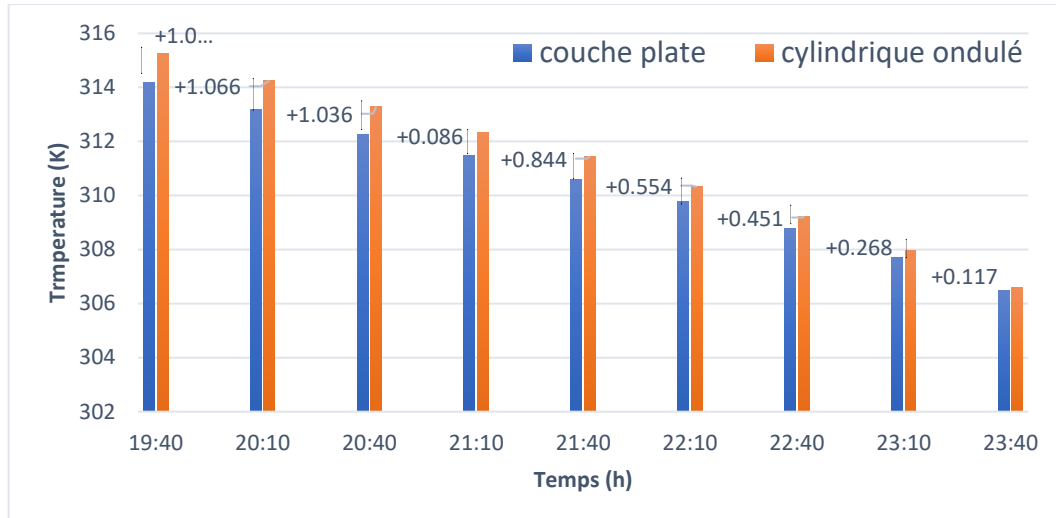


Figure 4.8 Température du canal d'air des deux cas avec MCP Wax après couché de soleil.

Ce résultat confirme que la géométrie optimale du capteur solaire est d'ajouter un MCP de type paraffine wax sous forme cylindrique ondulée.

Dans l'objectif de vérifier le comportement du MCP en stockage et déstockage, nous avons présenté sur la Figure 4.9 qui représente la fraction liquide de MCP en fonction du temps pour Paraffine wax dans cylindrique ondulée. On remarque que la fusion de MCP commence presque à 9 :00 h et la solidification commence à 19 :20. Nous remarquons aussi, que 89.2% de la totalité du volume du MCP participer au changement de phase dans ses deux directions.

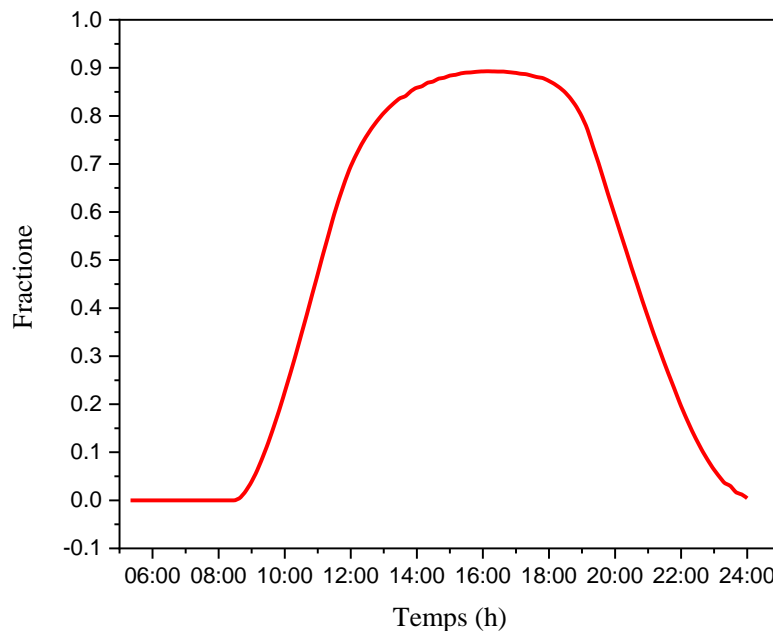


Figure 4.9 Fraction de liquide du MCP dans cylindrique ondulée.

Afin de vérifier les parties de MCP qui n'ont pas changé sa phase, nous avons tracé le contour de fraction liquide du paraffine (

Figure 4.10 Contour de Fraction de Paraffine Wax dans cylindrique ondulée ($t=16:10$ h).
).

Nous observons que la fusion n'a pas été complètement à l'entrée de canal d'air puisque la gamme de température à l'entrée est insuffisante pour entamer la fusion du MCP (ou bien inférieure au point de fusion de la paraffine). A cet effet nous avons testé une configuration supplémentaire avec trois MCP différents (voir la section suivante).

