



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: Génie Energétique  
Thème:

**Etude Numérique d'une Cheminée Solaire à MCP  
Intégrée Destinée à la Ventilation d'un Séchoir Solaire**

Présenté et soutenu publiquement par :

**LOUAZENE Abderrahmane et BOUHNİK Abdallah**

**Soutenu Publiquement Le: 25/05/2017**

**Devant Le Jury :**

SETTOU Nouredine	Professeur	UKM Ouargla	Président
BECHKI Djamel	MCA	UKM Ouargla	Examineur
BOUBEKRI Abdelghani	Professeur	UKM Ouargla	Encadreur
HALASSA Daoud	Doctorant	UKM Ouargla	Co-Encadreur

Année Universitaire : 2016 /2017



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# Remerciements

*Le présent travail a été effectué dans le cadre du mémoire de Master académique en génie énergétique au département de génie mécanique et a été gentiment 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 remercions également messieurs, **Pr. SETTOU Nouredine** et **Dr. DECHKI Djamel** pour avoir gentiment accepté de juger ce travail.*

*Nos remerciements sont aussi particulièrement adressés à messieurs **HALASSA Daoud** et **SETTOU Belkhir** pour leur participation active au suivi de ce travail et leurs conseils constructifs durant tout le semestre.*

*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*



*Je dédie ce travail :*

*A mes parents*

*A ma grande mère*

*A mes frères et sœurs*

*A Tous nos enseignants du département de génie  
mécanique.*

*À tous mes amis et en particulier : YACINE, FARES , ALI,  
AHMED, ABDESAMIA,MINO, BELKHIR,  
HICHAM,YOUCCEF*

*LOUAZENE Abderrahmane*

# *Dédicaces*



*Je dédie ce travail :*

*A mes parents*

*A mes frères et sœurs*

*A Tous nos enseignants du département de génie  
mécanique.*

*À tous mes amis*

*BOUHNİK Abdallah*

# Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale..... 1

## Chapitre 01 : Etude bibliographique sur les cheminées solaires et les MCP

<i>1.1-Introduction.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2- Etat de l'art sur les cheminées ordinaires et solaires.....</i>	<i>3</i>
1.2.1-Définition de la cheminée :.....	3
1.2.2-Principe physique de la cheminée :..... ;.....	3
1.2.3- Différentes configurations d'une cheminée : .....	4
1.3-Utilisation des matériaux MCP dans les systèmes de séchage.....	7
1.3.1-Généralités sur les MCP .....	7
1.3.2-Les matériaux à changement de phase (MCP) : .....	7
1.3.3-Critère de sélection d'un bon MCP .....	8
1.3.4- Types de MCP .....	8
1.3.5-Les choix de la capsule de MCP :.....	9
1.3.6- Différentes formes des matériaux à changement de phase :.....	10
<i>1.4- Les Capteurs solaires : .....</i>	<i>10</i>
1.4.1-Définition :.....	10
1.4.2- Différents types des capteurs solaires :.....	11
1.4.3-Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire .....	13
1.4.4-Domaine d'application des capteurs :.....	13
<i>1.5- Les séchoirs solaires : .....</i>	<i>14</i>
1.5.1- Les séchoirs solaires indirects .....	15
<i>1.6-Aperçu bibliographique sur l'intégration des MCP dans le domaine de séchage solaire.....</i>	<i>16</i>
1.7-Problématique de la présente étude.....	20

## **Chapitre 02 : Présentation du logiciel de travail et la méthodologie de traitement**

<i>2.1-Présentation du prototype de séchage:</i> .....	21
2.1.1- Le capteur solaire.....	21
2.1.2- La chambre de séchage:.....	22
2.1.3- La cheminée:.....	22
2.1.4- Propriétés thermo-physiques: .....	22
2.1.5- Equation de la variation de température ambiante en fonction du temps:.....	23
2.1.6 -Equation de la variation de l'intensité solaire en fonction du temps .....	24
<i>2.2- Hypothèses simplificatrices:</i> .....	24
<i>2.3- Géométrie du problème:</i> .....	25
2.3.1- Equations dimensionnelles gouvernantes:.....	27
2.3.2- Conditions initiales et aux limites : .....	27
<i>2.4 -Principales étapes de traitement du problème par CFD</i> .....	30
2.4.1- Etape de génération de maillage par « Gambit ».....	30
2.4.2-Etapes de travail sur « Fluent » .....	33

## **Chapitre 03 : Etude numérique de la ventilation sans intégration de MCP**

<i>3.1-Introduction</i> .....	35
<i>3.2- Validation du modèle numérique</i> .....	35
<i>3.3- Simulation du séchoir solaire sans intégration de MCP:</i> .....	36
3.3.1-Méthodologie de simulation : .....	36
3.3.2-Effet de la nature ou type de cheminée : .....	38
3.3.3-Effet du positionnement de cheminée solaire:.....	42
3.3.4-Effet de la lame d'air (vitesse de ventilation):.....	44
<b>3.4-Conclusion</b> .....	46

## **Chapitre 04 : Simulation du séchoir solaire ventilé avec intégration de MCP**

<i>4.1- Introduction :</i> .....	47
<i>4.2- Etude de comportement thermique de séchoir solaire avec intégration de MCP au niveau du capteur d'admission</i> .....	48

<i>4.3- Etude du comportement thermique du séchoir solaire avec l'intégration de MCP au niveau de la cheminée solaire d'évacuation .....</i>	<i>52</i>
<i>4.4- Etude de comportement thermique de séchoir solaire avec l'intégration de MCP au niveau de capteur et au niveau de cheminée.....</i>	<i>57</i>
<i>4.5- Vérification de choix de la nature du matériau à changement de phase: ... ..</i>	<i>57</i>
Conclusion générale .....	63
Références	
Résumé	



## Liste des figures

Figure (1.1) : la cheminée ordinaire.....	4
Figure (1.2): Cheminée solaire pour ventilation de bâtiment .....	5
Figure (1.3) : Cheminée solaire verticale .....	6
Figure (1.4): Installation d'une cheminée solaire inclinée .....	6
Figure (1.5) : Classification des MCP proposée par Abhat .....	8
Figure (1.6): Différentes géométries utilisées pour la macro-encapsulation.....	9
Figure (1.7) : Conteneurs de MCP et la configuration du MCP. (a) coquille et le récipient de tube; (b) récipient cylindrique; (c) contenant rectangulaire.....	10
Figure (1.8) : le capteur solaire.....	11
Figure (1.9):Capteurs cylindro-paraboliques.....	12
Figure (1.10): capteur parabolique .....	12
Figure (1.11): Capteur plan vitré.....	13
Figure (1.12): Différents échanges thermiques dans un capteur plan.....	13
Figure (1.13): Séchoir solaire indirect .....	15
Figure (1.14): The temperature contour inside the solar chimney tower with zoom on the region between the collector and the chimney.....	16
Figure (1.15) :Le contour de température à l'intérieur de la tour de cheminée solaire avec un zoom sur le Région entre le collecteur et la cheminée .....	17
Figure (1.16): Position d'interface de front de fusion avec le temps (mettre la réf.) .....	18
Figure (1. 17):: Temps caractéristiques et densités énergétiques obtenus à la charge et à la décharge lors d'essais sur la section d'essais type tube acier à ailettes circulaires en aluminium .....	20
Figure (2. 1) : schéma du séchoir solaire avec cheminée ordinaire(A,B), et avec cheminée solaire (C) .....	21
Figure (2.2) : Variation de la température ambiante en fonction du temps.....	23
Figure (2.3) : Variation de l'intensité solaire en fonction du temps.....	24
Figure (2.4): Schéma du séchoir sans MCP .....	25
Figure (2.5): Schéma du séchoir avec MCP.....	26
Figure (2.6): Maillage adopté pour le présent cas d'étude.....	31
Figure (2.7): Le maillage de notre étude .....	32
Figure (2.8): Le maillage de notre étude .....	32
Figure (3.1) : Températures mesurées et simulées à la sortie capteur et sortie cheminée .....	36
Figure (3.2) : Schéma descriptif des endroits de mesure .....	37
Figure (3.3) : Diagramme des étapes de simulation .....	38
Figure (3.4) : Schéma descriptif : cheminée ordinaire (1), cheminée solaire(2):.....	39

<i>Figure (3.5) : Distribution de température à 14 h dans le séchoir pour les deux cheminées</i> .....	39
<i>Figure (3.6): Courbes des températures à la sortie du capteur et de la cheminée ordinaire</i> .....	40
<i>Figure (3.7): Courbes des températures à la sortie de capteur et de la cheminée solaire</i> .....	41
<i>Figure (3.8): Distribution des températures dans le séchoir pour les deux positionnements de la cheminée</i> .....	42
<i>Figure (3.9): Courbes des températures aux niveaux horizontaux avec une cheminée solaire centrée</i>	43
<i>Figure (3.10): Courbes des températures aux étages avec une cheminée solaire au Nord</i> .....	44
<i>Figure (3.11): Distribution des températures pour les différentes épaisseurs de la lame d'air</i> .....	44
<i>Figure (3.12) : Courbes des vitesses à la sortie de la cheminée solaire pour les différentes lames d'air</i> .....	45
<i>Figure (3.13) : Courbes des températures a la sortie de cheminée solaire pour les différentes lames d'air</i> .....	46
<i>Figure (4.1) : Schéma descriptif de séchoir avec intégration de MCP au capteur</i> .....	47
<i>Figure (4.2) : Champ de température au sein de séchoir dans le cas de capteur sans et avec MCP</i> ....	48
<i>Figure (4.3) : Température dans la chambre au niveau des étages</i> .....	49
<i>Figure (4.4) : Température a les sorties des (cheminée et capteur avec MCP)</i> .....	49
<i>c- Comparaison de la variation de température à la sortie de capteur et cheminée dans le cas de capteur avec MCP</i> .....	50
<i>Figure (4.5) : Courbes de la variation de température à la sortie de capteur (a), et de cheminée (b)</i> .	50
<i>Figure (4.6) : Schéma descriptif de séchoir avec intégration de MCP au niveau de cheminée solaire</i>	52
<i>Figure (4.7) : Champ de température au sein de séchoir dans le cas de cheminée solaire sans et avec MCP</i> .....	52
<i>Figure (4.8) : Température dans la chambre au niveau des étages horizontaux</i> .....	53
<i>Figure Figure (4.9) : Température dans la chambre au niveau des colonnes verticales</i> .....	53
<i>Figure (4.10) : Température à la sortie du capteur et la cheminée dans le cas de cheminée avec MCP</i> .....	54
<i>Figure (4.11) : Courbe de la variation de la vitesse à la sortie de cheminée dans le cas de cheminée solaire avec MCP</i> .....	54
<i>Figure (4.12) : Courbes de la variation de température à la sortie de capteur dans le cas de cheminé avec MCP</i> .....	55
<i>Figure (4.13) : Courbes de la variation de température a la sortie de cheminée dans le cas de cheminé avec MCP</i> .....	56
<i>Figure (4.14) : Variation de la température de l'absorbeur au cours de la journée</i> .....	58
<i>Figure (4.15) : Schéma descriptif du séchoir avec intégration de MCP au niveau des capteurs et cheminée solaire</i> .....	59
<i>Figure (4.16) : Champ de température au sein de séchoir dans le cas d'intégration de MCP dans le capteur et dans la cheminée</i> .....	59
<i>Figure (4.17) : Température dans la chambre au niveau des étages</i> .....	60

<i>Figure (4.18) : Température à la sortie de capteur dans le cas les deux avec MCP.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure (4.19) : Température à la sortie de la cheminée dans le cas les deux avec MCP.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure (4.20) : Courbe de la variation de la vitesse à la sortie de la cheminée dans le cas de MCP avec les deux emplacements.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure (4.21) : Fraction de liquide en fonction de temps pour MCP.....</i>	<i>62</i>

## *Liste des Tableaux*

<i>Tableau (1.1) : des différents types de séchoirs: .....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau (2.1) : Propriétés thermo-physiques des différents composants du capteur.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau (2.2): Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau (2.3) : Dimensions géométriques du capteur solaire .....</i>	<i>26</i>

# Nomenclature

## Lettres latines

Symbole	Désignation	Unité
H	Hauteur	M
L	Longueur du capteur	M
I	Rayonnement solaire	$W.m^{-2}$
T	Température	K
T <sub>a</sub>	Température ambiante	K
T <sub>0</sub>	Température de référence	K
P	Pression	Pa
P <sub>atm</sub>	Pression atmosphérique	Pa
h <sub>a</sub>	Coefficient de transfert thermique avec l'extérieur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
G	La gravité	$m.s^{-2}$
V <sub>vent</sub>	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
$\rho$	La masse volumique	$kg.m^{-3}$
$\rho_p$	Masse volumique du polystyrène	$kg.m^{-3}$
$\rho_c$	Masse volumique du cuivre	$kg.m^{-3}$
$\rho_A$	Masse volumique de l'aluminium	$kg.m^{-3}$
$\rho_{Ai}$	Masse volumique de l'acier inoxydable	$kg.m^{-3}$
$\lambda_v$	Conductivité thermique de verre	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_p$	Conductivité thermique du polystyrène	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\lambda_c$	Conductivité thermique du cuivre	$W.m^{-2}.K^{-1}$

$\lambda_A$	Conductivité thermique de l'aluminium	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\lambda_{Ai}$	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	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
B	Coefficient d'expansion thermique	$K^{-1}$

---

# ***INTRODUCTION***

## ***GENERALE***

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

De nos jours, les fluctuations des prix et la tendance d'épuisement des énergies fossiles font le recours au développement des énergies alternatives et renouvelables comme l'énergie solaire, plus que nécessaire. L'énergie solaire est la plus ancienne forme d'énergie utilisée par l'homme et devrait être celle qui s'imposera dans les temps futurs.

Pour les pays en voie de développement, on a pensé à sécher en exploitant l'énergie solaire méthode utilisée dans le passé et jusqu'au jour d'aujourd'hui, néanmoins il est à noter que l'efficacité des processus de séchage direct en ambiance naturelle est faible compte tenu des nombreux problèmes en relation avec la météorologie, les constituants du produit sensibles aux rayonnements ultra violets, la poussière, les insectes, etc.)

Le séchage solaire est donc un procédé de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage. Dans le séchage direct, les rayons solaires frappent directement les produits mais dans le type de séchage solaire indirect, le séchoir se compose de trois parties, la première partie c'est un capteur solaire plan à air, dont le but est de capter les rayons solaires et les transformer en énergie thermique, cette énergie est transportée avec l'air à la deuxième partie qui est la chambre de séchage où se trouve le produit à sécher, et la troisième partie est la cheminée solaire qui fait évacuer l'air humide vers l'extérieur pour renouveler l'air de séchage.

Une cheminée solaire, appelée également cheminée provençale ou cheminée thermique, est un dispositif permettant d'améliorer la ventilation naturelle d'un séchoir en utilisant le mouvement convectif de l'air chauffé passivement dans un conduit exposé au rayonnement solaire.

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.

Dans notre travail on présente une étude numérique dans le but d'évaluer les performances thermiques d'un séchoir solaire, sans et avec intégration des matériaux à changement de phase au niveau du capteur ou la cheminée ou simultanément dans les deux. Les calculs de simulation ont été conduits moyennant la méthode des volumes finis mise en œuvre sur le code de calcul CFD "Fluent" et utilisant un modèle en régime instationnaire permettant d'approcher au mieux le cas réel. A cet effet le MCP, avec différentes propriétés thermo-physiques, a été placé en-dessous de la plaque absorbante du capteur et de la cheminée solaire

afin de stocker l'énergie solaire d'une part et améliorer la ventilation naturelle du séchoir d'autre part, ce qui permet aussi la continuité du processus dans les heures peu ou non ensoleillées.

Le présent mémoire est structuré dans une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur l'état de l'art des cheminées solaires et les différentes utilisations des Matériaux à Changement de Phase (MCP) et les techniques des séchoirs solaires. Dans le deuxième chapitre, nous présentons le logiciel de travail et la méthodologie de traitement. Dans le troisième chapitre nous présentons la discussion des résultats de simulation du séchoir sans intégration de MCP avec les différentes configurations et positionnements de la cheminée. Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation du séchoir avec l'intégration des MCP dans les différentes parties du système de séchage (capteur et cheminée solaire) et leur comparaison avec le cas initial sans intégration de MCP. En fin dans la conclusion, on présente un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.



# *Chapitre 01*

---

*Etude bibliographique sur les  
cheminées solaires et les MCP*

---

## **Chapitre I: Etude bibliographique sur les cheminées solaires et les MCP**

### **1.1-Introduction**

Plusieurs solutions sont proposées pour le stockage saisonnier de nombreux produits agro-alimentaires : la congélation, la culture sous serre, le traitement chimique et le séchage.

Le but de l'opération de séchage est d'éliminer ou bien évaporer l'eau qui se trouve à l'intérieur du produit. Cette opération peut être assurée par plusieurs méthodes par exemple : l'exposition au soleil et également par l'utilisation de l'air chauffé sous l'action du rayonnement solaire comme une source de chaleur, dont le procédé est effectué dans une chambre bien isolée thermiquement pour assurer l'opération de séchage. [1]

Dans ce chapitre on s'intéresse à aux connaissances actuelles relatives au contexte de notre étude et ainsi à la revue bibliographique faisant état sur le problème. Une première partie se focalise sur la définition de la cheminée, son effet et ses différentes configurations. Ensuite, un état de l'art sur les différents types des matériaux à changement de phase (MCP) qui permettra de faire le point sur les matériaux les plus couramment employés. Les critères de sélection sont aussi présentés et discutés. Enfin, des généralités sur les capteurs solaires et les séchoirs solaires seront aussi exposés.

### **1.2- Etat de l'art sur les cheminées ordinaires et solaires**

#### **1.2.1-Définition de la cheminée :**

Cheminée désigne à l'origine la construction qui reçoit le matériau combustible et la flamme ainsi que le conduit permettant d'évacuer les gaz brûlés. La cheminée est une idée attrayante pour beaucoup de chercheurs dans différents champs. En vue d'améliorer la ventilation naturelle, différentes configurations de la cheminée ont été étudiées et expérimentées. Le présent chapitre décrit ces différentes configurations de la cheminée.

#### **1.2.2-Principe physique de la cheminée :**

L'effet de la cheminée est la tendance d'un fluide qu'en s'échauffant s'élève, en raison de la diminution de sa densité, résultant des différences de la température et d'humidité. On utilise ce phénomène thermique naturel pour évacuer la surchauffe de l'intérieur d'une construction en facilitant la sortie de l'air tiède ou chaud à travers des ouvrants en partie haute. Ce tirage thermique peut induire une dépression intérieure susceptible d'aspirer l'air plus frais du dehors à travers des ouvrants en partie basse [2]

### 1.2.3- Différentes configurations d'une cheminée :

On peut classer les cheminées par de nombreux critères, dont la forme générale de la cheminée, le mode de fonctionnement, le positionnement. Actuellement, on peut distinguer deux types de cheminées :

- a) Cheminée ordinaire
- b) Cheminée solaire

#### a) Cheminée ordinaire

Les cheminées utilisées sur les séchoirs solaires à circulation naturelle sont de simples conduits cylindriques posés sur le dessus de la chambre de séchage. Bien qu'elles aient pour rôle d'accroître la circulation d'air à cause de la colonne d'air chaud qu'elles produisent (par rapport à l'air ambiant à l'extérieur de la cheminée), on les soupçonne en réalité de diminuer la circulation d'air pour diverses raisons. [3]

Elles ont été ajoutées à la structure afin d'activer l'écoulement de l'air chaud vers le haut. De plus, les séchoirs à cheminée étaient également pourvus d'une section conique à l'entrée pour mieux diriger l'air de l'extérieur vers l'intérieur du séchoir. [4]



Figure (1.1): la cheminée ordinaire [5]

#### b) La cheminée solaire :

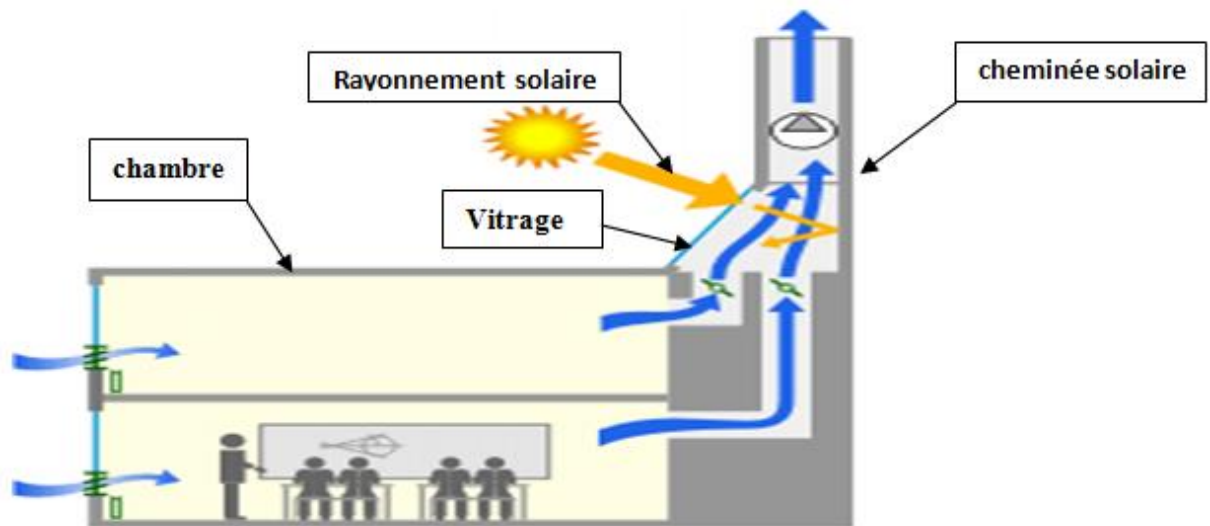
Les cheminées solaires sont un genre de technologies d'énergie renouvelable, qui augmentent la ventilation naturelle dans les bâtiments. Elles se composent habituellement d'une vitre, d'une cavité, et d'un mur massif qui absorbe l'énergie solaire. L'air dans la cheminée est

réchauffé par l'énergie solaire, et coule vers le haut en raison de la force d'Archimède. Cela peut être une force d'entraînement pour amplifier la ventilation naturelle [6]. Cette technique peut être aussi appliquée pour la ventilation naturelle des séchoirs solaires.

- **Les constituants d'une cheminée solaire**

Les principaux composants de la cheminée solaire présentée sur la figure (1.2) sont :

- La couverture transparente (la vitre).
- L'absorbeur.
- L'isolation thermique sur les trois parois de la cheminée.
- Le coffre ou le cadre.