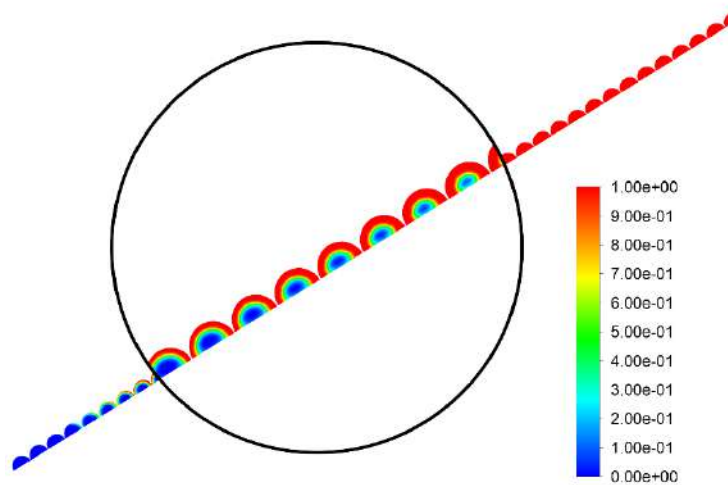


Figure 4.10 Contour de Fraction de Paraffine Wax dans cylindrique ondulée ($t=16:10$ h).

4.4.1 Etude de l'effet d'utiliser trois MCP différents

L'emplacement axiale de chaque MCP a été choisi sur la base de la gamme de température du MCP. La Figure 4.11 présente la variation de température du MCP placé dans l' canal à l'air. Il été observé que la variation de température été dans domaine de [313 et 353K].

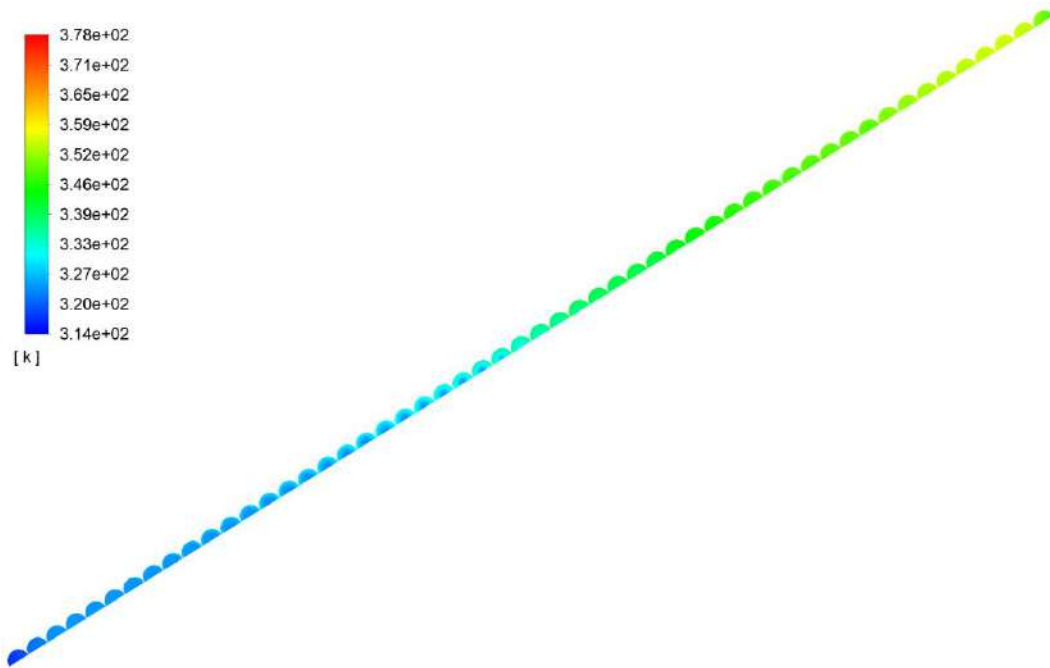


Figure 4.11 Variation de température du MCP dans l' canal a 'air (t=13 :00 h).

C'est ce qui a conduit à l'expérimentation numérique de 3 types de MCP (Paraffine wax - Paraffine RT-58, Paraffine RT-42) placé successivement comme montré dans la Figure 4.12. De plus, l'arrangement des MCP est selon la température de sa fusion de chaque MCP (Tableau 3.3)

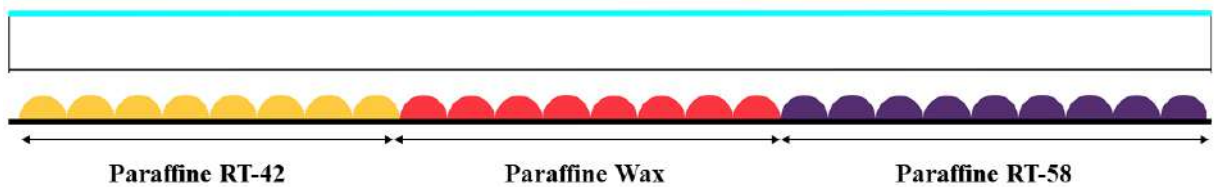


Figure 4.12 Emplacement des MCPs dans le cas mixte.