**Figure (1.2): Cheminée solaire pour ventilation de bâtiment [7]**

- **Types de cheminées solaires :**

Actuellement, on peut distinguer deux types de cheminées solaires :

- a) **Cheminée solaire verticale :**

Ce type est le plus rencontré, où l'entrée d'air se fait par l'ouverture au fond et la sortie par l'ouverture au dessus. Par convention, trois types de cheminées sont dénotés selon l'admission Figure (1.3). Le positionnement de l'ouverture d'admission représente trois manières possibles, d'intégrer la cheminée solaire dans un bâtiment pour la ventilation naturelle.[8]

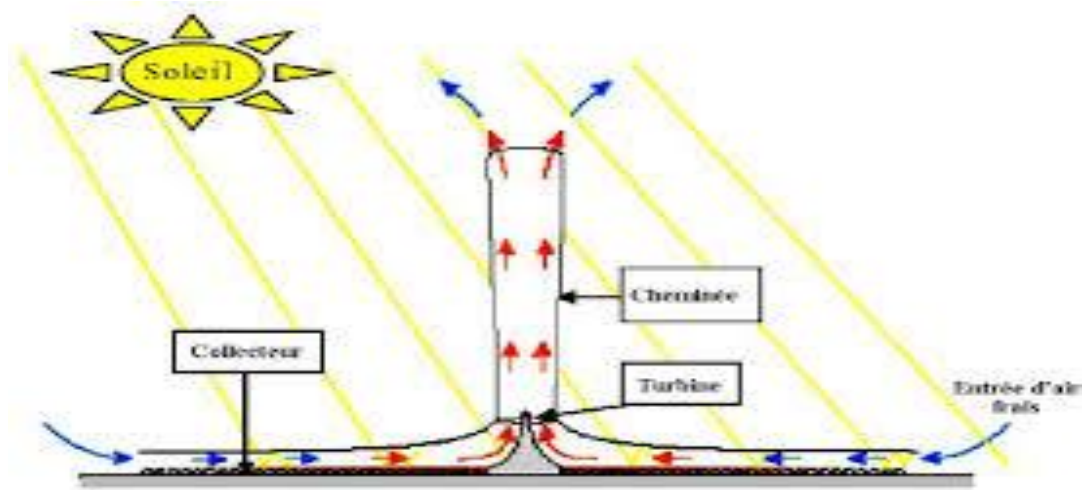


Figure (1.3) : Cheminée solaire verticale [9]

### b) Cheminée solaire inclinée :

Conceptuellement, les cheminées solaires inclinées sont semblables aux cheminées solaires verticales. La seule différence est qu'elles sont intégrées d'une façon inclinée à un certain angle approprié, pour capturer le maximum de rayonnement solaire possible.

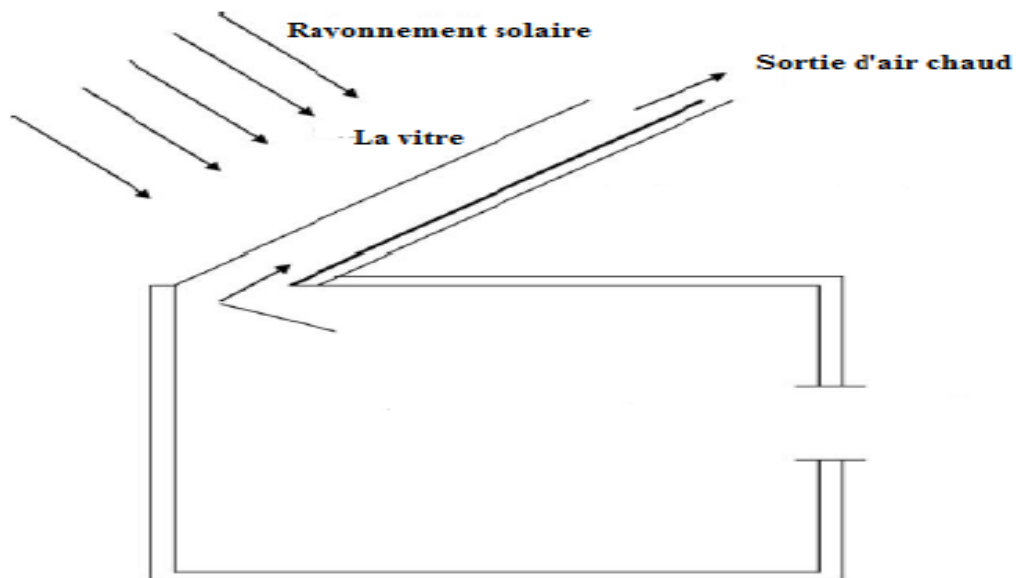


Figure (1.4): Installation d'une cheminée solaire inclinée [10].

## **1.3-Utilisation des matériaux MCP dans les systèmes de séchage.**

### **1.3.1-Généralités sur les MCP**

#### **1.3.1.1-Stockage thermique**

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes:

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase.
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption [11]

#### **1.3.2-Les matériaux à changement de phase (MCP):**

Les matériaux à changement de phase (en anglais PCM : Phase Change Material) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa [12].

Les Matériaux à Changement de Phase, appelés communément « MCP » sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci [13].

On peut classer les MCP selon leur nature chimique en trois grandes catégories :

- Les MCP organiques : paraffines, corps non-paraffiniques, polyacools.
- Les MCP inorganique : hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- Les MCP eutectiques: Composés organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique [14].

Les matériaux à changement de phase sont utilisés dans différents domaines : le stockage d'énergie solaire, le refroidissement des boîtes de transport de produits sensibles, les systèmes de mémoires permanentes en informatique, les systèmes de climatisation (liquide frigorigènes), l'industrie textile (par exemple les vêtements) ainsi que dans le domaine de la construction des bâtiments où ils sont utilisés dans les systèmes passifs et actifs [12].

### 1.3.3-Critère de sélection d'un bon MCP

La sélection d'un MCP nécessite de se poser les bonnes questions quant à l'application et l'implantation du système de stockage futur. Une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs afin de choisir au mieux un matériau pour une application spécifique [15-16].

- ✓ Propriétés thermo-physiques
- ✓ Les propriétés thermiques
- ✓ Les propriétés physiques
- ✓ Propriétés cinétiques et chimiques

### 1.3.4- Types de MCP

En 1983, Abhat [17] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure (1.5)

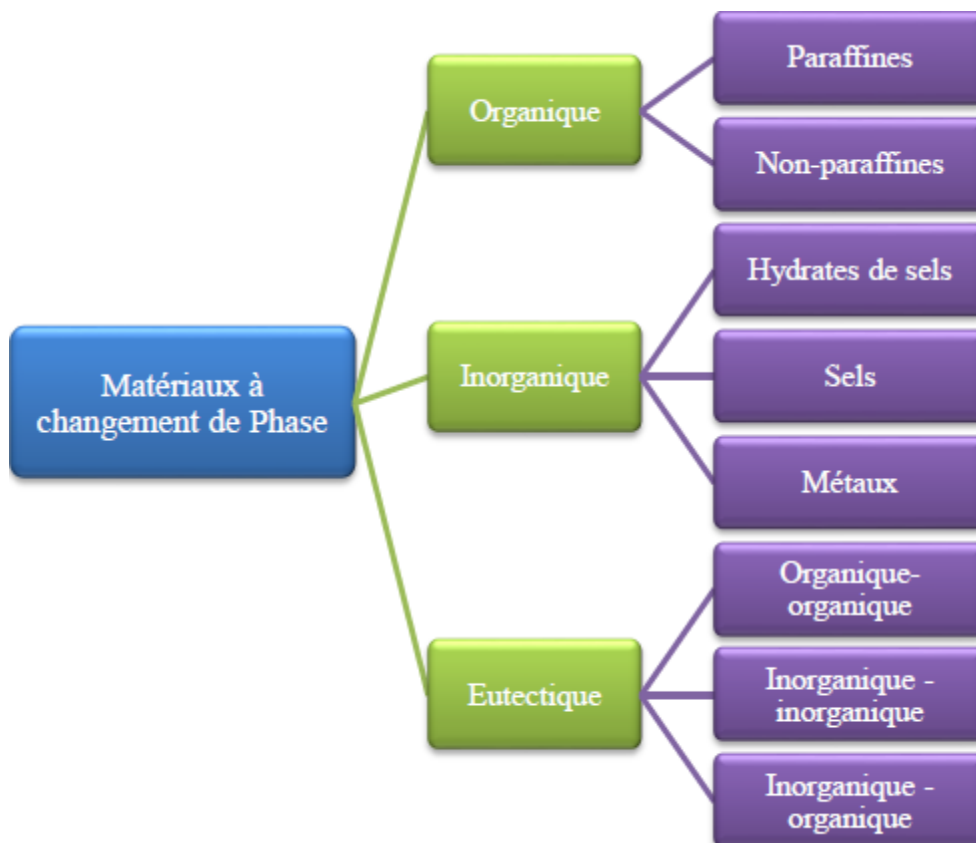


Figure (1.5) : Classification des MCP proposée par Abhat [17]

Les différents sous-groupes de MCP présentent des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception du système de stockage thermique pour une application donnée.

### 1.3.5-Les choix de la capsule de MCP :

Le choix de la capsule dépend essentiellement de l'application envisagée. Les capsules flexibles en plastique ont été développées pour les applications à basse température. Pour les applications à plus haute température, les capsules en métal (acier, cuivre, aluminium), plus robustes, sont préférées. La rigidité des capsules en métal rend la gestion de la pression à l'intérieur plus compliquée à cause de l'expansion volumique du MCP lors de la fusion. Dans ce cas, environ 20 % du volume de la capsule est laissé vide pour permettre au MCP de fondre sans générer de surpressions et ainsi limiter les risques de fuites [17]. Une publication plus récente propose cependant une nouvelle technique d'encapsulation pour limiter la part de vide nécessaire à l'expansion volumique [18].

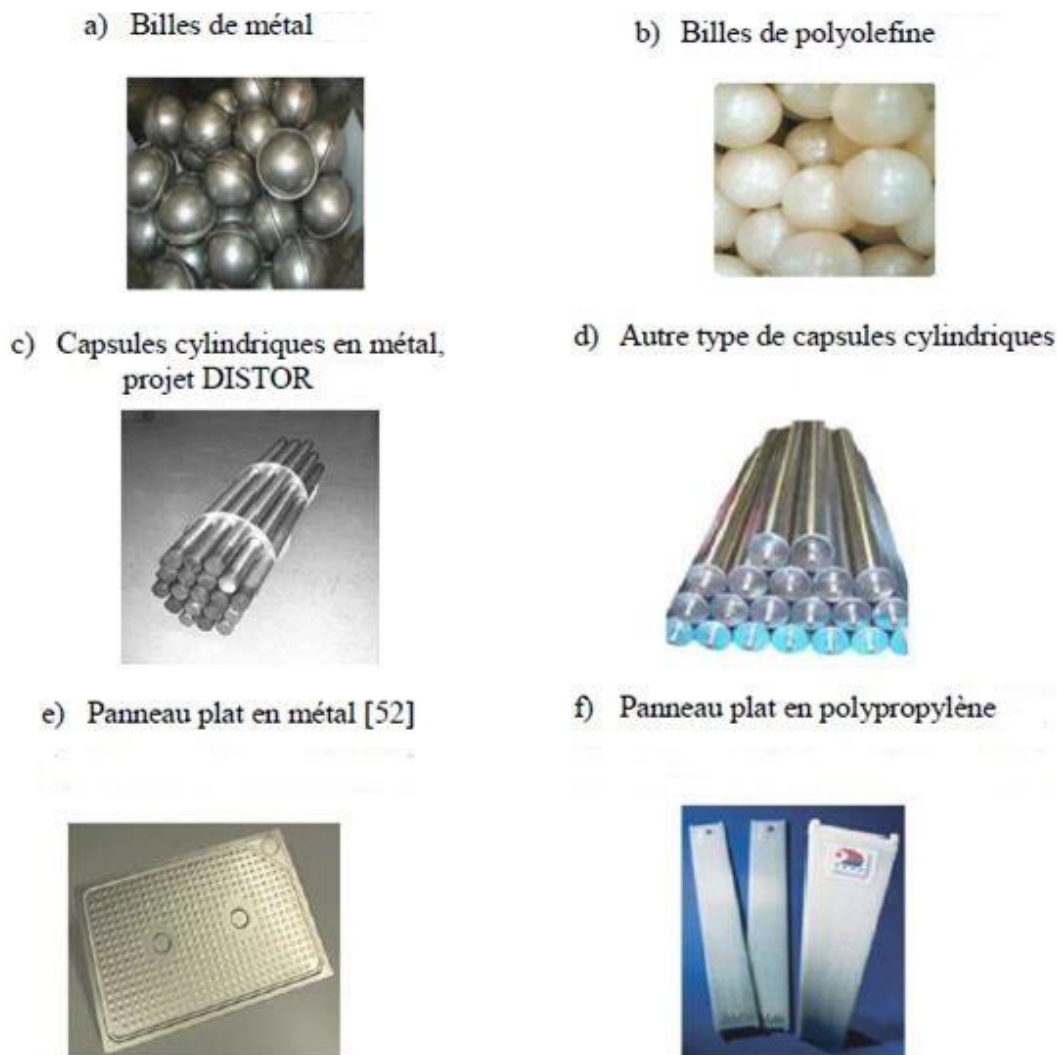
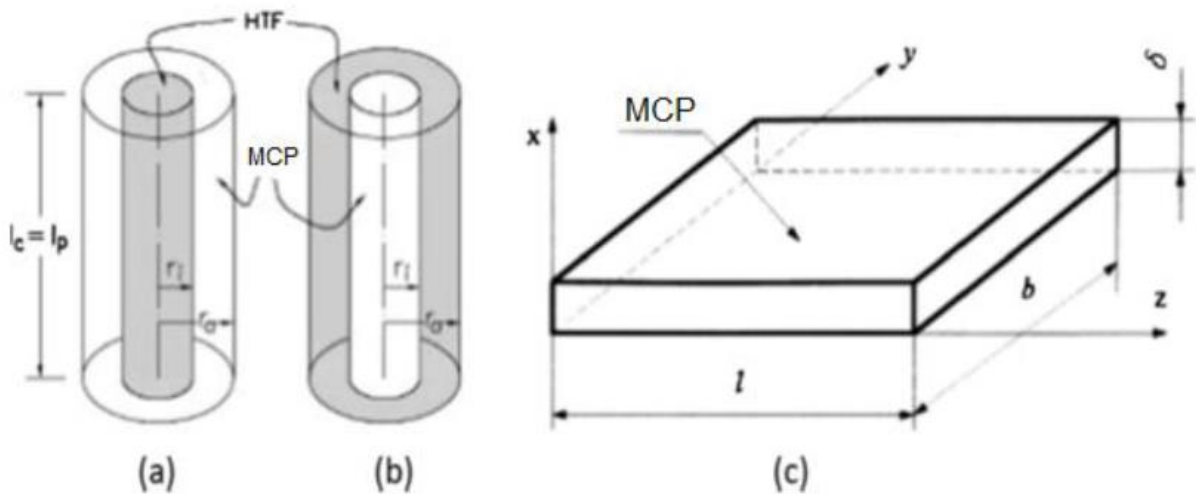


Figure (1.6): Différentes géométries utilisées pour la macro-encapsulation [11]



### 1.3.6- Différentes formes des matériaux à changement de phase

Il doit y avoir un échange de chaleur efficace entre le MCP et le fluide caloporteur afin d'avoir un grand aller-retour pour l'efficacité du stockage d'énergie. Par conséquent, les MCP sont généralement contenus de manière à assurer une grande surface de transfert de chaleur et donc un coefficient de transfert de chaleur par convection élevé entre le Pack MCP et le fluide caloporteur. La figure. (1.7.a) présente une coquille d'un MCP réceptif avec le fluide caloporteur dans un tube. La Figure (1.7.b) présente un réceptif de MCP cylindrique avec fluide caloporteur écoulant autour et la Figure (1.7.c) montre un réceptif plaque de MCP rectangulaire tel que le fluide caloporteur peut circuler autour [19]



**Figure (1.7) :** Conteneurs de MCP et la configuration du MCP. (a) coquille et le réceptif de tube ; (b) réceptif cylindrique ; (c) contenant rectangulaire [19]

## 1.4- Les Capteurs solaires

### 1.4.1-Définition :

Les capteurs solaires thermiques transmettent directement le rayonnement solaire capté par une surface que l'on appelle surface absorbante sous forme de chaleur à un fluide caloporteur, liquide (par exemple l'eau chaude sanitaire ou le chauffage d'habitats) ou gazeux (généralement de l'air si l'application du capteur est au domaine de séchage) tel que figure (1.8).

Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire, ce dernier arrive au niveau du couvert et le traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noire, appelé absorbeur. L'absorbeur va absorber une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température. Le

rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé [20]



**Figure (1.8) : le capteur solaire [21]**

#### **1.4.2- Différents types des capteurs solaires**

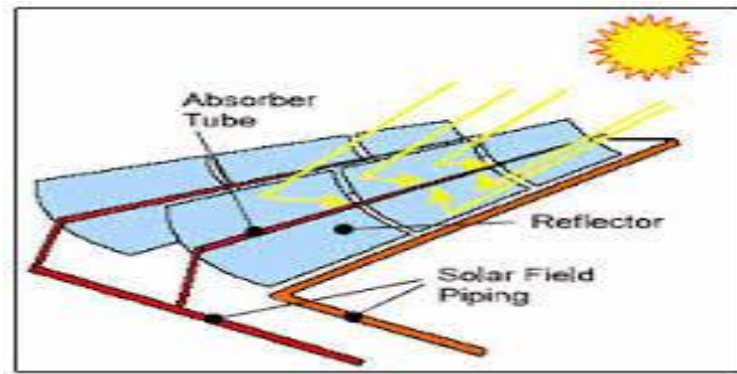
Les capteurs solaires peuvent se présenter en plusieurs formes et tailles pour répondre aux besoins d'utilisation de l'énergie solaire et selon la température requise pour le domaine d'application. Ils peuvent être classés en deux types : concentration et non concentration. [22]

##### **a) Capteurs à concentration**

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent de rayonnement solaire ainsi concentrée. [23]

##### **b) Capteur cylindro-parabolique**

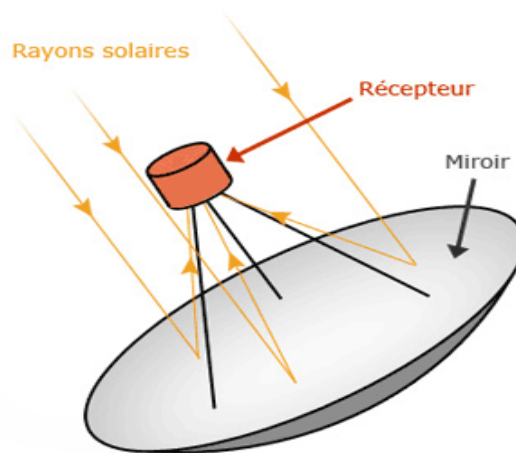
C'est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Les miroirs cylindro-paraboliques alignés concentrent la chaleur. Le circuit du fluide caloporteur passe au centre de chaque miroir et traverse l'ensemble du champ des capteurs [24].



**Figure (1.9): Capteurs cylindro-paraboliques [24]**

### c) Capteur parabolique

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur deux axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. [24]



**Figure (1.10) : Capteur parabolique [24] .**

### d) Capteurs solaires plan (non concentration)

Les capteurs à surfaces planes reçoivent directement le rayonnement solaire à partir du soleil. [25].

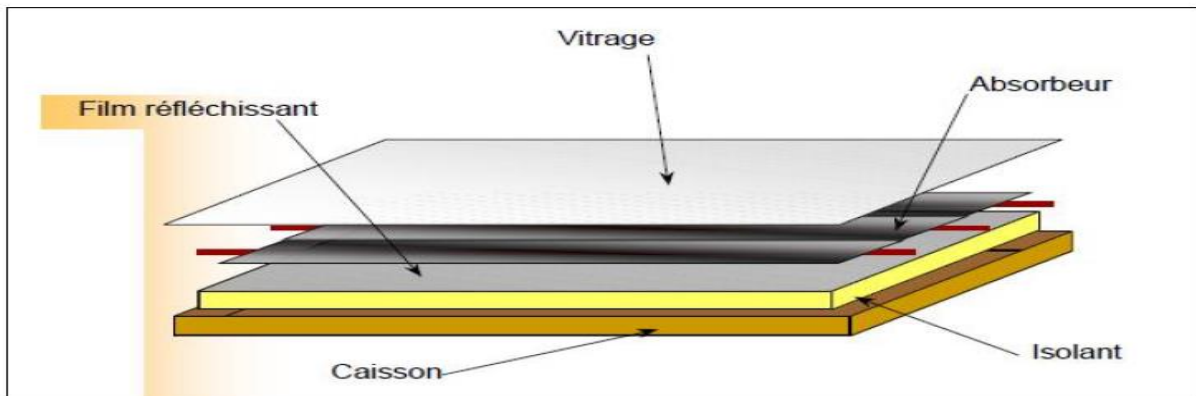
- **Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan**

Trois fonctions incombent à ces capteurs, absorber le rayonnement solaire, le transformer en chaleur et transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse ; cette surface doit être dotée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible [22].

- **Composants du capteur solaire plan**

Chaque ensemble capteur est constitué :

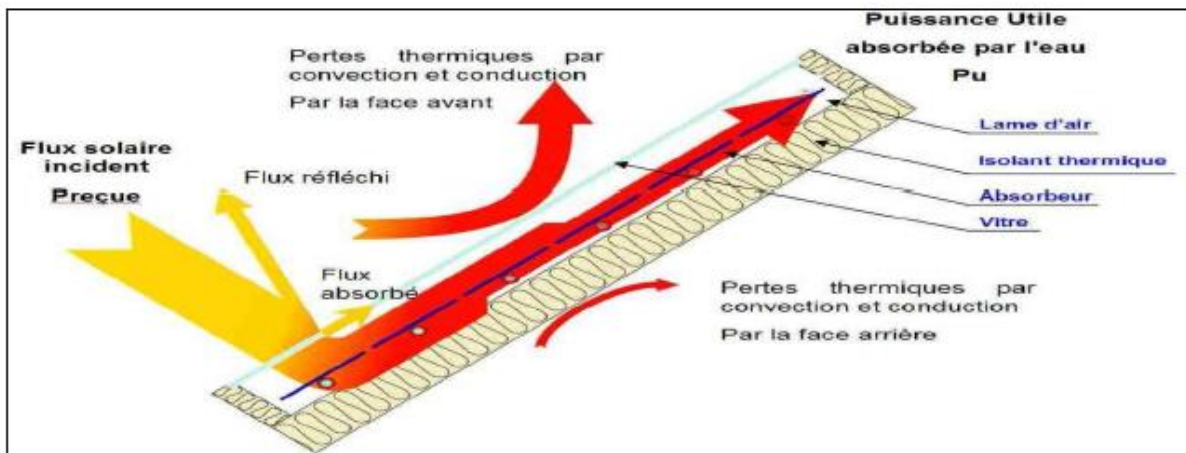
- D'une couverture transparente
- D'un absorbeur avec circuit échangeur et revêtement de surface
- D'une isolation thermique sur les côtés et à l'arrière de l'absorbeur
- D'un cadre et d'un coffre.



**Figure (1.11): Capteur plan vitré**

#### 1.4.3-Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure II.3).



**Figure (1.12): Différents échanges thermiques dans un capteur plan [20]**

#### 1.4.4-Domaine 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. [26]



Le séchage, opération importante dans toute transformation de produits issus de l'industrie agro-alimentaire, est un procédé grand consommateur d'énergie. Cela explique le recours de plus en plus fréquent aux énergies renouvelables et principalement l'énergie solaire par l'utilisation des séchoirs solaires, fonctionnant souvent avec des capteurs solaires plans.

### 1.5- Les séchoirs solaires :


Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement [27] en plusieurs catégories :

- Les séchoirs solaires directs.
- Les séchoirs solaires indirects.
- Les séchoirs solaires hybrides.
- Les séchoirs solaires mixtes

**Tableau (1.1) : des différents types de séchoirs**

Fonctionnement schématique	Type de Séchage	Caractéristiques
	Séchage naturel ou au soleil [28]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très faible cout</li> <li>-Travail important</li> <li>-Perte de produit</li> </ul>
	Séchage solaire direct [29]	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Produit protégé</li> <li>-Séchage rapide</li> <li>-Une certaine dégradation produit</li> </ul>



	<p>Séchage solaire indirect [30]</p>	<p>-Produit parfaitement protégé et non égradé</p> <p>-Séchage assez rapide</p> <p>-Cout et complexité plus importants</p>
---	--------------------------------------	--

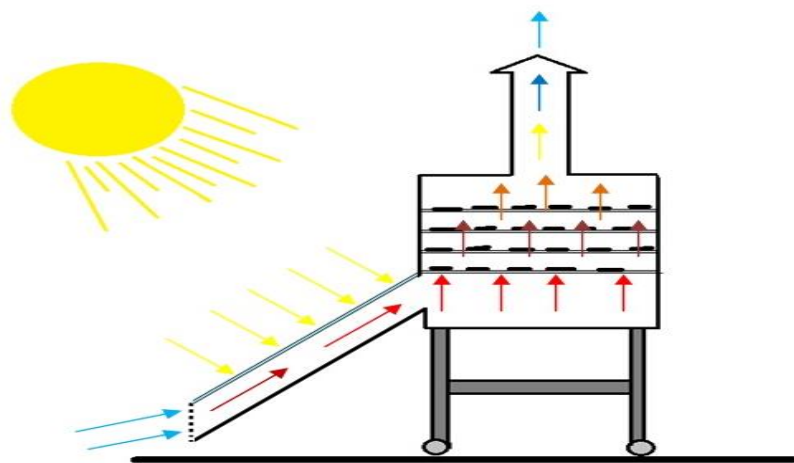
**Tableau (1.1) : des différents types de séchoirs**

### 1.5.1- Les séchoirs solaires indirects

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect et sa valeur nutritive [31]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

#### 1.5.1.1- Principe de fonctionnement

Le séchoir solaire indirect se compose de parties : un collecteur (capteur) qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée figure (1.13). L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte, par convection naturelle ou forcée, jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques et la nature et l'état initial du produit séché.



**Figure (1.13): Séchoir solaire indirect**

## 1.6-Aperçu bibliographique sur l'intégration des MCP dans le domaine de séchage solaire

La performance thermique de la cheminée solaire est très important c'est pour ça Shuli Liu, YongcaiLi[32], étudient expérimentalement la performance thermique d'une cheminée solaire sans et avec un matériau de changement de phase (MCP). Pour le cas de la cheminée solaire avec PCM, trois modes différents ont été testés : mode de chargement entièrement fermé, mode de chargement ouvert en partie et mode de chargement ouvert. Le mode fermé a été conçu pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire lorsque le chauffage n'est pas nécessaire. Alors que le mode ouvert a été conçu pour fournir l'air chauffé à l'espace de vie pendant le chargement période. Les résultats ont montré que l'inclusion de (MCP) dans une cheminée solaire réduirait le débit d'air pendant Période de charge, mais augmentent pendant la période de déchargement par rapport à la cheminée solaire sans (MCP). Pour le mode en partie ouverte, le débit d'air moyen pendant la période de changement de phase n'était que de 0,036 kg/s, qui étaient inférieur à celui du mode de chargement entièrement fermé (0,041 kg/s). En ce qui concerne l'ouverture complète Mode de charge, le temps de fusion du PCM était de près de 11 h, soit 57% de plus que celui pour mode fermé. Le débit d'air moyen pendant la période de changement de phase était de 0,04 kg / s, ce qui était supérieur à cela pour le mode partiellement ouvert mais inférieur à celui du mode fermé.

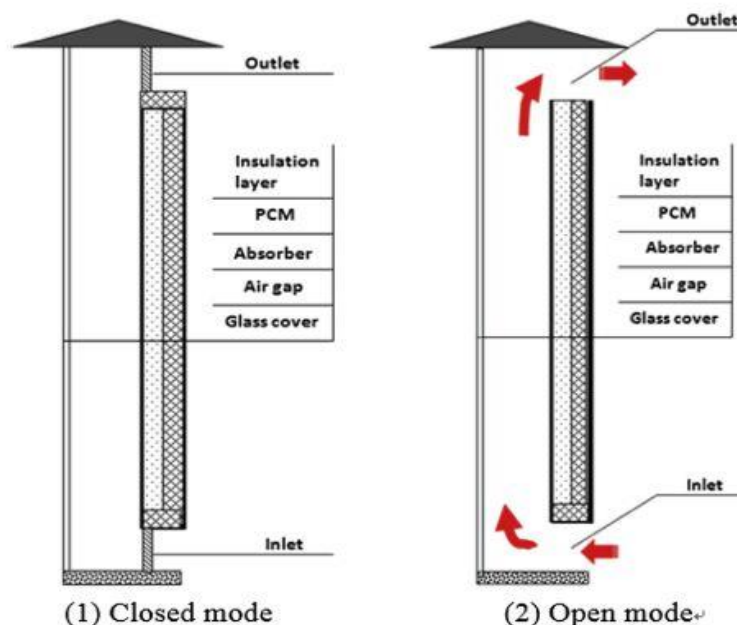


Figure (1.14): The temperature contour inside the solar chimney tower with zoom on the region between the collector and the chimney

Au sein de ce travail cela qui s'intéresse à la cheminée solaire, Amos Madhlopa [33] a étudié une pièce avec une cheminée solaire intégrée au mur en utilisant le logiciel ESP-r. La cheminée solaire et une fenêtre ont fait face à l'équateur dans neuf stations météorologiques échantillonnées à travers le monde. La simulation a été effectuée avec et sans la cheminée dans un ensemble donné de conditions météorologiques. De plus, la cheminée était mise en œuvre avec et sans contrôle de l'écoulement d'air. Les résultats montrent que le contrôle du flux d'air dans la cheminée a réduit la charge thermique totale annuelle à tous les sites météorologiques, tandis que la cheminée avec un flux d'air incontrôlé a augmenté la charge thermique totale dans deux des sites étudiés. Il a été donc conclu que:

A) la régulation du débit d'air dans une cheminée solaire diminue la charge thermique totale

B) une cheminée solaire sans contrôle de l'écoulement d'air peut réduire ou augmenter la charge thermique dans un environnement bâti, selon le climat en vigueur.

Mohammad O. Hamdan et SaudKhashan [34] ont présenté des résultats de simulation numériques pour un flux d'air constant à l'intérieur d'une centrale électrique à cheminée solaire. Un modèle de turbulence k-epsilon standard est utilisé Pour modéliser un prototype de cheminée solaire qui a été construit à Al Ain aux Émirats arabes unis. La cheminée La tour a une hauteur de 8,25 m et un diamètre de 24 cm qui sert à dessiner de l'air à partir d'un Collecteur solaire qui couvre 100 m<sup>2</sup> de surface. L'analyse CFD est utilisée pour déterminer l'emplacement de la turbine en utilisant la quantité d'énergie disponible. Les données CFD montrent que la hauteur du collecteur et la taille de la cheminée sont très importantes. Dans la conception actuelle, la petite taille de la cheminée a produit une zone stagnante à l'intérieur du collecteur ce qui a réduit le débit d'air à l'intérieur de la cheminée solaire.

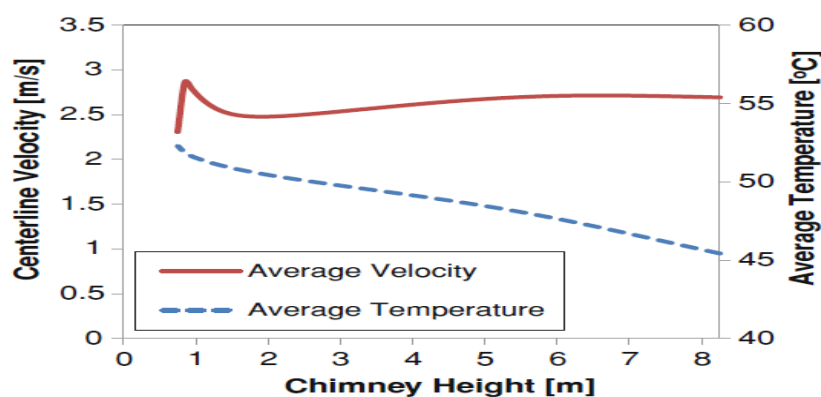


Figure (1.15) :Le contour de température à l'intérieur de la tour de cheminée solaire avec un zoom sur le Région entre le collecteur et la cheminée



N. PASUMARTHI et S. A. SHERIF [35] ont développé un modèle mathématique capable de prédire la performance des systèmes de cheminée solaire. Le modèle est capable d'estimer la température et la puissance de sortie des cheminées solaires en examinant l'état des différentes conditions ambiantes et des dimensions structurales sur la puissance de sortie. Le modèle sera utilisé pour prédire la performance du prototype de démonstration construit à Gainesville, en Floride.

De toute évidence, B. ABOUELKHAYRAT [36] ont étudié l'effet des fluctuations extérieures de la température dans les bâtiments intérieurs est causé soit par une importante entrée solaire pendant l'été, soit par une chute de température pendant l'hiver. Ces fluctuations peuvent être réduites en stockant la chaleur transmise sous la forme latente dans les matériaux de changement de phase PCM. Cela garantit une bonne situation de confort thermique pendant tous les mois de l'année. Dans ce travail, le comportement thermique de deux systèmes de toiture est étudié en deux périodes différentes : l'été et l'hiver. Un toit est constitué uniquement par des matériaux habituels dans la construction. Dans l'autre, les matériaux de changement de phase sont introduits dans différentes positions et avec différentes épaisseurs afin d'optimiser un toit capable de minimiser autant que possible les oscillations de la température extérieure, en raison du changement climatique. Le modèle numérique monodimensionnel, validé analytiquement et expérimentalement, permet d'effectuer des analyses paramétriques pour déterminer les dimensions et les caractéristiques des couches dans lesquelles les toits sont formés indépendamment de l'été ou de l'hiver.

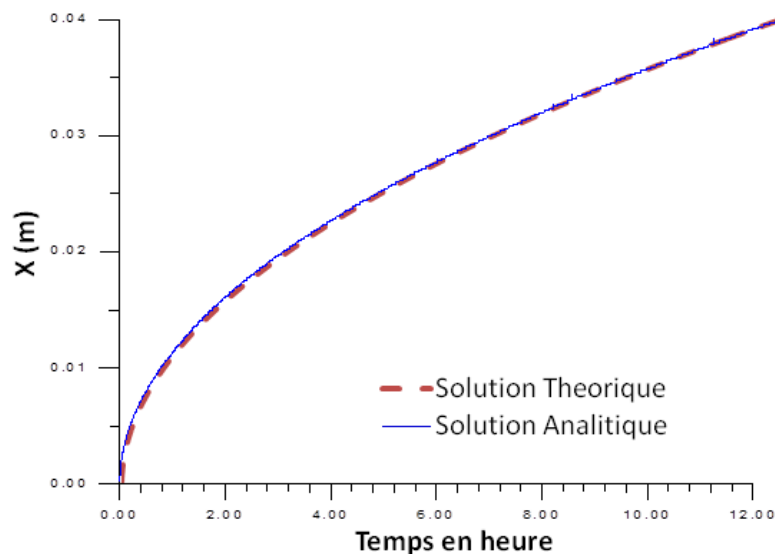


Figure (1.16) : Position d'interface de front de fusion avec le temps (mettre la réf.)

Au sein de ce travail, BOURGUBA Djaoued et BEKKOUCHE Ismail [37] ont étudié le stockage de l'énergie solaire par la chaleur latente avec une simulation numérique réalisée par le code Fluent. Nous avons effectué plusieurs simulations avec des échangeurs cylindriques remplis d'un matériau de changement de phase (PCM) à l'intérieur d'un tuyau d'eau traversant pour stocker la chaleur pendant les périodes de soleil et de récupérer pendant les périodes de déficit, une comparaison entre différents types d'échangeurs de chaleur et les configurations ainsi que l'effet de Le débit d'eau sur le stockage et le déstockage de l'énergie solaire ont été présentés.

Dans sa thèse de doctorat, Adèle SOUPART-CARON [38], traite de la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et du développement d'un système de stockage d'énergie thermique pour l'application de récupération de chaleur industrielle. L'utilisation de matériaux de changement de phase (MCP) est attrayante pour sa haute densité de stockage et sa possibilité de fournir de la chaleur à température constante. Cependant, la faible conductivité thermique de MCP conduit à développer des méthodes d'amélioration du transfert de chaleur, telles que des échangeurs de chaleur avec une surface de transfert de chaleur accrue. L'objectif est de caractériser le comportement de ces échangeurs de chaleur. Une étude expérimentale, où quatre différents échangeurs de chaleur ont été testés avec des orientations différentes (horizontales / verticales) et des types d'injection (vers le haut / vers le bas), ont souligné l'impact de la convection naturelle pendant le processus de fusion et la contraction du volume lors de la solidification. Ces résultats ont été validés par un modèle numérique en 3D. Une méthode de comparaison de performance basée sur un calcul d'énergie à travers un maillage expérimental est proposée et permet de sélectionner un échangeur de chaleur sur des critères tels que la densité de stockage, le temps caractéristique et le coût.

Trois PCM, adaptés à notre application, ont été testés à la température prévue (100-200 ° C) en les intégrant dans un système de stockage en tube d'acier inoxydable à ailettes circulaires en aluminium. Leur capacité à résister aux cycles répétés a été évaluée et leur comportement a été comparé. Le mélange de sels, H105 ( $T_{\text{fusion}} = 122 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), n'est pas sélectionné pour l'application en raison de sa faible densité de stockage ( $\approx 56 \text{ kWh / m}^3$ ) et de sa grande zone de fusion. L'acide sébacique ( $T_{\text{fusion}} = 132 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a un comportement répétitif avec des cycles et une densité de stockage plus élevée ( $\approx 66 \text{ kWh / m}^3$ ) et est approprié comme matériau de stockage. L'alcool de sucre, l'érythritol ( $T_{\text{fusion}} = 118 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a de bonnes propriétés thermodynamiques ( $128 \text{ kWh / m}^3$ ), mais le contrôle de cristallisation est un point clé pour l'utiliser comme PCM.

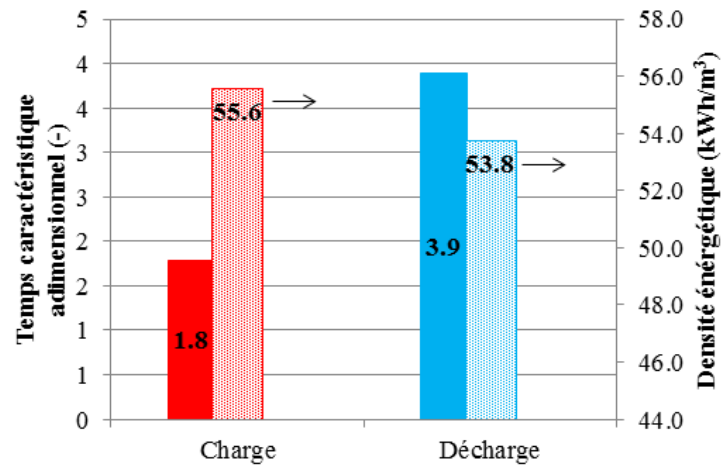


Figure (1.17) : Temps caractéristiques et densités énergétiques obtenus à la charge et à la décharge lors d'essais sur la section d'essais type tube acier à ailettes circulaires en aluminium

### 1.7- Problématique de la présente étude

Le travail proposé dans ce mémoire concerne l'étude par simulation numérique d'une cheminée solaire intégrée avec une couche de matériau à changement de phase et destinée à la ventilation naturelle d'un séchoir solaire indirect. En effet l'extraction de l'air humide de la chambre d'un séchoir est une opération permettant d'éviter la saturation de l'air et préserver le pouvoir évaporatoire de l'air de séchage dans un niveau permettant la continuité du processus de séchage. Le bon choix et la conception adéquate de la cheminée d'extraction peuvent influencer la qualité des produits séchés par amélioration de l'homogénéité des champs de températures et vitesses. La durée de séchage et donc le coût du traitement peuvent aussi être améliorés par l'augmentation de la vitesse d'extraction.

# *Chapitre 02*

---

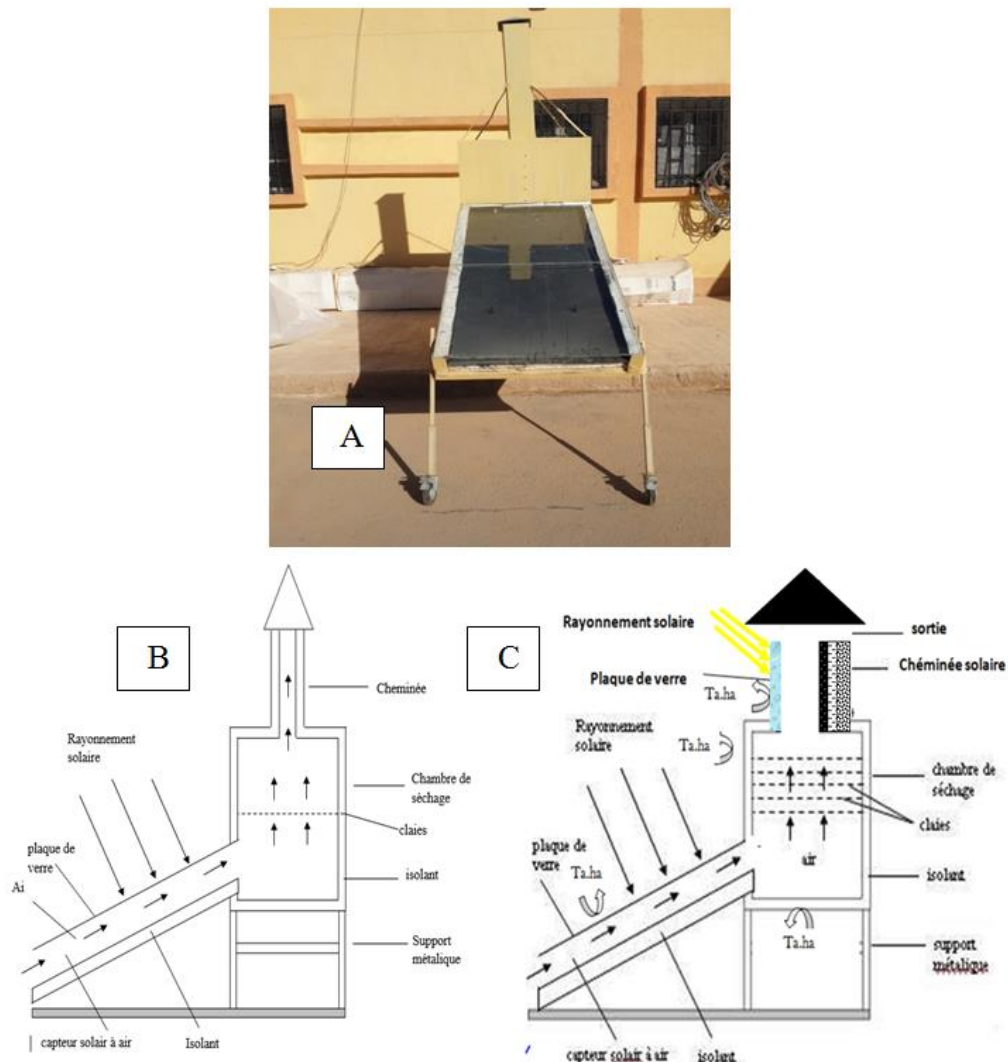
*Présentation du logiciel de  
travail et la méthodologie de  
traitement*

---

## Chapitre 2: Présentation du logiciel de travail et la méthodologie de traitement

### 2.1-Présentation du prototype de séchage :

Dans cette étude nous avons utilisé un séchoir solaire indirect à convection naturelle conçu et réalisé au laboratoire LENREZA à l'université Kasdi Merbah Ouargla.



**Figure (2. 1) :** Schéma du séchoir solaire avec cheminée ordinaire (A, B), et avec cheminée solaire (C) [37].

#### 2.1.1- Le capteur solaire

Le capteur solaire est un capteur plan à air de longueur de 2 m, une largeur de 1 m, et la hauteur est de 0,13 m. Le capteur est recouvert d'une plaque de verre d'épaisseur de 0,004 m, au-dessous de cette plaque et à une distance de 0,06 m est déposée une plaque d'aluminium peinte en noire mate qui sert d'absorbeur, les côtés latéraux, et la partie inférieure sont isolés

thermiquement avec le polystyrène. Le capteur est incliné d'un angle de  $31^\circ$  par rapport au plan horizontal et orienté plein sud.

### 2.1.2- La chambre de séchage

La chambre de séchage est une boîte galvanisée de forme cubique, de hauteur 1 m, de profondeur de 0,8 m, les parois latérales, et les parties inférieures et supérieures sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est munie d'une cheminée de section carrée fabriquée avec des feuilles galvanisées de hauteur 1 m, les côtés de 0,020 m, les parties latérales sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est posée sur un support métallique et les produits sont déposés à l'intérieur de la boîte sur une claie de forme rectangulaire composée d'un cadre en métal sur lequel est fixé un grillage pour permettre le passage de l'air.

### 2.1.3- La cheminée

La cheminée est un conduit cylindrique posé sur le dessus de la chambre de séchage, de hauteur 1 m, et de largeur 0.085 m. Les parois latérales et les parties inférieures et supérieures sont isolées thermiquement.

### 2.1.4- Propriétés thermo-physiques :

Les propriétés thermo-physiques des éléments constituant le séchoir ainsi que les propriétés des matériaux MCP à envisager dans cette étude, sont exposées dans les tableaux (2.1) et (2.2) ci-dessous.