Dans l'objectif de vérifier le comportement du trois types MCP en stockage et déstockage nous avons présenté sur la Figure 4.13 qui représente la fraction liquide de MCP en fonction du temps pour (Paraffine wax - Paraffine RT-58, Paraffine RT-42) dans cylindrique ondulée. On remarque que la fusion de MCP commence presque à [8 :00 jusqu'à 9 :30 h] (chaque type de MCP Il commence à fusion à un certain moment) et la solidification commence à [19 :00 et 20 :00] Nous remarquons aussi la solubilité totale de tous les types de Paraffine.

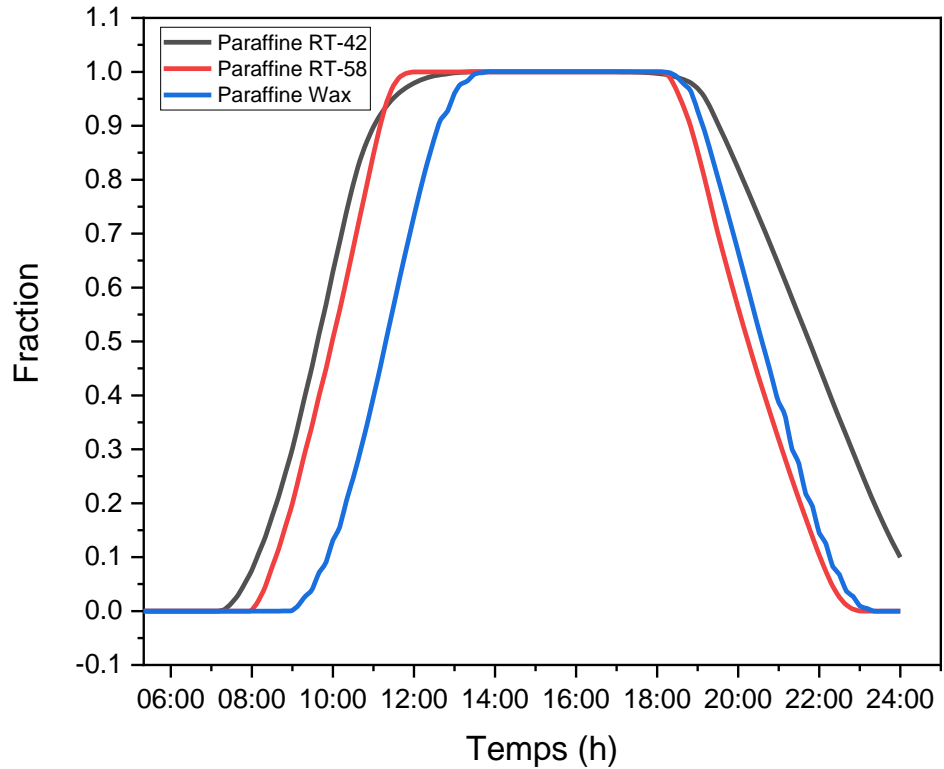


Figure 4.13 Fraction de liquide des MCPs en cas d'utiliser trois MCP différents.

La Figure 4.14 présente la température à la sortie du canal dans le cas mixte et le cas wax la différence de température moyenne entre les deux cas est 0.391 k.

Donc l'amélioration de capteur solaire à air est valide parce que la durée de fonctionne parfaite.