**Tableau (2.1) :** Propriétés thermo-physiques des différents composants du capteur [38] [39]:

Matériaux	Propriétés physiques					
	Masse volumique		Conductivité thermique		Chaleur spécifique	
	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs
Verre	$\rho_v$	2500	$\lambda_v$	0.81	$C_v$	840
Polystyrène	$\rho_p$	700	$\lambda_p$	0.320	$C_p$	2310
Cuivre	$\rho_c$	8954	$\lambda_c$	383	$C_c$	386
Aluminium	$\rho_A$	2719	$\lambda_A$	202.4	$C_A$	871
Acier inoxydable	$\rho_{Ai}$	7850	$\lambda_{Ai}$	15	$C_{Ai}$	460

**Tableau (2.2):** Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations [40-41] :

MCP	Les propriétés Thermo-physiques				
	Température de fusion [K]	Chaleur Latente [KJ/Kg]	La masse volumique [Kg/m3]	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]
Paraffine	345	224	772 ,2	0 ,335	2800
Paraffine	333	213	778	0,15	2340
Paraffine wax	326,5	266	780	0,21	2500
Paraffine	307	150	1850	0,47	2350

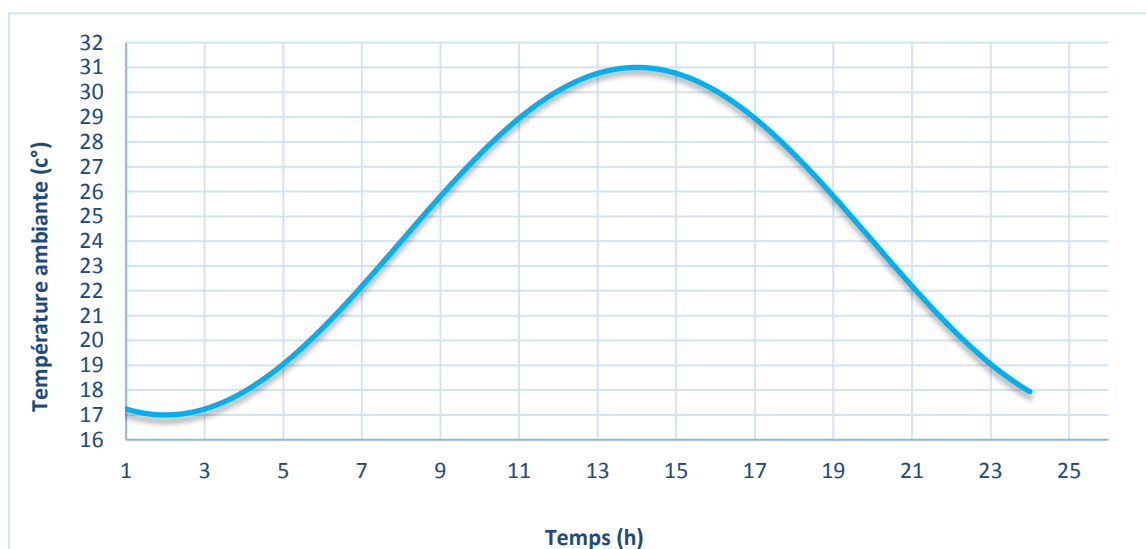
**2.1.5- Equation de la variation de température ambiante en fonction du temps [42] :**

La figure (2.2) 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 :

$$T_{ao}(\tau) = \bar{T}_{ao} + \bar{T}_{ar} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 14)\right) \quad (2.1)$$

$\bar{T}_{ao}$  : Température ambiante moyenne = 24 °C (valeur relative à la journée 21/02/2016 au site de l'étude)

$\bar{T}_{ar}$ : Amplitude de température= 7 °C

**Figure (2.2) :** Variation de la température ambiante en fonction du temps

### 2.1.6 -Equation de la variation de l'intensité solaire en fonction du temps [42] :

La figure (2.3) présente la variation de l'intensité solaire en fonction du temps. Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante :

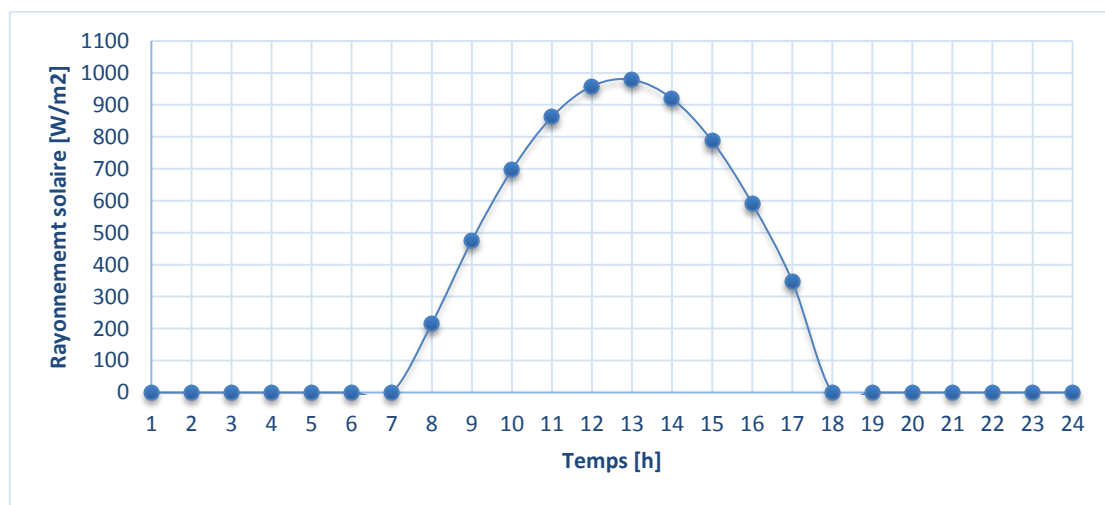
$$G_{sun}(\tau) = \hat{G}_{sun} \sin\left(\frac{\tau-a}{b-a}\pi\right) \quad (2.2)$$

$\hat{G}_{sun}$ : L'irradiation solaire maximale = 981 W/m<sup>2</sup> (valeur relative à la journée du 21/02/2016 au site de l'étude)

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

a : Heure du lever de soleil = 07 :22 h.

b : Heure du coucher de soleil = 18 :27 h.



**Figure (2.3) :** Variation de l'intensité solaire en fonction du temps.

### 2.2- 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 :

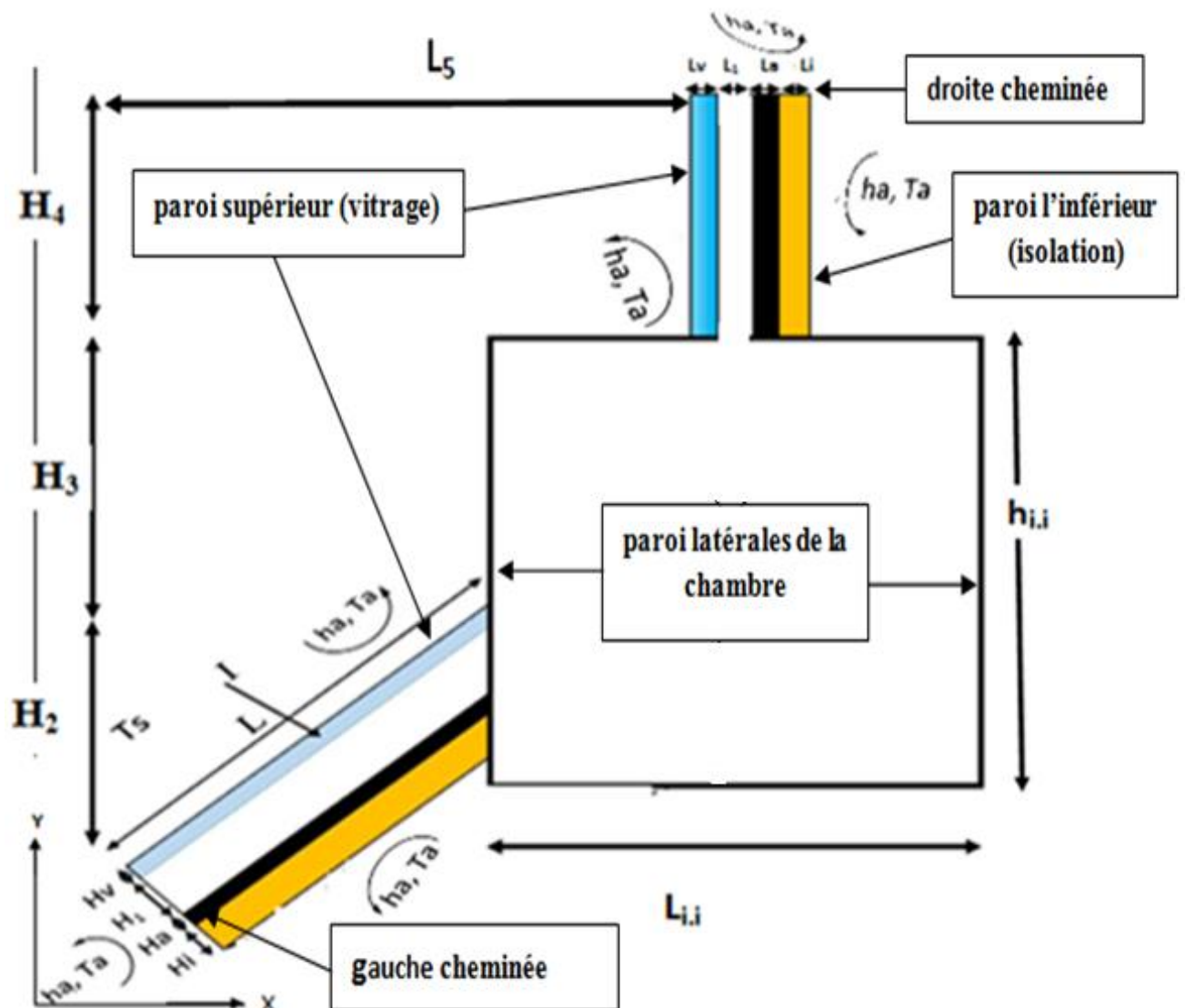
- Ecoulement bidimensionnel et incompressible.
- L'écoulement in stationnaire en régime laminaire.
- Fluide visqueux newtonien.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide ( $C_{pf}$ ,  $\lambda_f, \mu_f$ ) et du solide ( $C_{ps}, \rho_s$ ,  $\lambda_s, \mu_s$ ) sont considérées constantes.
- Les variations 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 :  $\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$

### 2.3- Géométrie du problème

Dans notre étude, on s'intéresse à la partie après le capteur plan (la chambre de séchage et la cheminée). Donc la géométrie étudiée est une combinaison de deux cavités rectangulaires (capteur et cheminée) et une cavité carrée (la chambre). Ces derniers sont constitués par les composants montrés ci-dessous Figure (2.4). Dans cette géométrie, on va analyser les phénomènes convectifs et conductifs qui se déroulent dans le capteur et la cheminée, sachant que notre capteur est supposé comme une cavité inclinée d'un angle  $\theta = 31^\circ$ .



**Figure (2.4): Schéma du séchoir sans MCP**

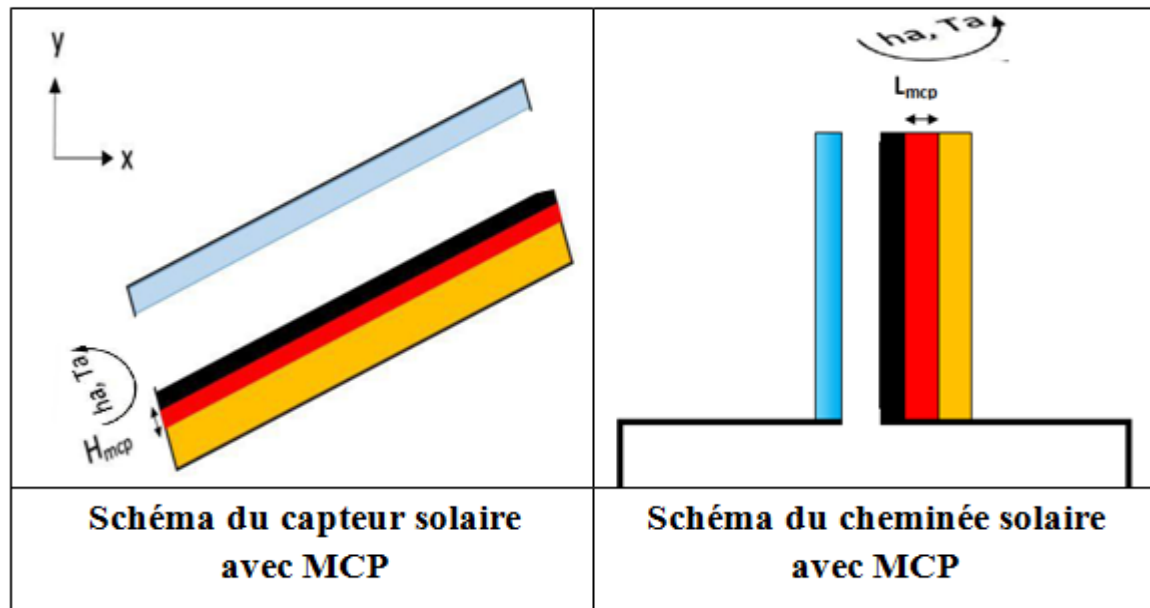


Figure (2.5) : Schéma du séchoir avec MCP

Les dimensions géométriques du problème étudié ont été choisies considérant le cas réel d'un séchoir solaire indirect réalisé au laboratoire LENREZA dans le cadre de travaux antérieurs.

Tableau (2.3) : Dimensions géométriques du capteur solaire [18]:

Dimension	Symboles	Valeurs [m]
Largeur du capteur solaire	L	1
Longueur du capteur solaire	L	2
Epaisseur de l'isolation du capteur solaire	$H_i$	0.05
Epaisseur du vitrage du capteur solaire	$H_v$	0.005
Epaisseur de l'absorbeur du capteur solaire	$H_a$	0.003
Hauteur de la lame d'air du capteur solaire	$H_1$	0.05
Largeur de la cheminée solaire	L	1
Langueur de la cheminée solaire	$H_4$	1
Epaisseur de l'isolation de la cheminée solaire	$L_i$	0.05
Epaisseur du vitrage de la cheminée solaire	$L_v$	0.005
Epaisseur de l'absorbeur de la cheminée solaire	$L_a$	0.003
Hauteur de la lame d'air de la cheminée solaire	$L_1$	0.05
Hauteur de la chambre de séchage	$h_{i,i}$	0,8

Longueur de la chambre de séchage	$L_{i,i}$	0,8
Distance entre l'entrée et la sortie de capteur	$H_2$	0,108
Distance ente la sortie du capteur et entrée de la cheminée	$H_3$	0,622
Longueur entre l'entrée du capteur et la cheminée	$L_5$	2.06

### 2.3.1- Equations dimensionnelles gouvernantes :

→ *Equation de continuité*

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

→ *Equations de quantité de mouvement :*

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_c) \cos\theta \quad (2.4)$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_c) \sin\theta \quad (2.5)$$

→ *Equation de l'énergie :*

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.6)$$

### 2.3.2- Conditions initiales et aux limites :

➤ Conditions initiales :

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

$$\text{à } t = 0 \quad \begin{cases} u(0, y, 0) = V_e \cdot \cos\theta \\ v(0, y, 0) = V_e \cdot \sin\theta \\ T = T_a \end{cases} \quad (2.7)$$

➤ Conditions aux limites :

➤ Aux frontières des parois :

Sur la paroi supérieure (vitrage) capteur :

$$\text{À } 0 \leq x \leq L, y = H_i + H_a + H_l + H_v$$

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T(x, H, t) - T_a) + \varepsilon\sigma(T^4(x, H, t) - T_s^4) + I \quad (2.8)$$

La température du ciel est donnée par la formule de Swinbank [47] :

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

Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation suivante [48] :

$$h_a = 5,7 + 3,8V_{ent}$$

Paroi gauche cheminée :

$$\dot{A} \quad x=0, H_i+H_a+H_l \leq y \leq H_i+H_a+H_l+H_v$$

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T_v(t) - T_a) \quad (2.9)$$

Paroi gauche cheminée :

$$\dot{A} \quad x=0 \text{ et } x=L, H_i \leq y \leq H_i+H_a$$

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a(T_{a'}(t) - T_a) \quad (2.10)$$

Paroi gauche cheminée :

$$\dot{A} \quad x=0 \text{ et } x=L, 0 \leq y \leq H_i$$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dy} = h_a(T_i(t) - T_a) \quad (2.11)$$

Paroi l'inférieur (isolation) capteur :

$$\dot{A} \quad 0 \leq x \leq L, y=0$$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dy} = h_a(T_i(t) - T_a) \quad (2.12)$$

Dans le cas de MCP :

Paroi gauche cheminée :

$$\dot{A} \quad x=0, H_i \leq y \leq H_i+H_{mcp}$$

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a(T_{mcp}(t) - T_a) \quad (2.13)$$

➤ A L'entrée du capteur

$$\dot{A} \quad x=0, H_i+H_a \leq y \leq H_i+H_a+H_l$$

$$\begin{cases} u(0, y, t) = u_{int} \cdot \cos\theta \\ v(0, y, t) = u_{int} \cdot \sin\theta \\ T = T_a \end{cases} \quad (2.14)$$

➤ A la sortie de la cheminée :

$$\text{À } y = H_4 + H_3 + H_2 + H_i + H_a + H_l + H_v \quad ; L_v + L_5 \leq x \leq L_l + L_5 + L_v$$

$$\begin{cases} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{(0,y,t)} = 0 \\ P = P_{atm} \end{cases} \quad (2.15)$$

➤ Aux frontières des parois :

Sur la paroi supérieure (vitrage) cheminée :

$$\text{À } H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 \leq y \leq H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 + H_4 \quad ; x = L_5$$

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T(x, H, t) - T_a) + \varepsilon \sigma(T^4(x, H, t) - T_s^4) + I \quad (2.16)$$

Paroi droite cheminée :

$$\text{À } y = H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 + H_4 \quad ; L_5 \leq x \leq L_5 + L_v$$

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T_v(t) - T_a) \quad (2.17)$$

Paroi droite cheminée :

$$\text{À } y = H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 + H_4 \quad ; L_5 + L_v + L_l \leq x \leq L_5 + L_v + L_l + L_a$$

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a(T_a(t) - T_a) \quad (2.18)$$

Paroi droite cheminée :

$$\text{À } y = H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 + H_4 \quad ; L_5 + L_v + L_l + L_a \leq x \leq L_5 + L_v + L_l + L_a + L_i$$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dy} = h_a(T_i(t) - T_a) \quad (2.19)$$

Paroi l'inférieur (isolation) cheminée :

$$\text{À } x = L_5 + L_v + L_l + L_a + L_i, H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 \leq y \leq H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 + H_4$$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dy} = h_a(T_i(t) - T_a) \quad (2.20)$$

➤ Dans le cas de MCP :

$$\text{À } y = H_i + H_a + H_l + H_v + H_2 + H_3 + H_4 \quad ; L_5 + L_v + L_l + L_a \leq x \leq L_5 + L_v + L_l + L_a + L_{mcp}$$

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a (T_{mcp}(t) - T_a) \quad (2.21)$$

Les parois latérales de la chambre :

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = 0 \quad (2.22)$$

## 2.4-Principales étapes de traitement du problème par CFD

### 2.4.1- Etape de génération de maillage par « Gambit »

#### 2.4.1.1- Présentation de Gambit :

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers\*.msh pour Fluent. [43]

#### 2.4.1.2-Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème.
- Le maillage et sa vérification.

La définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs

Les étapes suivantes constituent la procédure à suivre pour simuler les écoulements à l'aide du logiciel FLUENT et de son mailleur GAMBIT :

- Lancer gambit
- Définition du modèle (la géométrie)
- Charger son fichier du maillage
- Vérifier son maillage
- Choix des conditions aux limites
- Exporter le fichier au FLUENT (.mesh)
- Lancer FLUENT
- Choix du modèle physique
- Contrôle de la convergence
- Afficher les résultats

### 2.4.1.3-Schéma du maillage selon le modèle physique adopté :

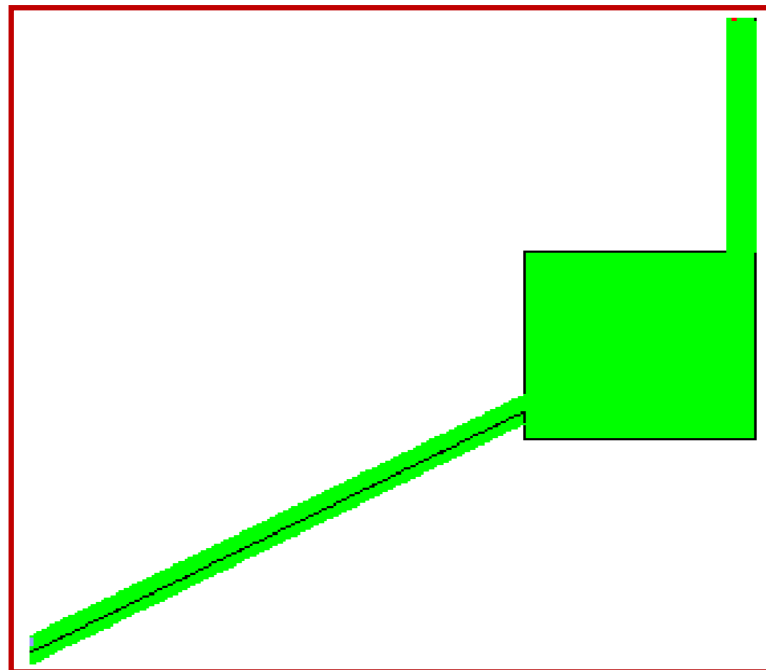
#### a- Maillage :

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage). Il y a plusieurs types de maillage

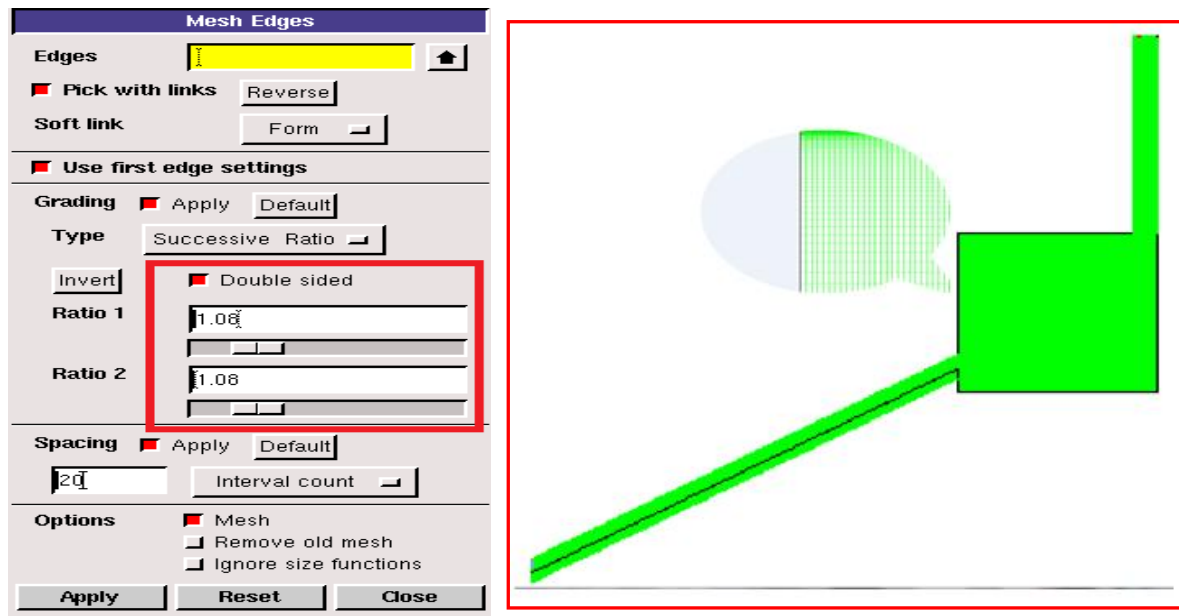
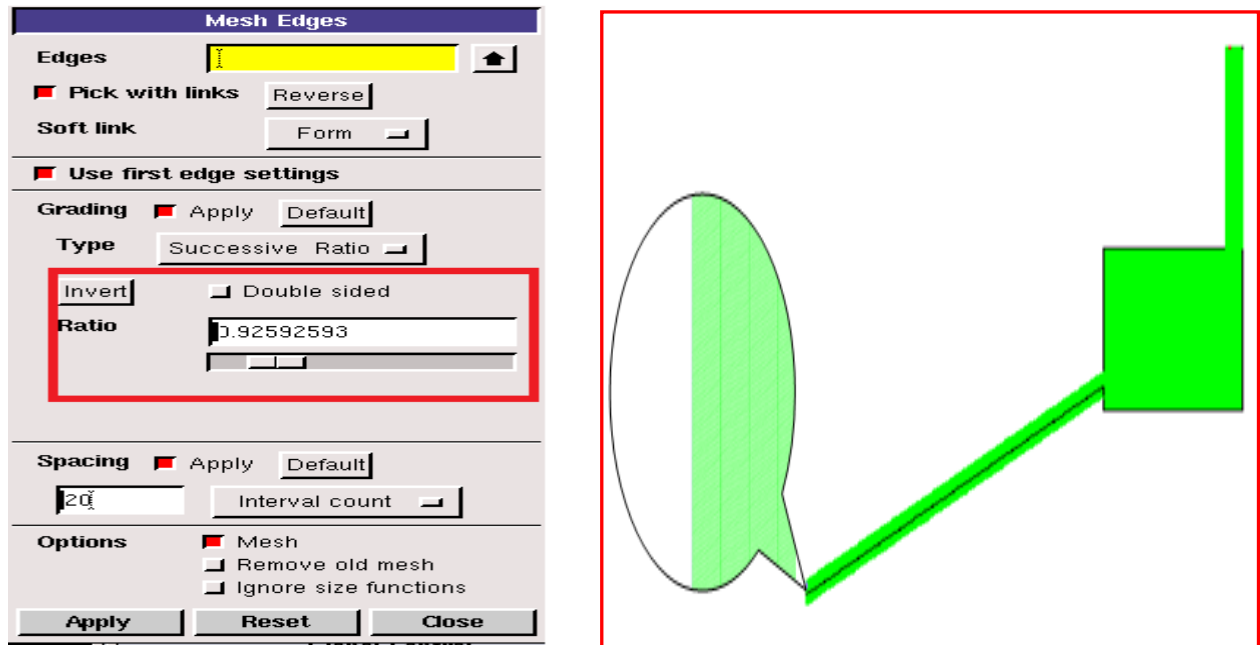
- Maillage hybride
- Maillage non structuré (tri/tétra)
- Maillage structuré (quad/submap)

#### b- Choix du maillage :

Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré à multi blocs, formé de lignes continues à travers le domaine qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie. Après des tests de précision, un maillage de 8400 cellules a été adopté.



*Figure (2.6) : Maillage adopté pour le présent cas d'étude*

**Maillage doublé :***Figure (2.7): Le maillage de notre étude***Maillage invert:***Figure (2.8): Le maillage de notre étude*





2. Densité 0.9

3. Forces 0.9

4. Mouvement 0.7

5. Update de Fraction Liquide 0.9

6. Energie 1

- Couplage pression-vitesse

1. SIMPLE

- Schéma de discrétisation

1. Pression PRESTO!

2. Mouvement Second Order Upwind

3. Energie Second Order Up

# *Chapitre 03*

---

*Etude numérique de la  
ventilation sans intégration  
de MCP*

---

## Chapitre 03 : Etude numérique de la ventilation sans intégration de MCP

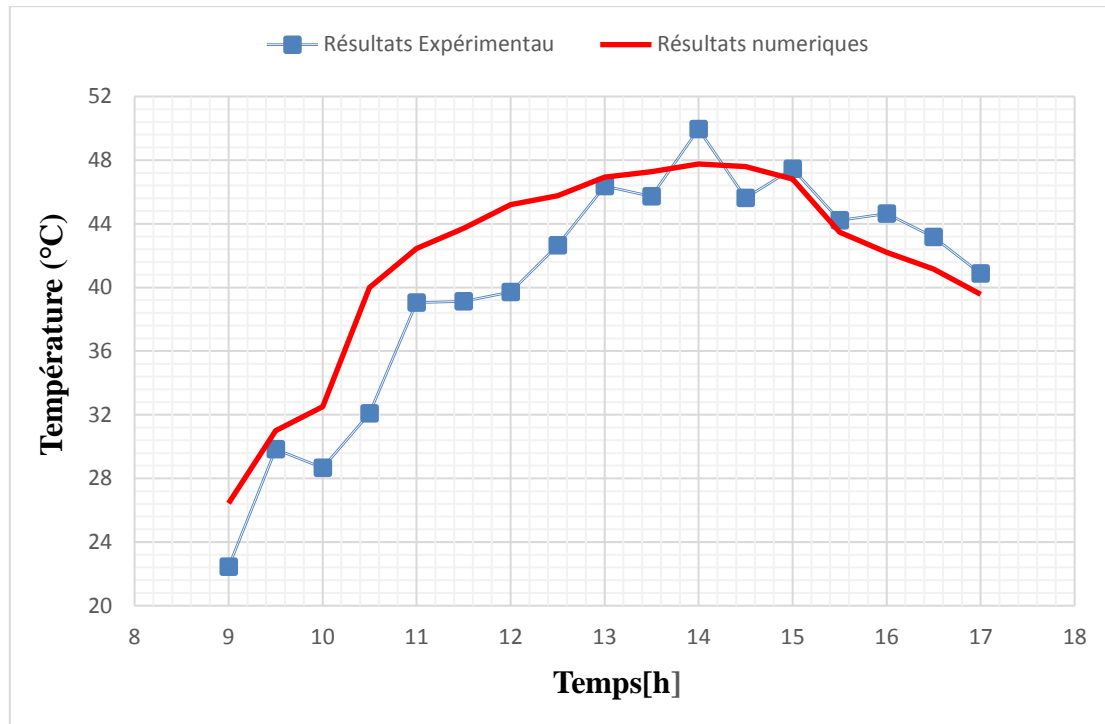
### 3.1-Introduction

Dans cette partie du mémoire, nous allons présenter et discuter les résultats de l'ensemble des essais de simulation numérique conduits dans notre cas d'étude. La procédure de résolution et la présentation des résultats sont basées sur les deux étapes suivantes :

- A. Validation du modèle numérique adopté, faisant recours à des résultats expérimentaux relevés sur un séchoir solaire indirect, conçu et réalisé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides (LENREZA, Univ. Ouargla, Algérie), et ce dans le cadre de travaux de master antérieurs [20], [50].
- B. Simulation du séchoir solaire sans intégration de MCP avec des différents cas dans le sens de montrer les effets des différents paramètres de conception ( type de cheminée, positionnement de cheminée et la lame d'air de la cheminée solaire) sur le comportement thermique du système de séchage.

### 3.2- Validation du modèle numérique

Avant d'entamer la simulation numérique traitant les différents paramètres d'influence, nous avons commencé par un essai de validation, sur la base des données expérimentales mesurées sur un séchoir solaire indirect dans le cadre des mémoires de master génie énergétique et génie des procédés[18], [44] (année 2014/2015 et 2015/2016). A cet effet nous avons utilisé un maillage convenable pour notre cas d'étude, se basant sur la comparaison des températures simulées à la sortie de capteur et de cheminée et aux différents endroits dans la chambre à celles mesurées expérimentalement dans les mêmes points.



**Figure (3.1) : Températures mesurées et simulées dans la chambre de séchage**

### 3.3- Simulation du séchoir solaire sans intégration de MCP

Dans cette partie nous avons montrons les résultats de simulation du séchoir solaire sans intégration de matériaux de changement de phase (MCP) comme première étape d'étude du comportement thermique du séchoir. Différents cas de configuration sont considérés de manière à tester progressivement les paramètres d'influence et choisir un cas optimal sur lequel on va intégrer l'effet des MCP.

#### 3.3.1-Méthodologie de simulation :

Le modèle de travail adopté pour notre étude est donné par la figure (3.2). Ce modèle est considéré comme une chambre de séchage de forme cubique de dimension (1m x 1m x 1m). Afin de suivre les évolutions des distributions de température dans le séchoir nous avons déterminé les points, les lignes et les colonnes suivants : points sortie de capteur et de cheminée, trois étages (Etage1, Etage2, Etage3) et trois colonnes (colonne1, colonne2, colonne3). La partie supérieure de cette chambre est équipée d'une cheminée solaire verticale, et de dimension 1m x 0.085m, et la partie inférieure est équipée d'un capteur solaire. Pour éliminer le transfert de chaleur avec le milieu ambiant, tous les côtés de la chambre sont thermiquement isolés.

La méthodologie de résoudre notre problématique est basée sur la méthode de résolution par élimination des cas comme il est illustrée à la figure (3.3) ci-dessous :

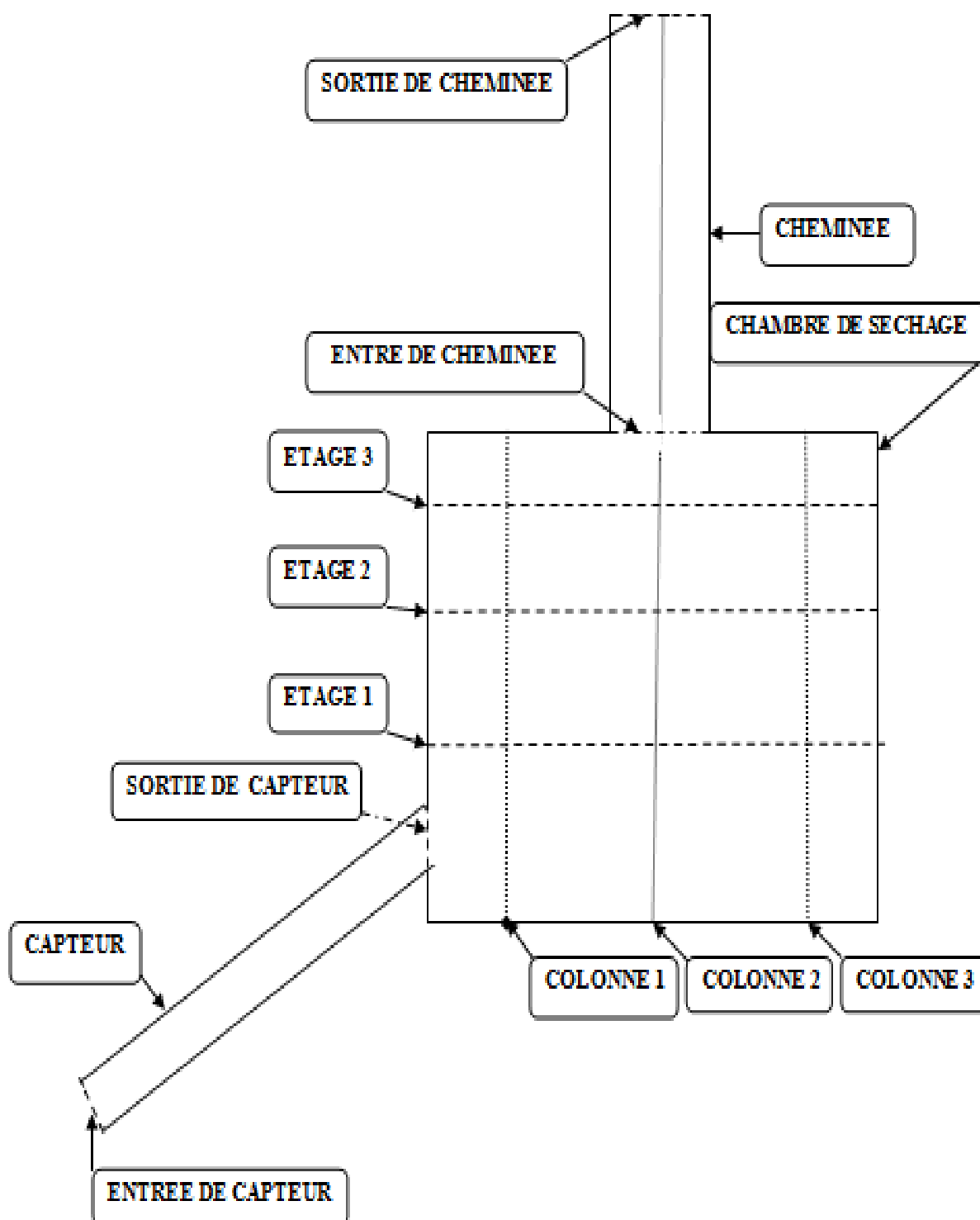
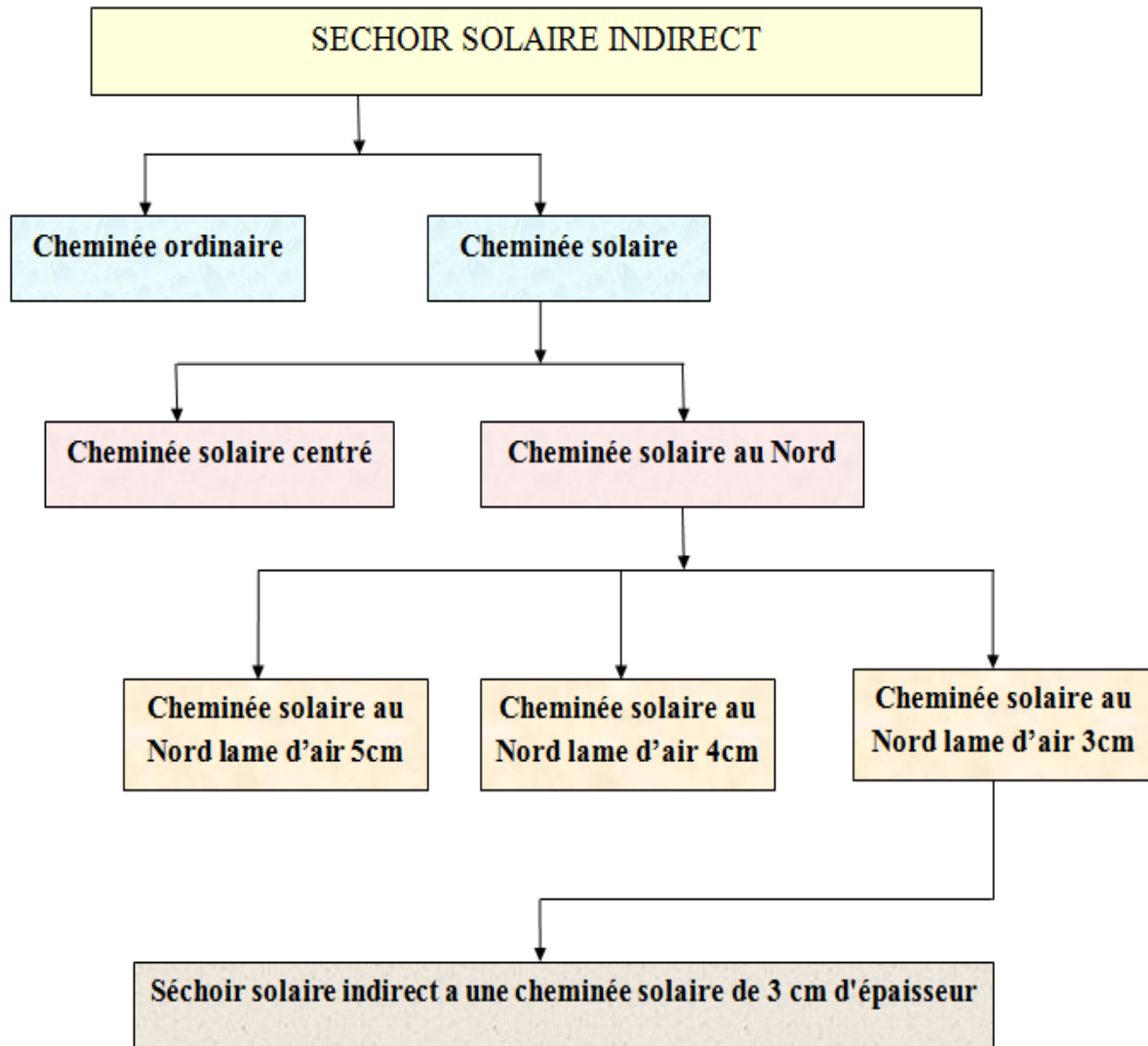


Figure (3.2) : Schéma descriptif des endroits de mesure



**Figure (3.3) : Diagramme des étapes de simulation**

### 3.3.2-Effet de la nature ou type de cheminée :

Pour cela nous avons considéré deux types de cheminées ; ordinaire et solaire avec les mêmes dimensions et sous les mêmes conditions climatiques. Les constituants de chacune des cheminées sont montrés ci-dessous sur la figure (3.4).

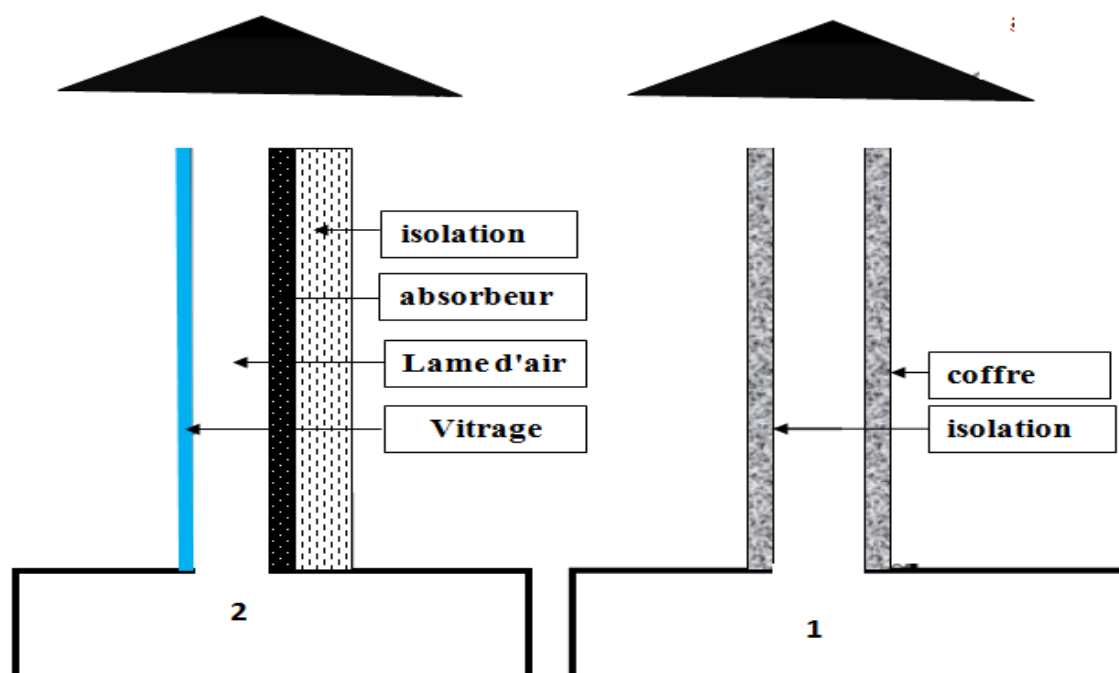


Figure (3.4) : Schéma descriptif : cheminée ordinaire (1), cheminée solaire (2)