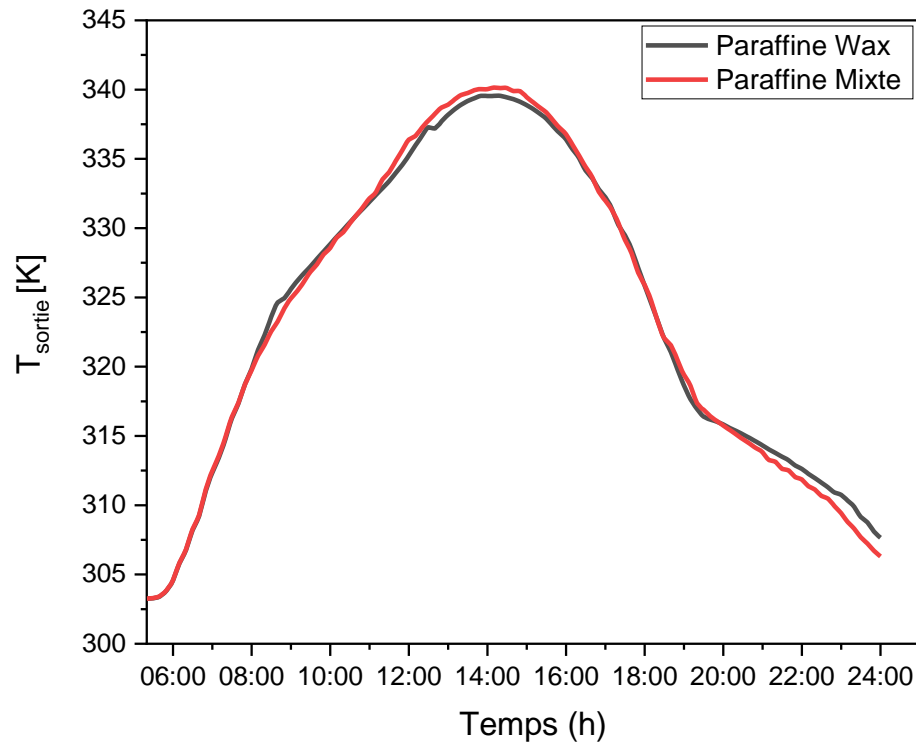


Figure 4.14 Température à la sortie du canal dans le cas mixte et le cas wax.

La Figure 4.15 montre le contour de température de Paraffine Mixte dans un cylindre ondulé ($t=16:10$ h), ce qui présente l'augmentation de la température au niveau du canal d'air dans l'entrée et la sortie.

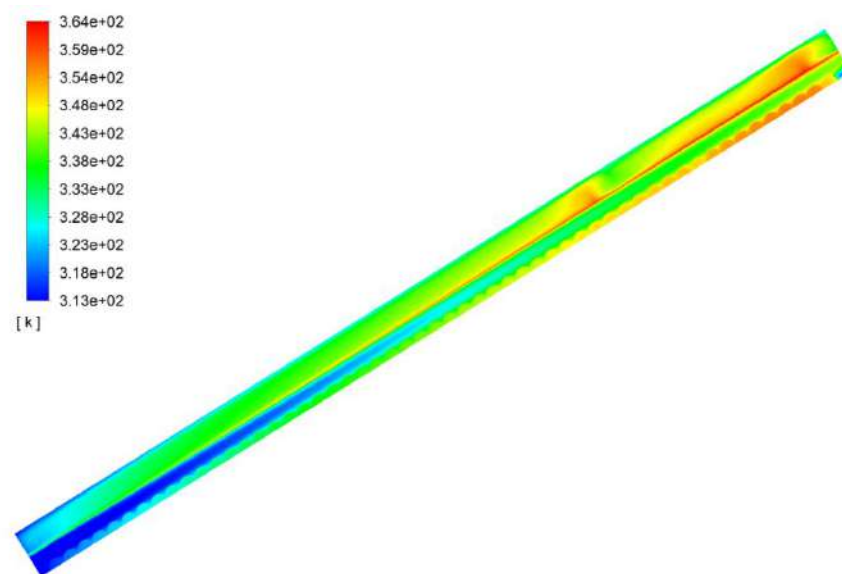


Figure 4.15 Contour de température en cas d'utiliser trois MCP différents dans un cylindre ondulé ($t=16:10$ h).

Après avoir optimisé et placé plusieurs types de MCP, on note la solubilité totale de tous les types de MCP, comme le montre la Figure 4.16 ci-dessous.

Généralement, le MCP change sa phase du solide vers le liquide partiellement quand il absorbe la chaleur obtenue du rayonnement solaire. On peut remarquer d'après la figure suivante que la totalité de la masse du MCP été fusionné à 14 :00 h