#### a-Distribution de température

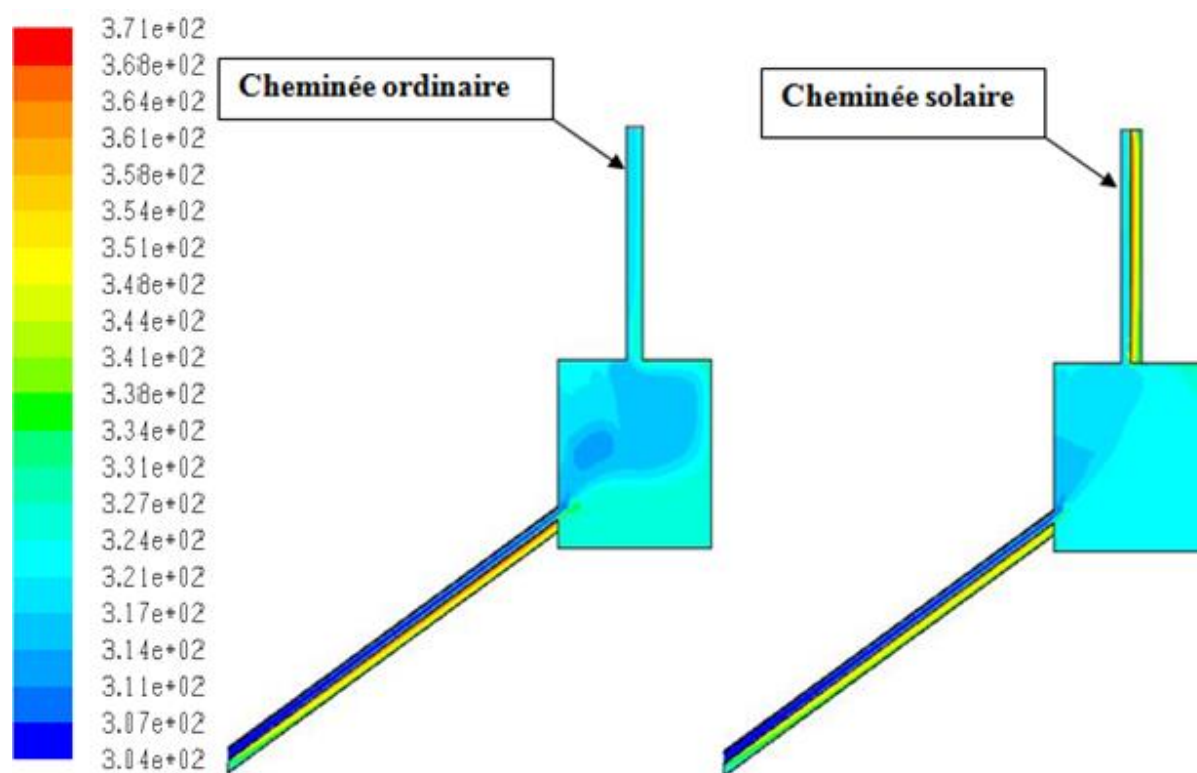
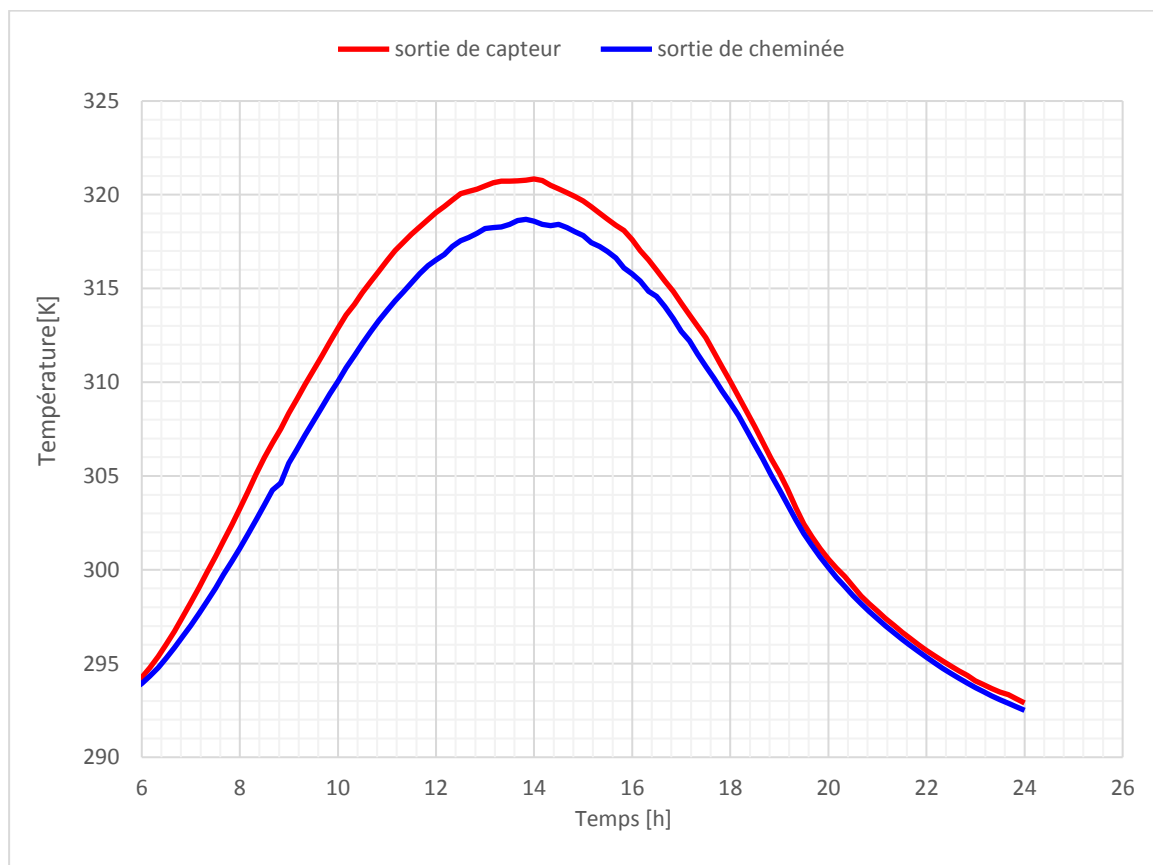


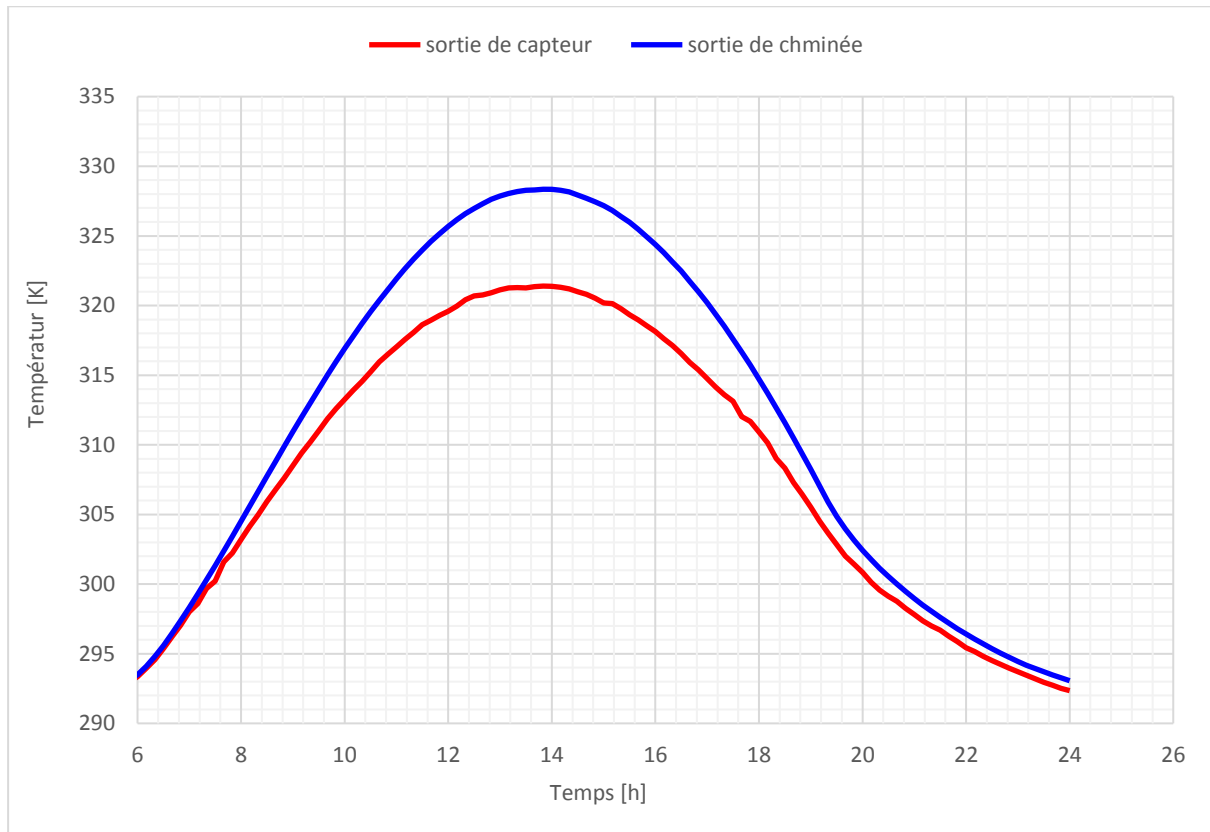
Figure (3.5) : Distribution de température à 14 h dans le séchoir pour les deux cheminées



La première vision générale de cette figure(3.5), indique que la distribution de température est peu homogène soit avec la cheminée ordinaire ou solaire. D'autre part en comparant les deux cas, on peut remarquer que l'homogénéité de distribution est relativement mieux par la cheminée solaire que l'ordinaire sauf le coté sud de la chambre où il y a l'influence de la vitesse d'entrée d'air a une valeur 0,5 m/s. Cette différence d'homogénéité entre les deux types de cheminés explique l'effet remarquable de la cheminée solaire celle qu'elle augmente la vitesse de ventilation ou l'extraction de l'air vers l'extérieur par la création de gradient de densité du au gradient de température  $\Delta T$  entre l'entrée et la sortie de la cheminée. Par comparaison des valeurs de vitesse à la sortie des cheminées on trouve que la cheminée solaire assure la valeur de (0,49m/s) et la cheminée ordinaire reste dans la limite de (0,3m/s).



**Figure (3.6): Courbes des températures à la sortie du capteur et de la cheminée ordinaire**

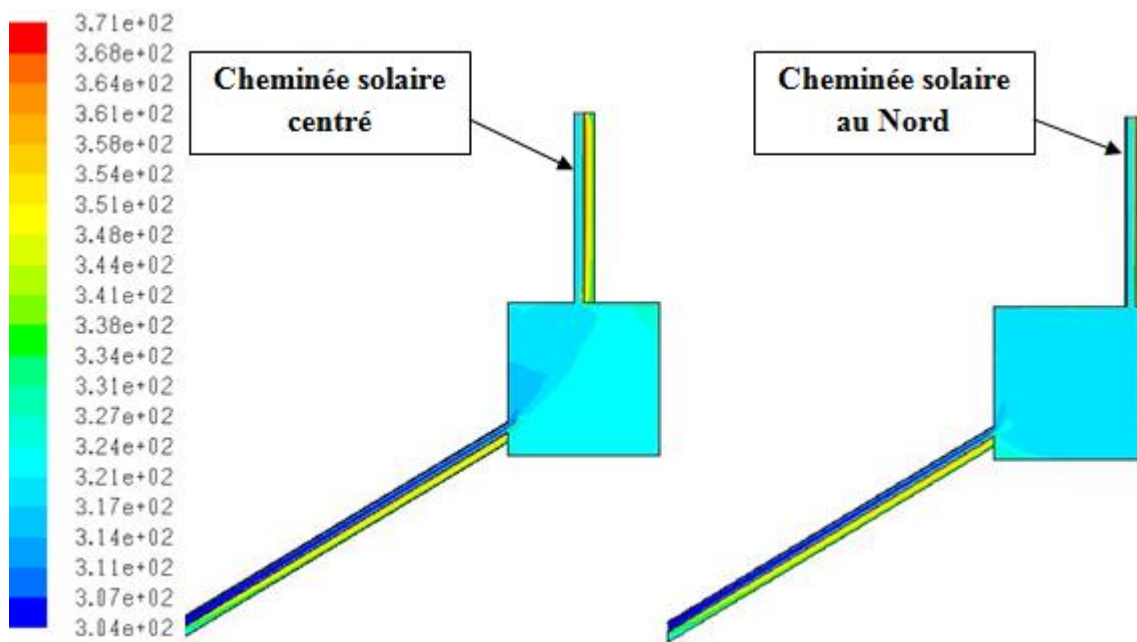


**Figure (3.7): Courbes des températures à la sortie de capteur et de la cheminée solaire**

A partir des courbes précédentes données par les figures (3.6) et (3.7), on peut bien comprendre l'influence de ces types de cheminée sur le phénomène de séchage sachant que pour une cheminée ordinaire, la température à la sortie du capteur est supérieure à la température de sortie de cheminée avec un écart de température  $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$ . Par contre à la sortie de la cheminée solaire la température est supérieure à celle constatée à la sortie du capteur avec un écart de température ( $\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$ ). Pour cela l'homogénéité est mieux à cause de l'évacuation de l'air humide de la chambre vers l'extérieur, mais avec la cheminée ordinaire il y a eu une stagnation de température à l'intérieur de la chambre particulièrement dans les cotés supérieurs, latéraux (Est, Ouest) de la chambre [20],[50], phénomène qui a contribué à la dégradation des produits séchés [51]. Sur ce on peut déjà accepter, dans cette première étape de notre étude, que le choix de la cheminée solaire est bien justifié comme élément d'amélioration du comportement thermique du système de séchage.

### 3.3.3-Effet du positionnement de cheminée solaire

#### a-Distribution des températures

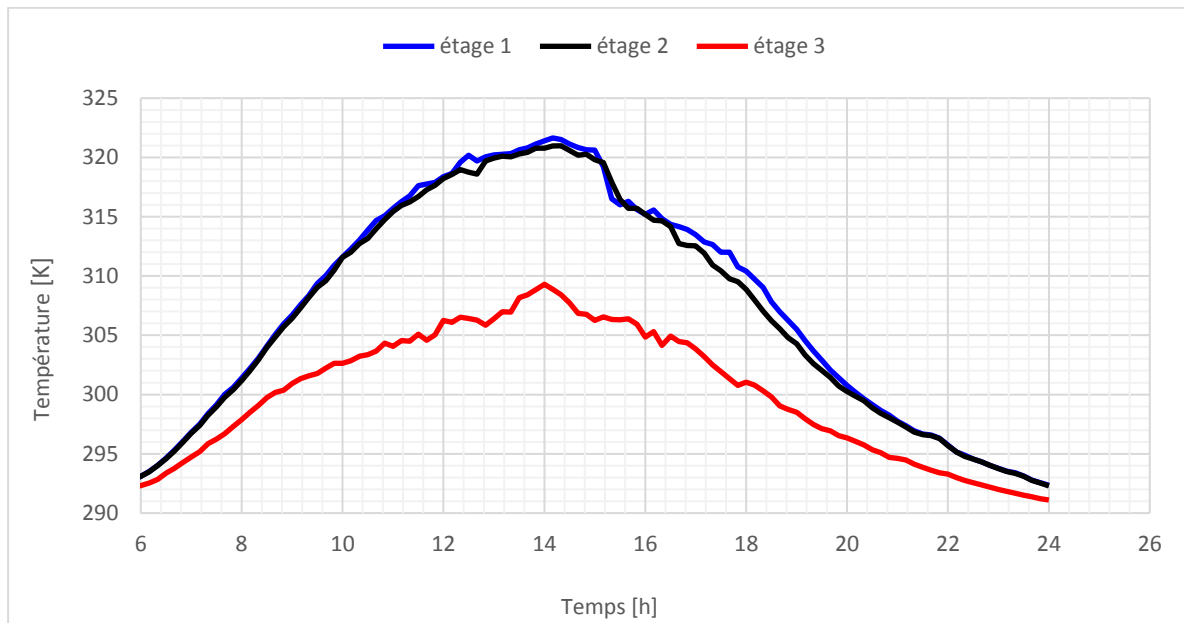


**Figure (3.8): Distribution des températures dans le séchoir pour les deux positionnements de la cheminée**

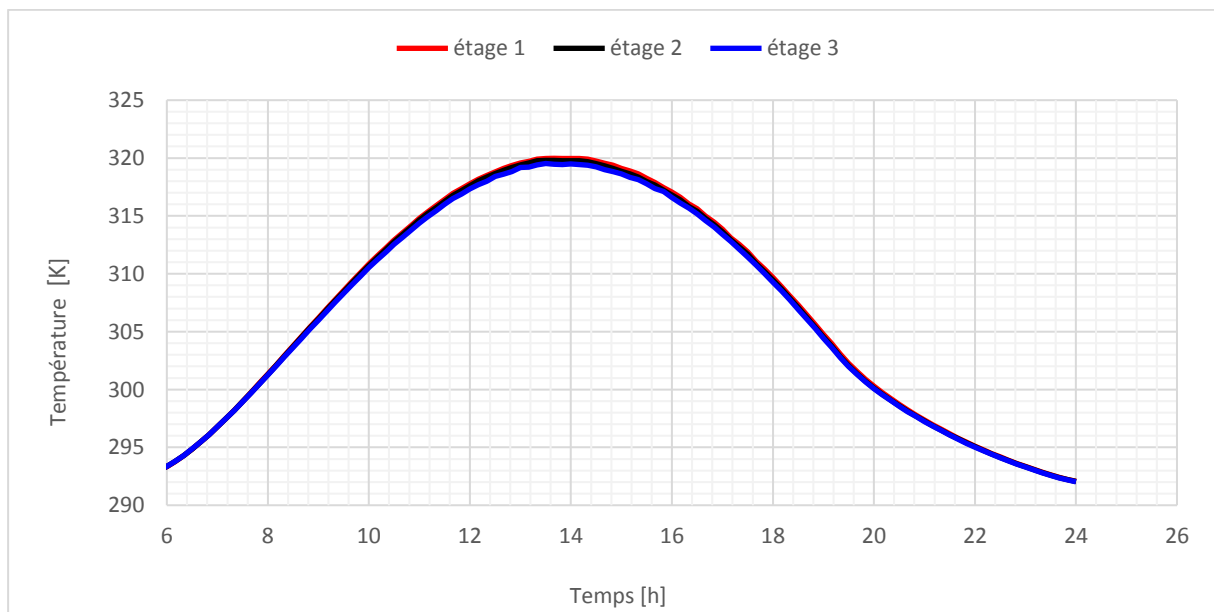
La figure 3.8 ci-dessus montre que pour la même cheminée solaire avec les mêmes dimensions, le changement du positionnement de la cheminée induit une différence notable sur l'état d'homogénéité de distribution des températures. La cheminée solaire placée coté Nord (ou à droite, en 2D) présente une homogénéité presque totale dans la chambre de séchage avec une température ( $T=47^{\circ}\text{C}$ ). Il est à noter ici, que ce choix de positionnement au Nord est en accord avec les données de littérature disponible où la majorité des cheminées solaires étudiées expérimentalement ou numériquement ont été placées en face à l'ouverture d'entrée d'air au niveau haut dans la toiture [52]. Pour simplifier l'évacuation de l'air vers l'extérieur et assurer l'effet de cheminée expliqué par la tendance du fluide qui en s'échauffant s'élève, en raison de la diminution de sa densité, résultant des différences de la température et d'humidité.

Donc on peut dire que ce choix de positionnement de cheminée est favorable pour le séchage des produits agricoles par rapport à la position au centre de la chambre de séchage, du point de vue homogénéité de distribution des températures. Pour ce qui est de la vitesse d'extraction de l'air à la sortie de la cheminée elle est au voisinage de 0,5 m/s restant un peu faible pour répondre au besoin d'évacuer la totalité d'air humide en cas de traitement de produits agro-

alimentaires. Les courbes ci-dessous de la figure (3.9) confirment le résultat d'homogénéité de la température dans toute la chambre à partir des valeurs de températures calculées aux niveaux des étages horizontaux prédéfinis au début de ce chapitre. La température est quasi-stable à la valeur de 47°C dans les différents cotés de la chambre ce qui prouve l'absence de la stratification thermique comme il a été déjà mentionné par les études précédentes [20], [50].



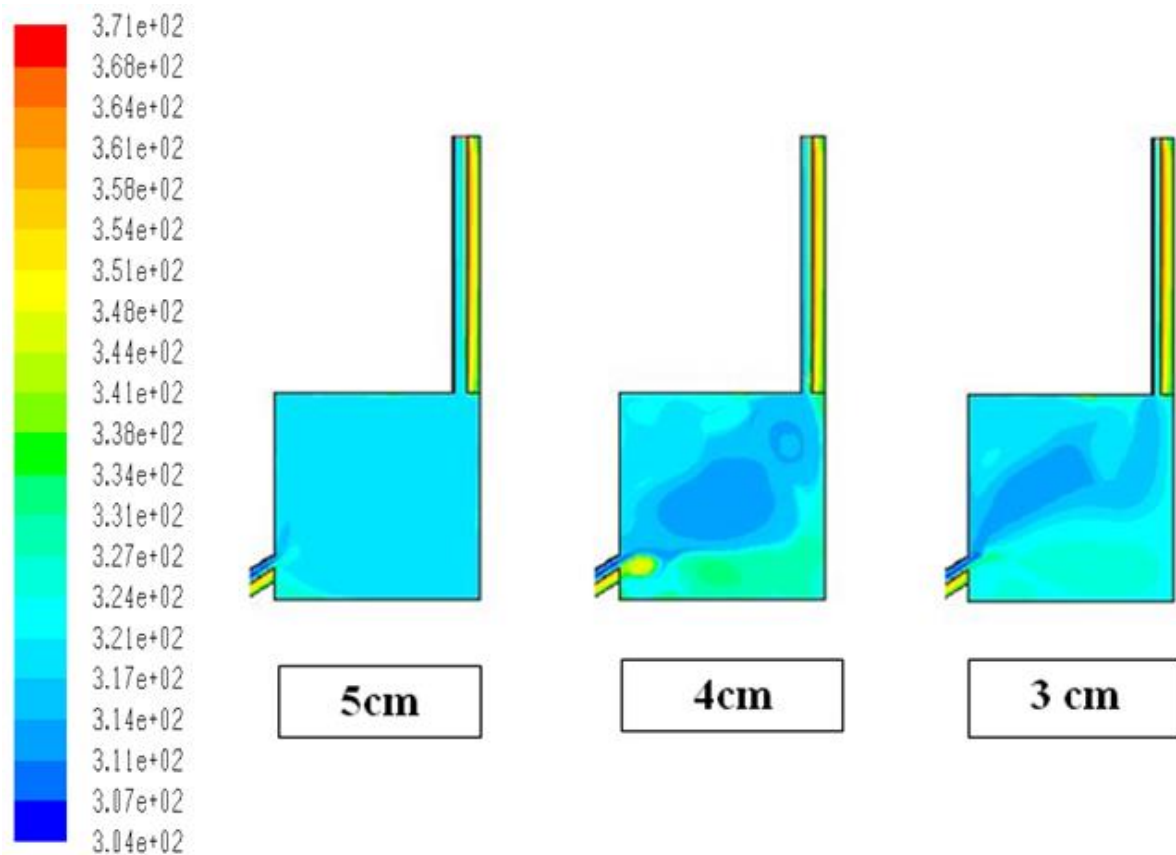
**Figure (3.9):** Courbes des températures aux niveaux horizontaux avec une cheminée solaire centrée



**Figure (3.10):** Courbes des températures aux étages avec une cheminée solaire au nord

### 3.3.4-Effet de la lame d'air (vitesse de ventilation)

#### a- Distribution des températures



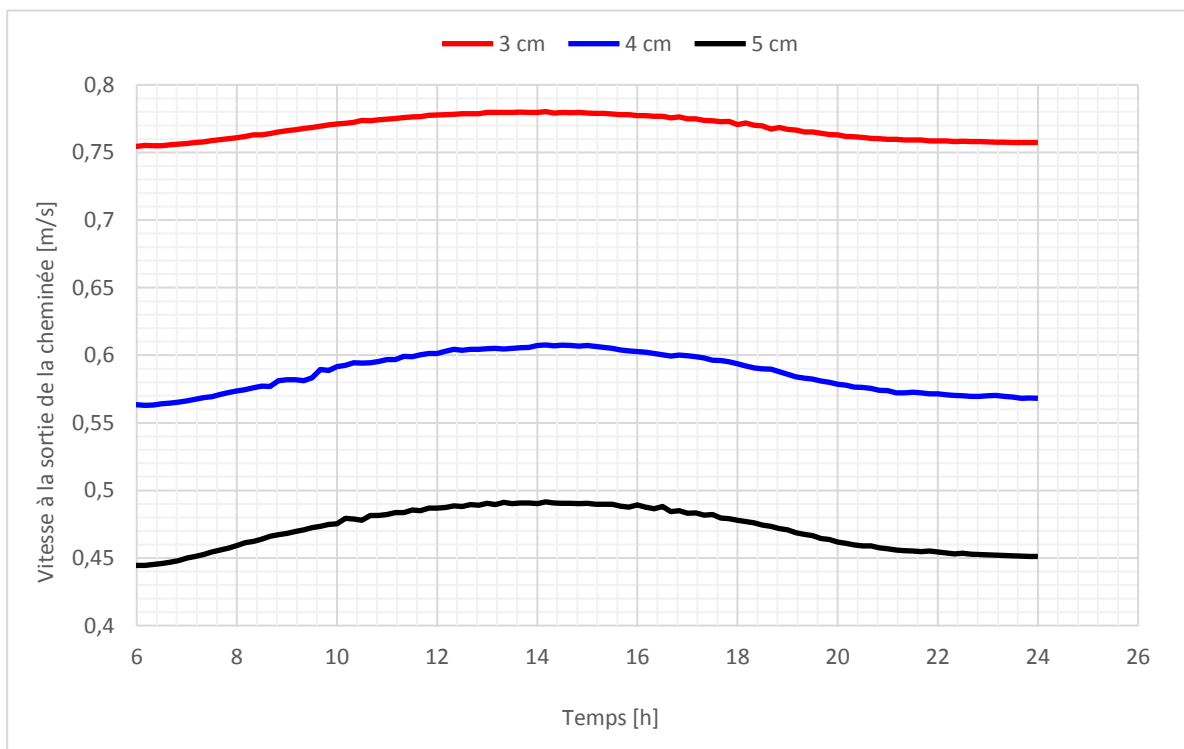
**Figure (3.11): Distribution des températures pour les différentes épaisseurs de la lame d'air**

Le paramètre de la lame d'air ou d'autre façon la section de passage d'air vers l'ambiance est très importante puisqu'il commande la vitesse de dégagement de l'air humide. En effet un faible dégagement de l'air humide provenant de la chambre de séchage peut être en cause de problèmes tels que stratification thermique, dégradation des produits séchés et allongement du temps de séchage [51]. Dans cette partie nous avons testé la simulation numérique par trois épaisseurs de la lame d'air (3, 4 et 5 cm) pour voir l'influence comme c'est montré ci-dessus dans les figures (3.10) et (3.11).