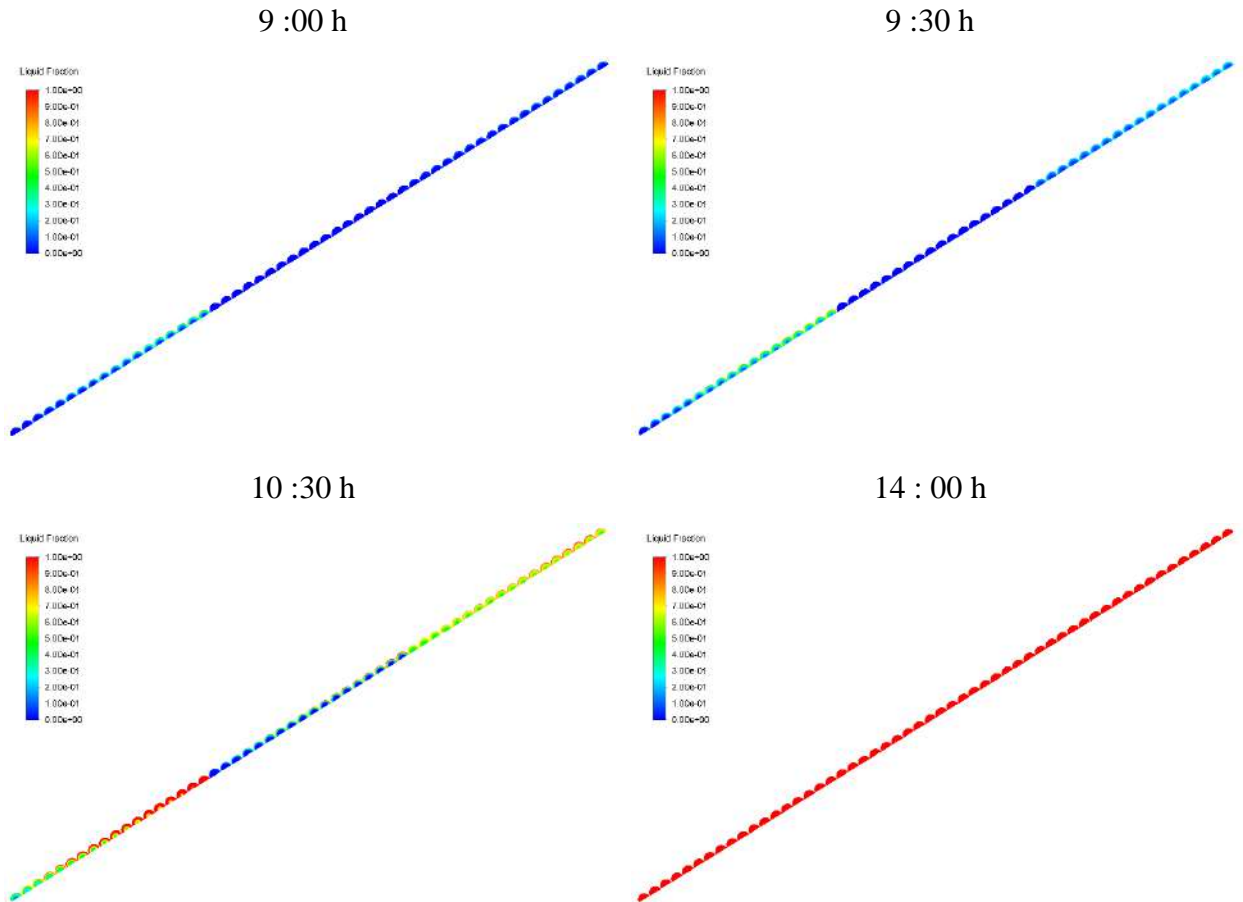


Figure 4.16 Contours de la fraction liquide à différents moments de la journée en cas d'utiliser trois MCP différents.

Après avoir testé deux différents géométries MCP, la géométrie cylindrique ondulée s'avère meilleure que les autres. Ainsi, que, pour cette dernière les résultats de la simulation ont également démontré une nette amélioration des performances du capteur solaire en utilisant une combinaison séquentielle des trois MCP selon la géométrie cylindrique ondulée (Fusion complète).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la contribution à l'étude d'amélioration des apports thermiques d'un capteur solaire plan à air pouvant être destiné aux applications du chauffage d'air, particulièrement dans les périodes de faible ou non ensoleillement. La présente étude a porté sur la simulation numérique du capteur solaire à air sans et avec intégration du matériau à changement de phase.

Plusieurs simulations ont été effectués moyennant la méthode des volumes finis par un modèle instationnaire bidimensionnel mis en application sur le logiciel CFD Fluent dans un objectif de considérer les effets des différents paramètres :

- 1) Effet de la géométrie du MCP (couche plate / couche cylindrique ondulée).
- 2) Effet de la nature du MCP (paraffine wax, paraffine RT 58, et RT42).
- 3) Effet d'utilisation de trois différents MCP.

A L'issue des différentes simulations entreprises nous avons pu obtenir les résultats suivants :

- L'étude d'indépendance du maillage confirme que le maillage avec taille d'élément égale à 0.0015 était suffisant pour simuler tous les cas.
- Le Paraffine Wax améliore la température maximale à la sortie par 6.48 °C pour la géométrie couche plate.
- Parmi les trois MCP utilisés, les résultats obtenus montrent que le paraffine wax est le meilleur MCP pour les deux géométries étudiées (couche plate / cylindrique ondulée) puisqu'il assure une durée de fonctionnement importante (presque 5 heures après le coucher de soleil) et un gain en de température acceptable (4.66 °C).
- Après le test des deux différents types de géométrie du MCP, il été trouvé que la géométrie cylindrique ondulée améliore la turbulence et augmente la surface d'échange avec l'air ce qui influe positivement sur la température moyenne de l'air.
- Les résultats des simulations ont aussi prouvé une nette amélioration des performances du capteur solaire en utilisant une combinaison successive des trois MCP selon la géométrie cylindrique ondulée. La fraction liquide dans ce cas a atteint 100%.