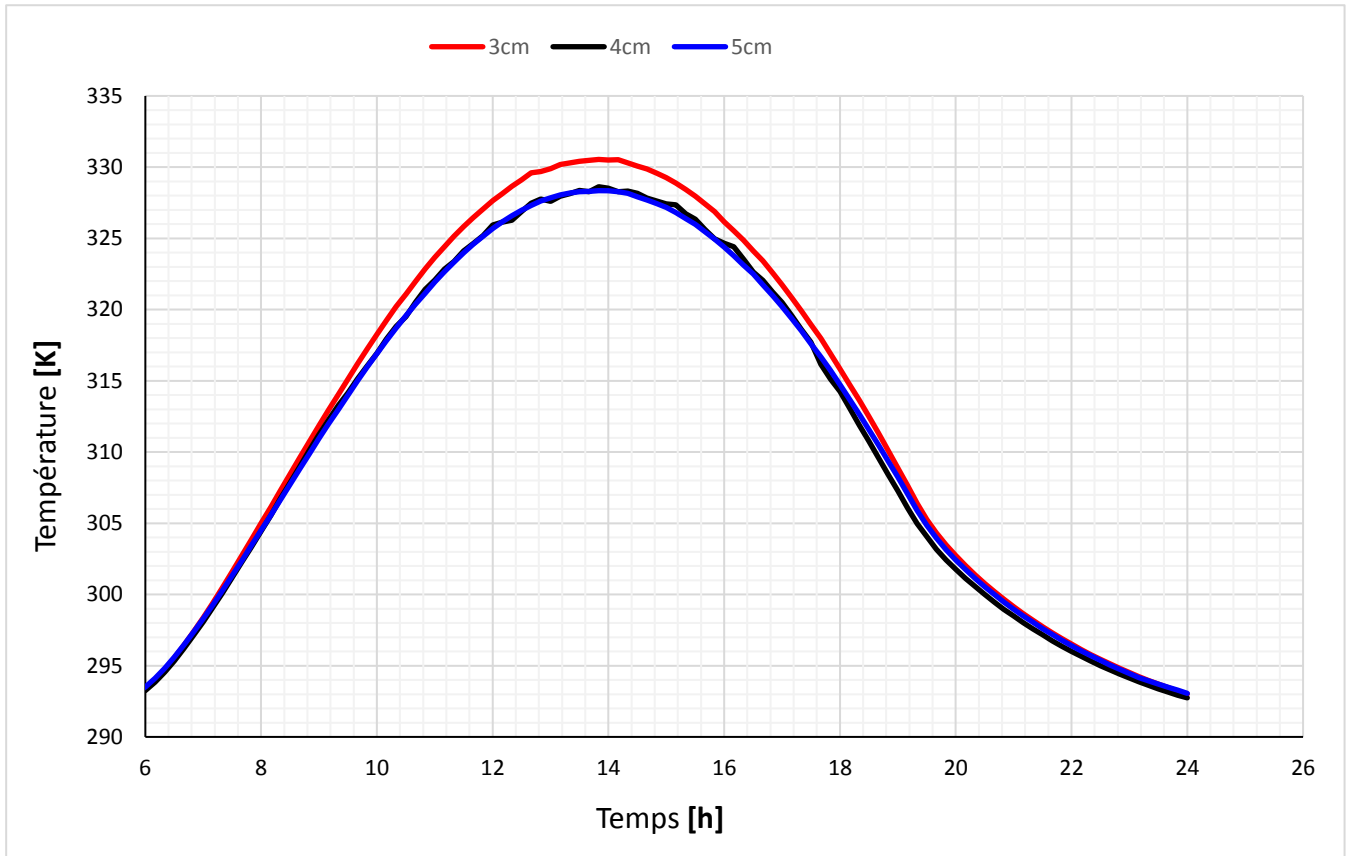
Les résultats des simulations numériques indiquent une faible homogénéité de distribution des températures avec les épaisseurs de cheminée (3 et 4 cm) au contraire de l'épaisseur 5cm qui a donné une distribution nettement plus homogène. Par considération simultanée des critères homogénéité de distribution et intensité de la vitesse d'extraction, le choix judicieux s'oriente

vers l'épaisseur de lame d'air de 3cm. Pour cette épaisseur la vitesse d'air est de l'ordre de 0,7-0,8 m/s comparée à une moyenne de 0,5 m/s obtenue pour les autres cas.

La figure (3.12) nous explique l'importance de la vitesse de ventilation naturelle pour évacuer de l'air humide vers l'extérieur dans le domaine de séchage des produits agricoles. Nous constatons que la lame d'air 3cm assure à la sortie de cheminée une température de 58°C par contre les lames d'air de (4 et 5 cm) ne dépasse pas 54°C à la sortie de cheminée.



**Figure (3.12) : Courbes des vitesses à la sortie de la cheminée solaire pour les différentes lames d'air**



**Figure (3.13) : Courbes des températures à la sortie de la cheminée solaire pour différentes lames d'air**

### 3.4-Conclusion :

Sur la base des résultats de simulation numérique sans intégration des matériaux de changement de phases on peut dire que pour un système de séchage solaire des produits agroalimentaires nous pouvons accepter le choix d'une cheminée solaire à épaisseur de lame d'air de 3cm positionnée coté nord. Cette conception assure une vitesse de ventilation naturelle de 0,7m/s, une température à la sortie de cheminée de 58°C et une température de séchage convenable, a condition de trouver une solution de l'homogénéité de distribution de température à l'intérieur de la chambre de séchage. La lame d'air 5cm garantie plus d'homogénéité de distribution mais avec une température et une vitesse d'extraction un peu faibles. Cette épaisseur peut être utile pour les applications de séchage de certains produits agroalimentaires thermosensibles.

# *Chapitre 04*

---

*Simulation du séchoir solaire  
avec intégration des MCP*

---



## Chapitre 04 : Simulation du séchoir solaire avec intégration des MCP

### 4.1- Introduction :

Dans cette partie de notre étude, et suite aux résultats du chapitre précédent, nous avons considéré l'ajout d'une couche plane rectangulaire d'un matériau MCP en dessous de la plaque absorbante soit pour le capteur solaire plan, ou la cheminée solaire ou les deux à la fois. Le type de matériau de changement de phase utilisé est le paraffine car la majorité des travaux antérieurs qui s'intéressent aux MCP ont utilisé le paraffine en raison de leur disponibilité et économie (prix moins cher).

Les résultats de simulations ont porté sur différents points, étages (niveaux horizontaux), colonnes, et sorties de capteur et de cheminée en utilisant le même MCP. En second lieu, trois cas d'emplacements de MCP dans le séchoir solaire indirect, le premier MCP dans le capteur, le deuxième dans la cheminée solaire et le troisième dans les deux emplacements capteur et cheminée simultanément. Ces différents cas ont été simulés et comparés avec la même configuration sans MCP. Et afin de ressortir l'influence de l'intégration de MCP sur la vitesse de ventilation naturelle qui nous guide à la configuration optimale du séchoir solaire indirect des produits agroalimentaires.

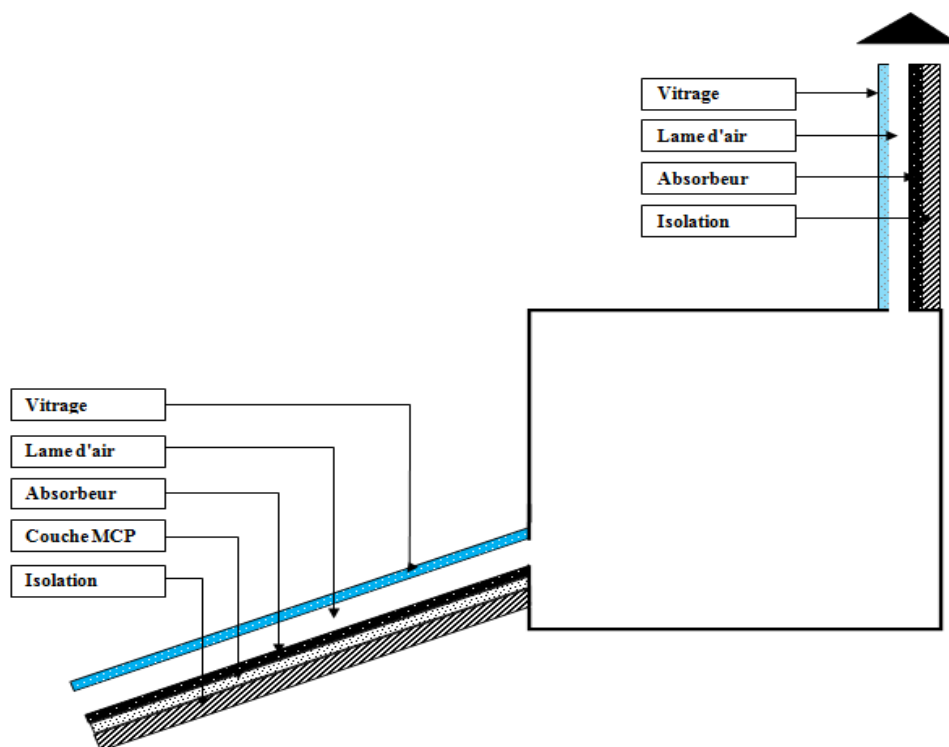
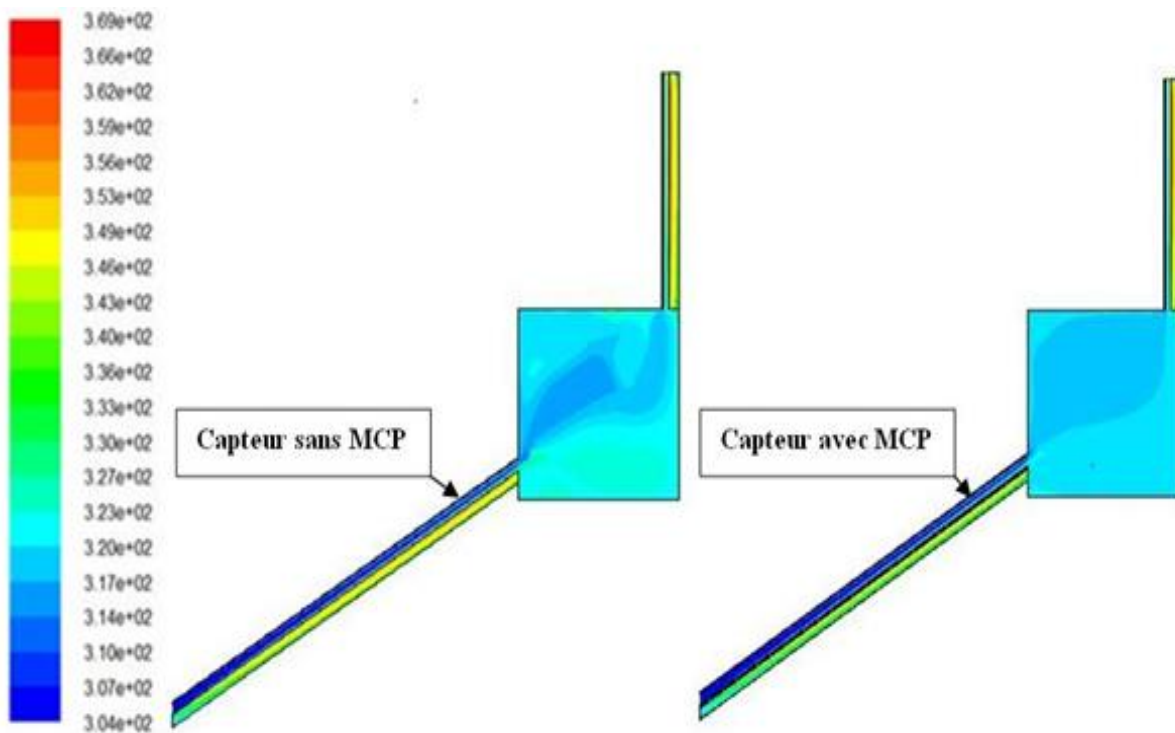


Figure (4.1) : Schéma descriptif du séchoir avec intégration de MCP au capteur

Dans cette partie d'étude qui constitue une continuité du travail de master de A. BENHAMZA. et B. SETTOU [53], nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de l'intégration de MCP au niveau du capteur solaire plan figure (4.1) sur l'opération de séchage d'un coté et d'autre coté sur la ventilation naturelle par cheminée solaire tel que c'est montré par les prochaines parties.

## 4.2- Etude du comportement thermique du séchoir solaire avec intégration de MCP au niveau du capteur d'admission

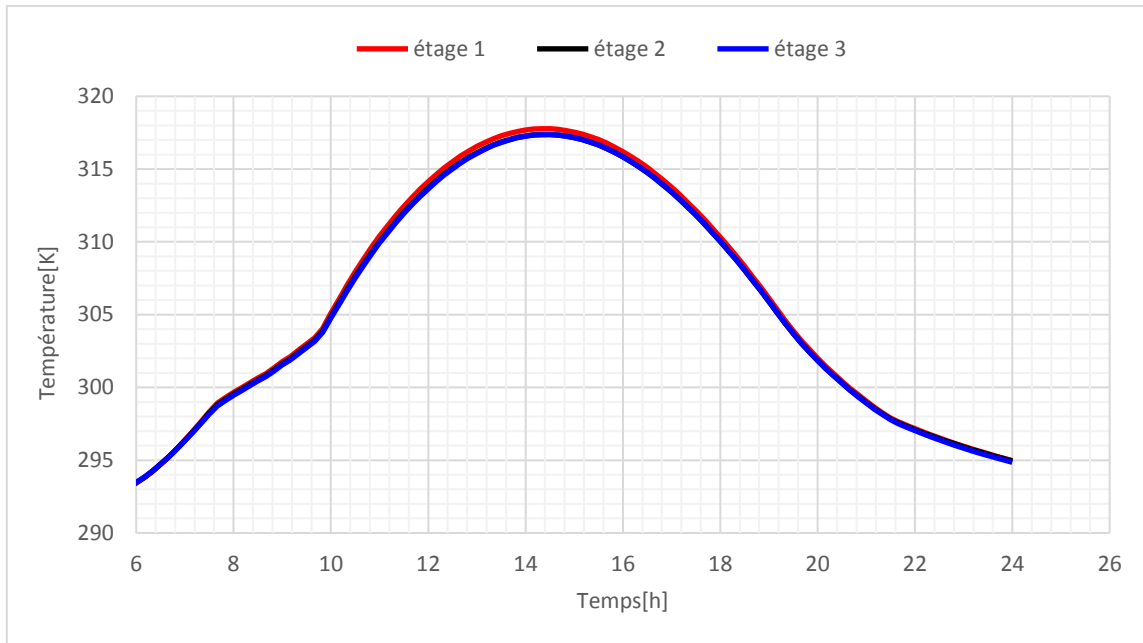
### a- Distribution de température dans le séchoir



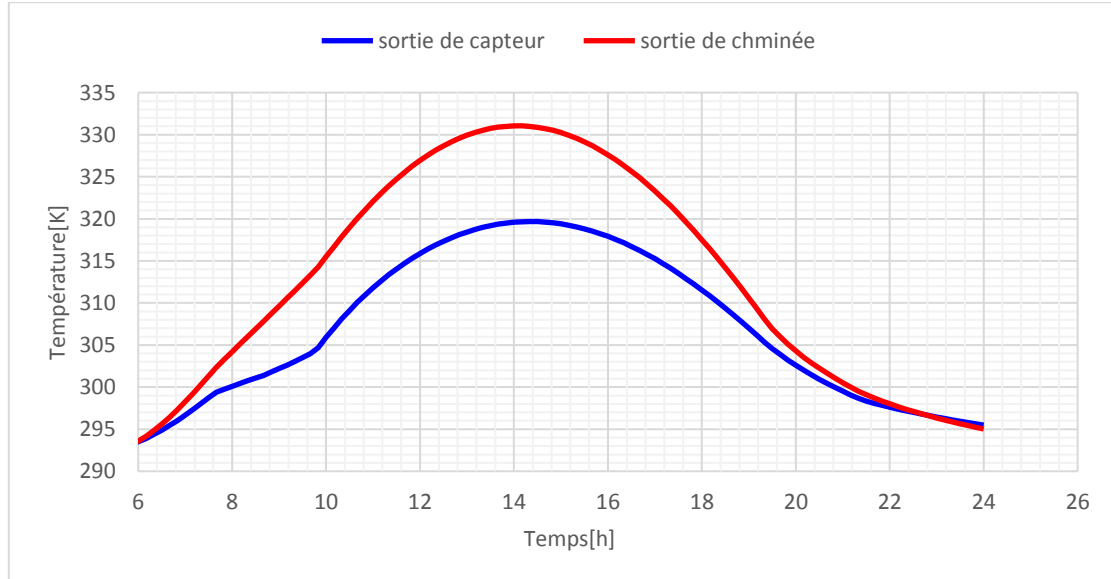
**Figure (4.2) : Champ de température au sein du séchoir dans le cas de capteur sans et avec MCP**

Dans la figure (4.2), nous constatons très clairement l'absence d'homogénéité dans les deux cas de capteur sans et avec MCP, et la température à l'intérieur de la chambre est presque la même avec un petit écart  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$  ou le cas sans MCP a une température ( $T = 47^\circ\text{C}$ ) et le cas avec MCP a une température de  $45^\circ\text{C}$ , sachant que ce résultat est pris à 14h où il n'y a pas l'influence de déstockage de MCP.

### b- Variations des températures dans différents points du séchoir



**Figure (4.3) : Température dans la chambre au niveau des étages**

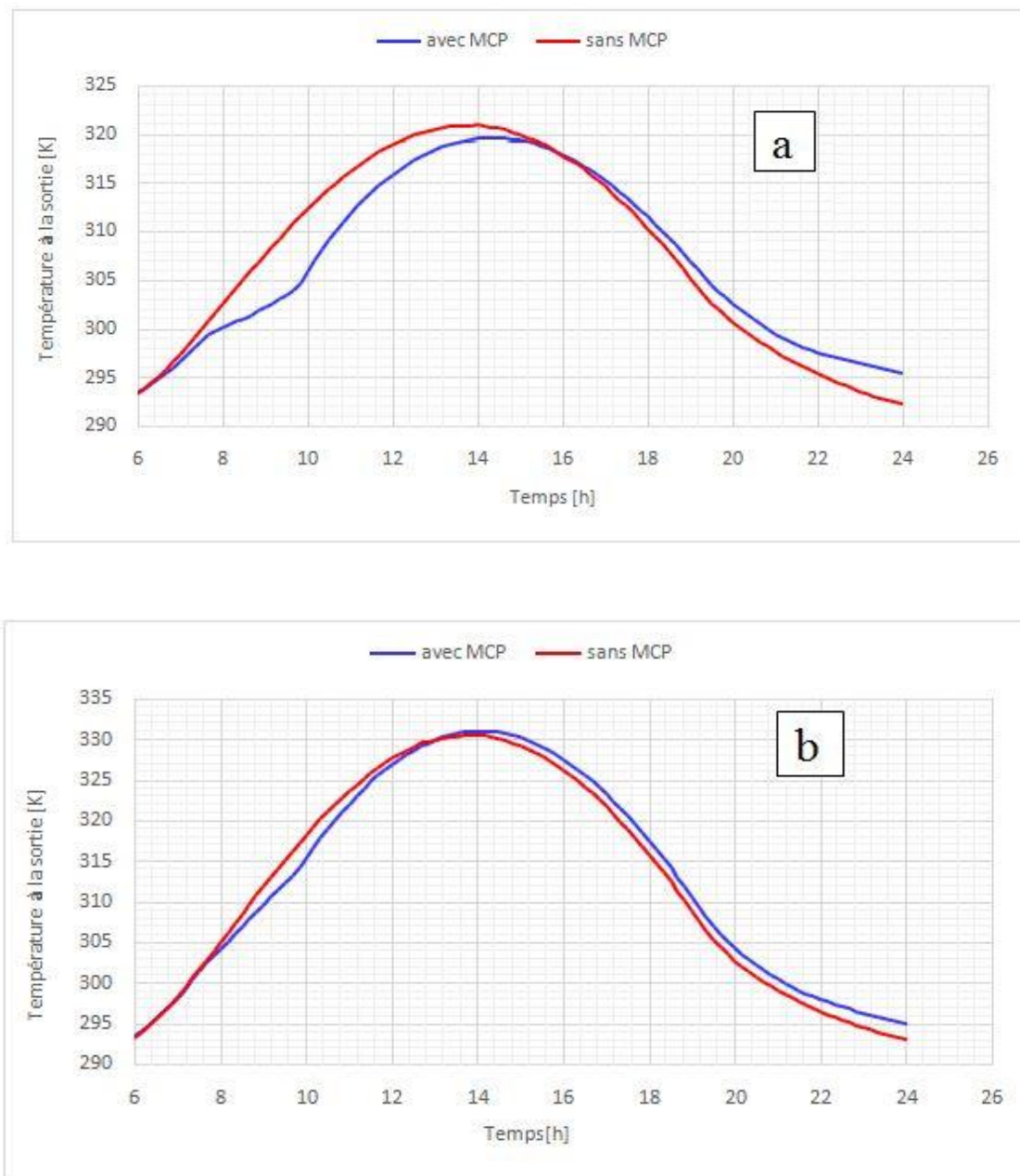


**Figure (4.4) : Température aux sorties de la cheminée et du capteur avec MCP**

Les figures (4.3), (4.4) représentent la variation de la température dans la chambre de séchage au niveau des étages en fonction de temps et à la sortie du capteur et de cheminée dans le cas d'intégration d'épaisseurs (1cm) d'une couche de MCP dans le capteur. On remarque que les valeurs de température dans la chambre de séchage aux différents étages de la chambre qui

indique que le taux d'homogénéité est convenable, mais à un écart de température  $\Delta T$  de [2 à 3 °C]. D'autre part nous avons remarqué l'augmentation de température à la sortie de cheminée à une valeur de  $T=59^{\circ}\text{C}$  qui explique l'effet de cheminée solaire sur l'augmentation de la vitesse de ventilation par ce gradient de température entre l'entrée et la sortie de cheminée tel que la vitesse est (0,76m/s).