Références

1. Ademe. *Énergie solaire*. 2021/06/03; Available from: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation#:~:text=le%20solaire%20thermique%20qui%20transforme,un%20second%20temps%20en%20%C3%A9lectricit%C3%A9>.
2. *Capteur solaire thermique - Définition et Explications*. 2021/06/10; Available from: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Capteur-solaire-thermique.html>.
3. Benhamza, A., et al., *Multi-objective design optimization of solar air heater for food drying based on energy, exergy and improvement potential*. Renewable Energy, 2021. **169**: p. 1190-1209.
4. Benhamza, A., et al., *Optimized parameters of an air solar collector for drying applications using the experimental design method (DOE)*. 2018.
5. Tian, Y. and C.Y. Zhao, *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*. Applied Energy, 2013. **104**: p. 538-553.
6. Ekechukwu, O.V. and B. Norton, *Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology*. Energy Conversion and Management, 1999. **40**(6): p. 615-655.
7. Akpinar, E.K., C. Sarsilmaz, and C. Yildiz, *Mathematical modelling of a thin layer drying of apricots in a solar energized rotary dryer*. 2004. **28**(8): p. 739-752.
8. Kalogirou, S.A., *Solar thermal collectors and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 2004. **30**(3): p. 231-295.
9. Sandali, M., et al., *A simulation study of a solar collector using phase change materials for air heating application needs*. AIP Conference Proceedings, 2017. **1814**(1): p. 020010.
10. Benhamza, A. and B. Settou, *SIMULATION NUMERIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN UTILISANT DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE*, in *Département de Génie Mécanique*. 2016, Université Kasdi merbah Ouargla.
11. Hadibi, T., et al., *3E analysis and mathematical modelling of garlic drying process in a hybrid solar-electric dryer*. Renewable Energy, 2021. **170**: p. 1052-1069.
12. Aissaoui, F., *Contribution à l'étude du transfert de chaleur d'un capteur solaire placé dans un climat aride-cas de la région de Biskra*. Université Mohamed Khider de Biskra, Département de Génie M.
13. *Capteur solaire thermique*. 2021/06/01; Available from: https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_thermique.
14. Tarik, H., et al., *EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MATHEMATICAL MODELING OF HOT AIR CONVECTIVE DRYING OF TOMATO PASTE UNDER NEAR SOLAR DRYING OPERATING CONDITIONS*. Algerian Journal of Arid Environment "AJAE", 2020. **10**(1).
15. Hadibi, T., et al., *Economic analysis and drying kinetics of a geothermal-assisted solar dryer for tomato paste drying*. J Sci Food Agric, 2021.
16. Sandali, M., et al. *Etude du comportement thermique d'un séchoir solaire direct influencé par l'intégration d'un milieu poreux non consolidé*. in *6 ème séminaire maghrébin sur les sciences et les technologies de séchage (SMSTS 2018)*. 2018.
17. 2021/06/01; Available from: <https://portail.cder.dz/spip.php?article1897>.

-
18. Mecheri, A., et al., *Etude d'amélioration de l'homogénéité du champ thermique dans un séchoir solaire en utilisant la méthode des plans d'expériences*. 2019, Ouargla university.
 19. Benhamza, A., *Contribution à la conception des séchoirs solaires à haute performance utilisant un outil de simulation couplé avec la méthode des plans d'expériences*, in *Mechanical engineering*. 2021, University of Eloued.
 20. Kumar, S., S.K. Gupta, and M.J.M.T.P. Rawat, *Resources and utilization of geothermal energy in India: An eco-friendly approach towards sustainability*. 2020. **26**: p. 1660-1665.
 21. Kumar, S., M.K. Rawat, and S.J.I.J.I.T.E.E.I. Gupta, *An evaluation of current status of renewable energy sources in India*. 2019. **8**(10): p. 1234-1239.
 22. Gupta, S.K., R. Mehta, and V.J.P.e. Dwivedi, *Modeling of relative length and relative energy loss of free hydraulic jump in horizontal prismatic channel*. 2013. **51**: p. 529-537.
 23. Gupta, S.K., R. Mehta, and V.K. Dwivedi. *Modelling of Relative Length and Relative Energy Loss of Hydraulic Jump in Sloping Prismatic Channels for Environmental Hazards Control*. in *2nd International Conference on Climate Change & Sustainable Management of Natural Resources, CP-77*. 2010.
 24. Abhat, A.J.S.e., *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*. 1983. **30**(4): p. 313-332.
 25. Lane, G.A., *Solar heat storage: latent heat materials*. 1983.
 26. BERREKSI SARA, L.S., *Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique*. 2016, Université M'Hamed Bougara Boumerdes.
 27. Tyagi, V.V., et al., *Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. **15**(2): p. 1373-1391.
 28. Ango, S.E., *Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase*. 2011, Arts et Métiers ParisTech.
 29. Lee, T., et al., *Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000. **62**(3): p. 217-237.
 30. Liu, M., W. Saman, and F. Bruno, *Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(4): p. 2118-2132.
 31. Farid, M.M., et al., *A review on phase change energy storage: materials and applications*. *Energy Conversion and Management*, 2004. **45**(9): p. 1597-1615.
 32. Tyagi, V.V., et al., *Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(4): p. 2289-2303.
 33. Chen, C., et al., *Review on thermal energy storage with phase change material and applications*. 2009. **13**: p. 318-345.
 34. Saffari, M., et al., *Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review*. 2017. **80**: p. 1239-1255.
 35. CEN, E.J.E.C.f.S., Brussels, Belgium, *15251, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. 2007.

-
36. Zhou, D., C.-Y. Zhao, and Y.J.A.e. Tian, *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*. 2012. **92**: p. 593-605.
37. Li, G., et al., *Phase change material Chinese Kang: Design and experimental performance study*. 2020. **150**: p. 821-830.
38. Guan, Y., et al., *Numerical study on the heat release capacity of the active-passive phase change wall affected by ventilation velocity*. 2020. **150**: p. 1047-1056.
39. Akeiber, H., et al., *A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes*. 2016. **60**: p. 1470-1497.
40. Cabeza, L.F., et al., *Experimentation with a water tank including a PCM module*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006. **90**(9): p. 1273-1282.
41. Solé, C., et al., *Energetic and exergetic analysis of a domestic water tank with phase change material*. 2008. **32**(3): p. 204-214.
42. Vigo, T.L. and C.J.T.R.J. Frost, *Temperature-sensitive hollow fibers containing phase change salts*. 1982. **52**(10): p. 633-637.
43. Shin, Y., D.I. Yoo, and K.J.J.o.A.P.S. Son, *Development of thermoregulating textile materials with microencapsulated phase change materials (PCM). II. Preparation and application of PCM microcapsules*. 2005. **96**(6): p. 2005-2010.
44. Wang, S., et al., *Effect of phase-change material on energy consumption of intelligent thermal-protective clothing*. 2006. **25**(5): p. 580-587.
45. Sarier, N., et al., *Preparation of phase change material–montmorillonite composites suitable for thermal energy storage*. 2011. **524**(1-2): p. 39-46.
46. Rothmaier, M., et al., *Design and performance of personal cooling garments based on three-layer laminates*. 2008. **46**(8): p. 825-832.
47. Sánchez, P., et al., *Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules*. 2010. **498**(1-2): p. 16-21.
48. Shin, Y., K. Son, and D.J.T.a. Yoo, *Development of natural dyed textiles with thermo-regulating properties*. 2010. **511**(1-2): p. 1-7.
49. Renzi, A.I., C. Carfagna, and P.J.A.t.e. Persico, *Thermoregulated natural leather using phase change materials: An example of bioinspiration*. 2010. **30**(11-12): p. 1369-1376.
50. Oliveira, F.R., et al., *Functionalization of wool fabric with phase-change materials microcapsules after plasma surface modification*. 2013. **128**(5): p. 2638-2647.
51. Mondieig, D., et al., *Protection of temperature sensitive biomedical products using molecular alloys as phase change material*. 2003. **28**(2): p. 143-148.
52. De Santis, R., et al., *Effect of microencapsulated phase change materials on the thermo-mechanical properties of poly (methyl-methacrylate) based biomaterials*. 2006. **17**(12): p. 1219-1226.
53. Kumar, N., S.K. Gupta, and V.K.J.M.T.P. Sharma, *Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances*. 2020.
54. Lv, Y., Y. Zou, and L.J.C.e.s. Yang, *Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery*. 2011. **66**(17): p. 3941-3953.

-
55. Rabin, Y., et al., *Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material*. 1995. **55**(6): p. 435-444.
56. Hasan, A.J.S.e., *Phase change material energy storage system employing palmitic acid*. 1994. **52**(2): p. 143-154.
57. Enibe, S.J.R.E., *Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage*. 2002. **27**(1): p. 69-86.
58. Tyagi, V.V., D.J.R. Buddhi, and s.e. reviews, *PCM thermal storage in buildings: a state of art*. 2007. **11**(6): p. 1146-1166.
59. Morrison, D. and S.J.S.E. Abdel-Khalik, *Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems*. 1978. **20**(1): p. 57-67.
60. Jurinak, J. and S.J.S.E. Abdel-Khalik, *Properties optimization for phase-change energy storage in air-based solar heating systems*. 1978. **21**(5): p. 377-383.
61. *Solar Thermal Sterilization: A TRNSYS Performance Analysis*.
62. IZARD, L. *Diffusivité thermique*. 2021/05/31; Available from: https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusivité_thermique.
63. Chen, Z., M. Gu, and D.J.A.t.e. Peng, *Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin*. 2010. **30**(14-15): p. 1967-1973.
64. Nallusamy, N., S. Sampath, and R.J.R.e. Velraj, *Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources*. 2007. **32**(7): p. 1206-1227.
65. Mettawee, E.-B.S. and G.M.J.E. Assassa, *Experimental study of a compact PCM solar collector*. 2006. **31**(14): p. 2958-2968.
66. Khalifa, A.J.N., et al., *A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material*. 2013. **44**: p. 174-181.
67. Oudjedi, S., et al., *Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie: 2)*. 2008. **8**: p. 255-266.
68. Naphon, P.J.I.c.i.h. and m. transfer, *Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater*. 2005. **32**(1-2): p. 140-150.

Résumé

Ce travail présente une contribution, par le moyen de simulation numérique, à l'amélioration des performances thermiques dans les capteurs solaires à air ainsi que l'augmentation de leur durée de fonctionnement journalière. La présente étude a porté sur la simulation du capteur sans et avec intégration d'un matériau à changement de phase sous deux formes différentes (couche plate / couche cylindrique ondulée), dans l'objectif de stocker partiellement l'énergie thermique par chaleur latente. Plusieurs calculs ont été menés, moyennant la méthode des volumes finis par un modèle instationnaire bidimensionnel mis en application sur le logiciel CFD Fluent. A cet effet différents paramètres géométriques et conceptuels ont été étudiés et comparés pour le cas d'un capteur avec ou sans MCP.

Les résultats obtenus dans cette étude, ont montré de faibles effets induits par la variation des paramètres géométriques (couche plate / cylindrique ondulée). Par ailleurs les résultats obtenus, en cas d'intégration de MCP, dans la forme cylindrique ondulée augmente la durée de fonctionnement du capteur 5 heures après le coucher de soleil et améliore la température de sortie. L'application d'une combinaison successive de trois différents MCP pour le cas (cylindrique ondulé) a donné un fusionne plein.

المخلص

يقدم هذا العمل ، عن طريق المحاكاة العددية ، مساهمة في تحسين الأداء الحراري في مجمعات الهواء الشمسية وكذلك في زيادة وقت التشغيل اليومي. ركزت الدراسة الحالية على محاكاة المستشعر بدون أو مع دمج مادة تغيير الطور في شكلين مختلفين (طبقة مسطحة / طبقة أسطوانية مموجة) ، بهدف تخزين الطاقة الحرارية جزئياً بواسطة الحرارة الكامنة. تم إجراء العديد من العمليات الحسابية باستخدام طريقة الحجم المحدود بواسطة نموذج ثنائي الأبعاد غير مستقر تم تنفيذه على برنامج CFD Fluent. تمت دراسة مختلف الأشكال الهندسية والمفاهيمية ومقارنتها لحالة جهاز مع أو بدون MCP.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة تأثيرات ضعيفة ناتجة عن اختلاف المتغيرات الهندسية (الطبقة الأسطوانية المسطحة / المموجة). بالإضافة إلى ذلك ، فإن النتائج التي تم الحصول عليها ، في حالة تكامل MCP ، في الشكل الأسطواني المموج ، تزيد من وقت تشغيل المستشعر بعد 5 ساعات من غروب الشمس وتحسن درجة حرارة المخرج. أدى تطبيق توليفة متتالية من ثلاثة MCP مختلفة على الشكل (أسطواني مموج) إلى اندماج كامل.

Abstract

This work presents a contribution, by means of numerical simulation, to the improvement of thermal performance in solar air collectors as well as to the increase of their daily operating time. The present study focused on the simulation of the sensor without and with integration of a phase change material in two different forms (flat layer / corrugated cylindrical layer), with the objective of partially storing thermal energy by latent heat. Several calculations were carried out, using the finite volume method by a two-dimensional unsteady model implemented on the CFD Fluent software. To this end, various geometric and conceptual parameters were studied and compared for the case of a sensor with or without MCP.

The results obtained in this study showed weak effects induced by the variation of the geometric parameters (flat / corrugated cylindrical layer). In addition, the results obtained, in case of integration of MCP, in the corrugated cylindrical shape increases the operating time of the sensor 5 hours after sunset and improves the outlet temperature. Applying a successive combination of three different MCPs to the case (corrugated cylindrical) resulted in a full merge.