**c- Comparaison de la variation de température à la sortie de capteur et cheminée dans le cas de capteur avec MCP**



**Figure (4.5) : Variation de température à la sortie de capteur (a), et de cheminée (b)**

A partir la courbe de la figure (4.5a), On peut décomposer la courbe en trois périodes :

[7:30h - 14:00] dans cette période la courbes de MCP présentent une inflexion à 7:30 h avec une température entre 27 et 32 °C cette inflexion revient aux changements de phase, la durée de changement de phase est maximale puisque le MCP stocke une quantité de chaleur latente.

[10 - 16 :15] On remarque que la courbe sans MCP est la supérieure par rapport celle avec MCP puisque le MCP fait le stockage de la chaleur sensible jusqu'à 14 :30 h.

[16 :15 - 00 :00] la courbe de MCP présente une deuxième inflexion à l'environ de 18 h, la température de la courbe avec MCP reste supérieure à celle sans MCP dans la période de décroissance des températures.

L'importance de cette période est qu'elle présente l'effet de déstockage de la chaleur latente du MCP sur la température de sortie du capteur. Le gain en température dû au déstockage de la chaleur va nous garantir l'extension du temps de séchage.

La figure (4.5b) représente la comparaison entre la variation de température à la sortie de la cheminée solaire dans les cas de capteur avec et sans MCP, on peut remarquer que la température à la sortie de cheminée (capteur sans MCP) et supérieur à celle qui est avec (capteur avec MCP) à un petit écart de température de 2°C entre (7: h30- 13h) , cette dernière période est la période de stockage d'énergie par la chaleur sensible de MCP et après jusqu'à 00 : 00h les courbes de ces deux cas se convertent puisque c'est la période de déstockage de l'énergie. Ce phénomène là assure une vitesse de ventilation convenable pour une application de séchage.

### 4.3- Etude du comportement thermique du séchoir solaire avec l'intégration de MCP au niveau de la cheminée solaire d'évacuation

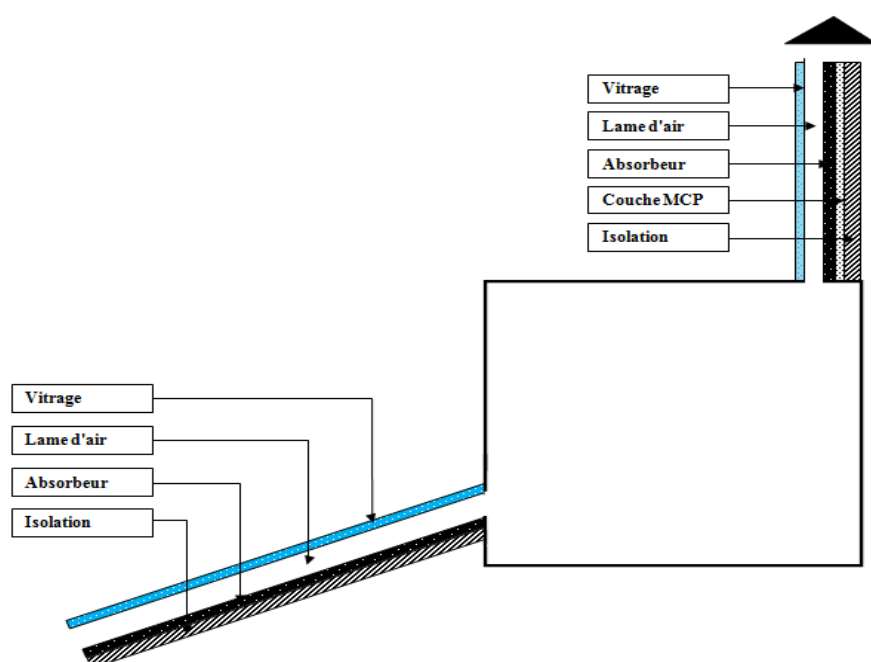


Figure (4.6) : Schéma descriptif du séchoir avec intégration de MCP au niveau de la cheminée solaire

#### a- Distribution de température

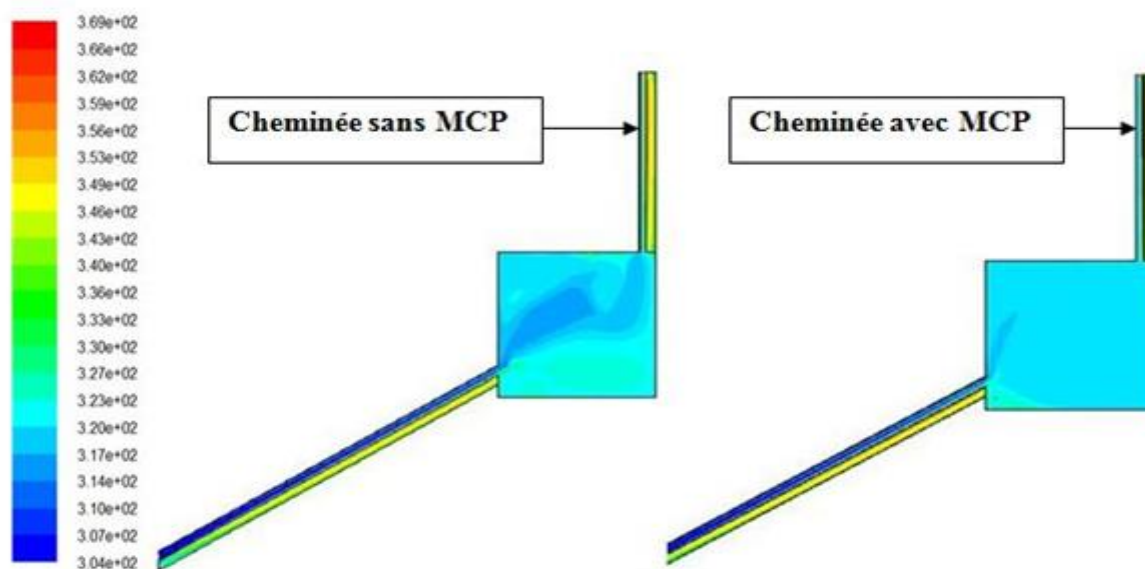
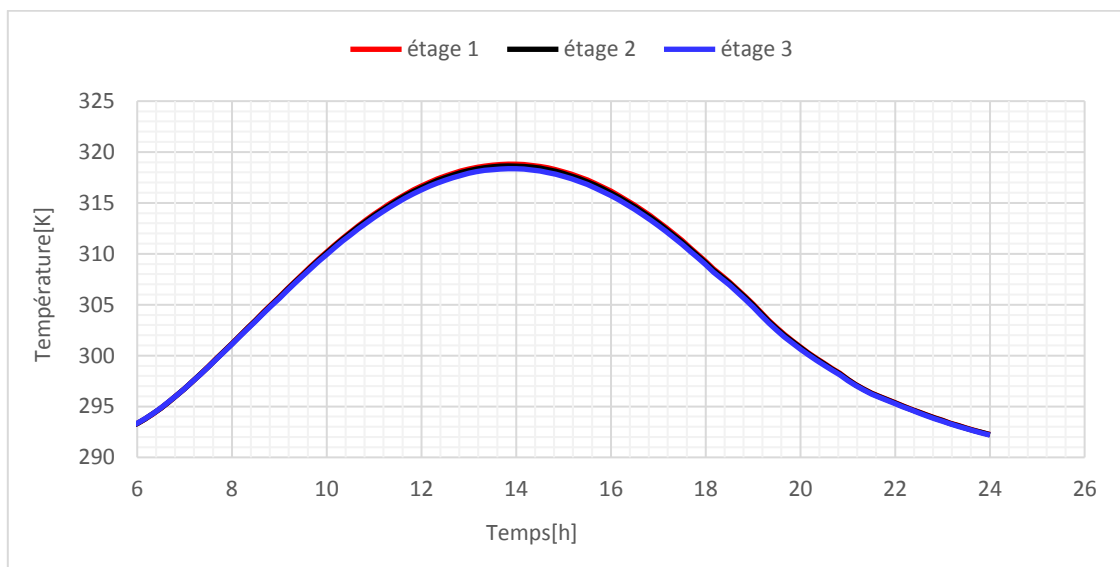


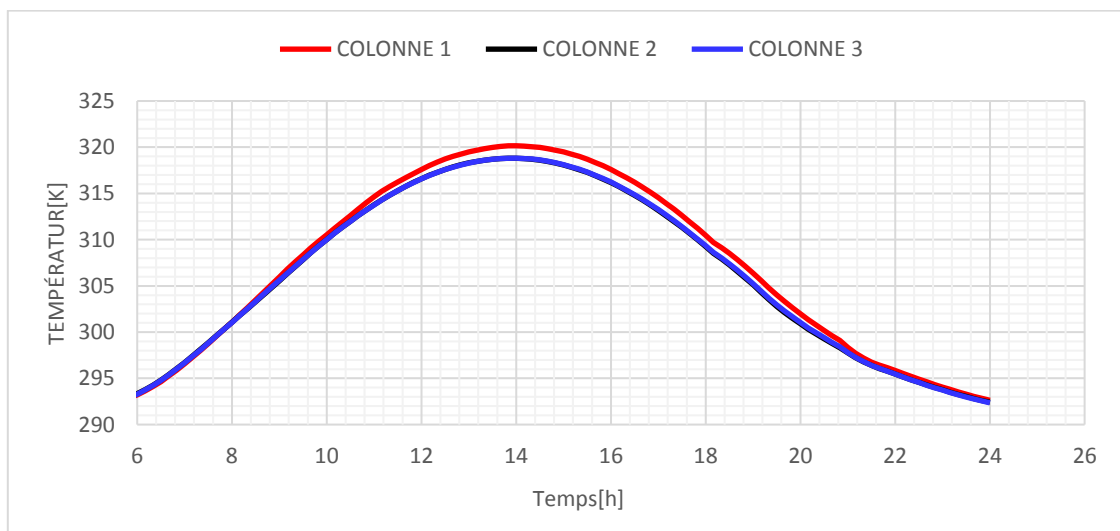
Figure (4.7) : Champ de température au sein du séchoir dans le cas de cheminée solaire sans et avec MCP

Dans l'objectif de vérifier et trouver une solution de l'homogénéité de distribution de température à l'intérieur de la chambre de séchage, nous avons présenté dans la figure (4.7) le résultat de simulation des distributions des températures au sein de séchoir solaire avec l'intégration des matériaux à changement de phase dans la cheminée solaire avec une couche de MCP (0,5 cm) au-dessous de l'absorbeur comme la figure (4.6) explique, nous constatons que la distribution des températures dans le cas de MCP à la cheminée est totalement homogène à un degré de température de (48°C) par rapport à celle qui est sans MCP (non homogène).

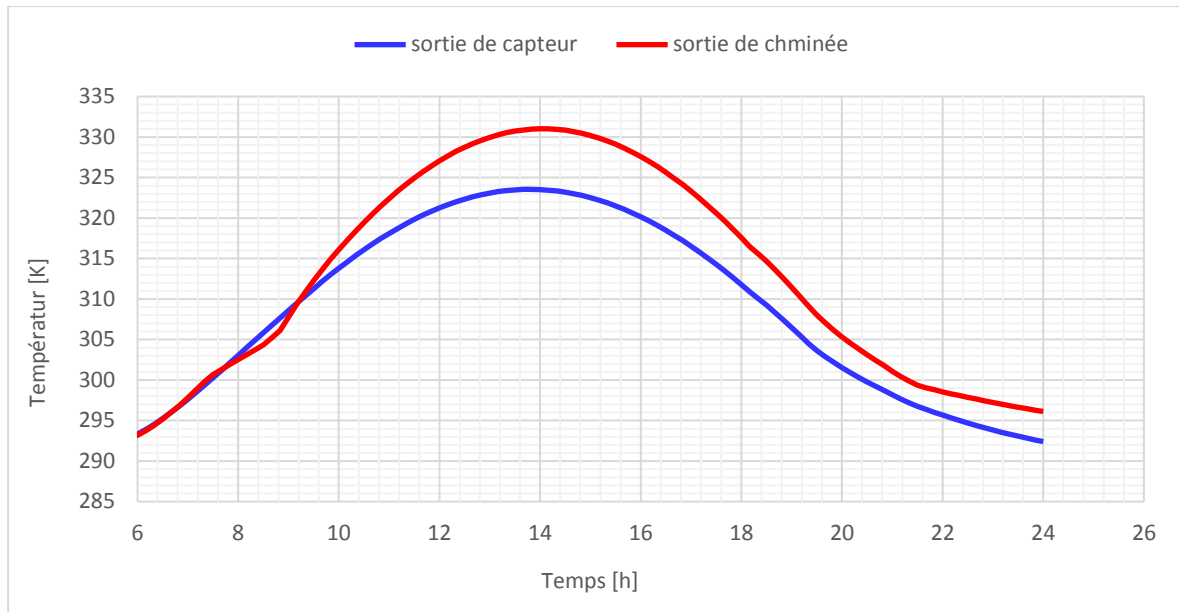
#### b- Variations des températures dans différents points du séchoir



**Figure (4.8) : Température dans la chambre au niveau des étages horizontaux**



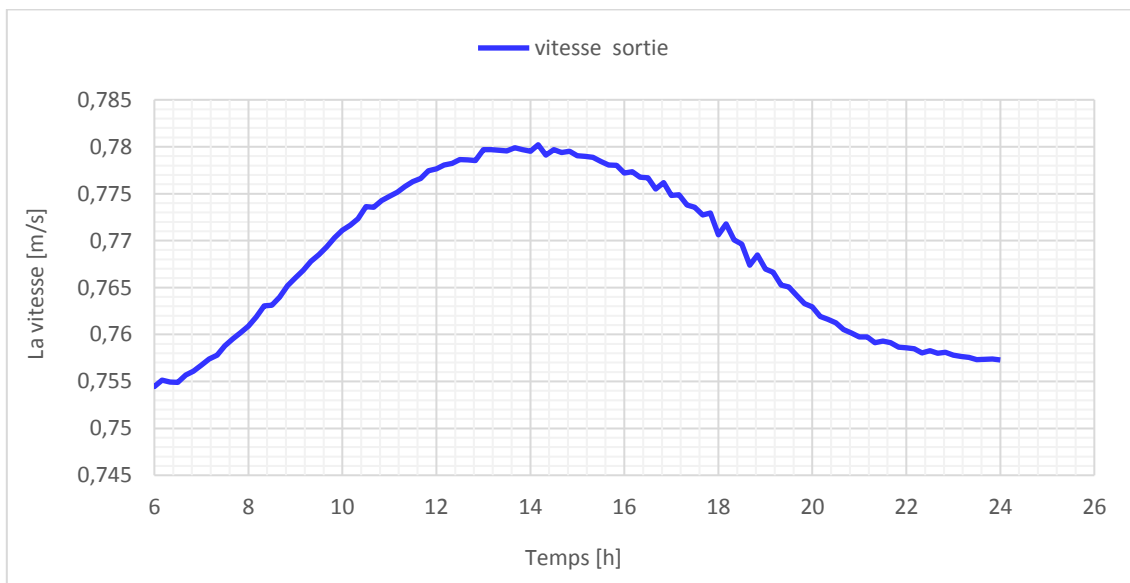
**Figure (4.9) : Température dans la chambre au niveau des colonnes verticales**



**Figure (4.10) : Température à la sortie du capteur et la cheminée dans le cas de cheminée avec MCP**

Les figures (4.8), (4.9) et (4.10) représentent respectivement la variation de température dans les étages horizontaux, les colonnes de la chambre, et la température à la sortie du capteur et de la cheminée. Les figures (4.8), (4.9), expliquent la bonne homogénéité de distribution par les valeurs des températures au niveau des étages et colonnes sont les mêmes de ( $T=48^{\circ}\text{C}$ ) sauf un petit écart de température au niveau de la colonne 3 de  $\Delta T= 2^{\circ}\text{C}$  par rapport aux autres.

#### c- Vitesse à la sortie de la cheminée solaire avec MCP

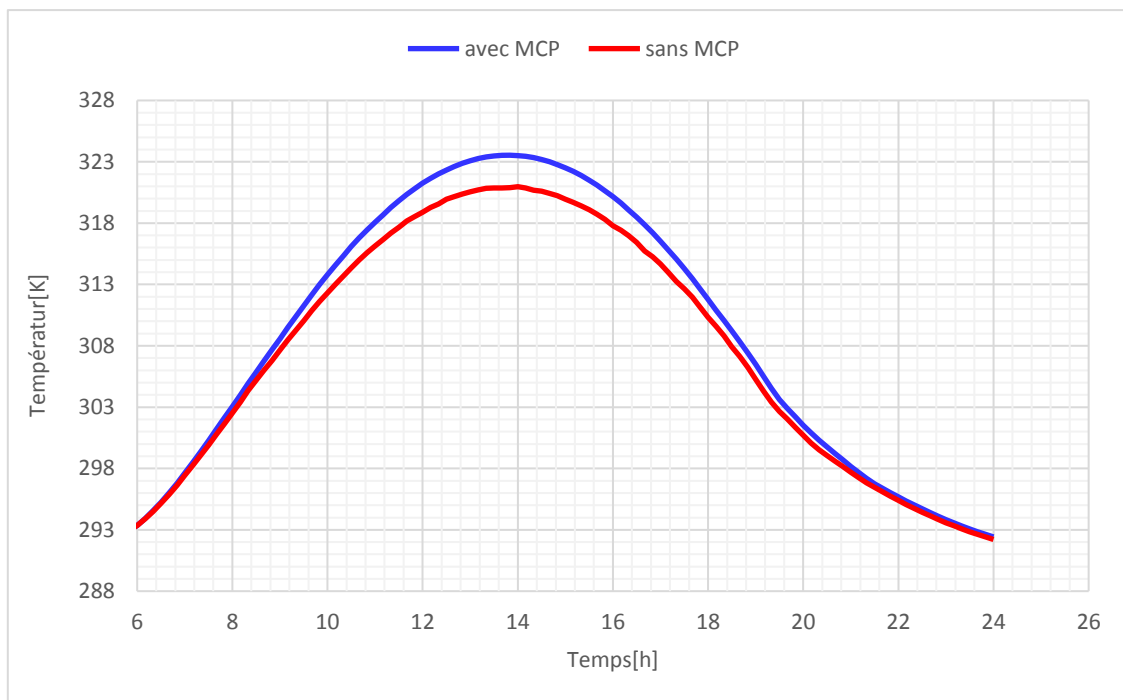


**Figure (4.11) : Variation de la vitesse à la sortie de la cheminée solaire avec MCP**

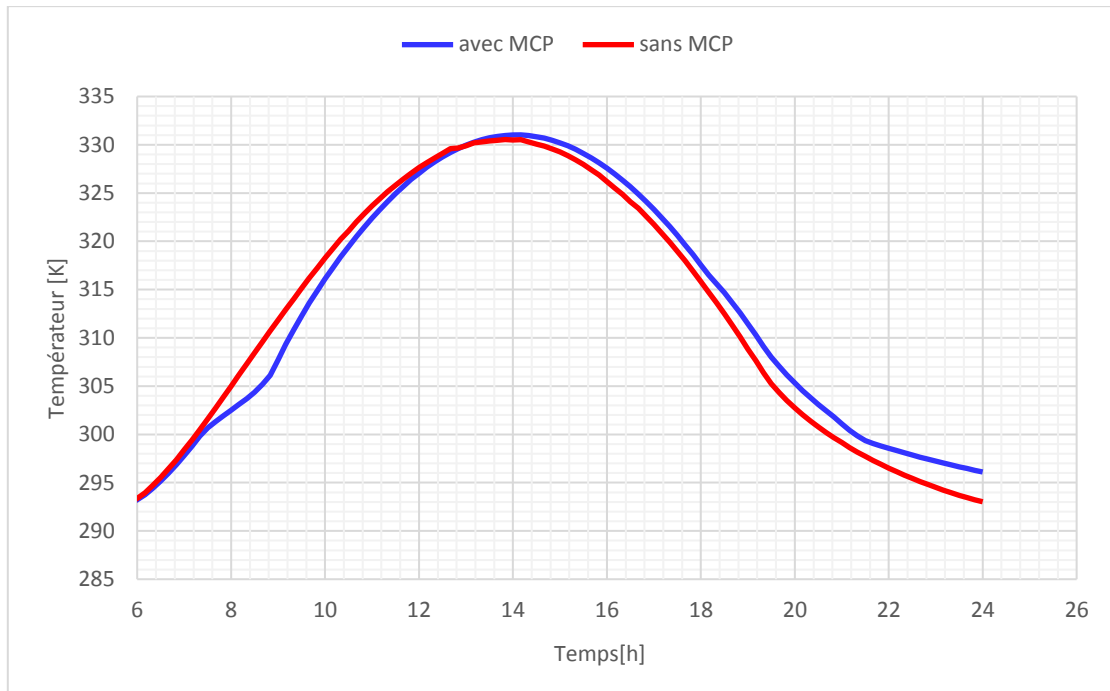


A partir de la figure (4.11) qui représente la courbe de variation de la vitesse à la sortie de la cheminée en fonction du temps dans le cas où il y a MCP au niveau de la cheminée. On peut remarquer, dans la vision de notre objectif qui s'intéresse à l'amélioration de la vitesse de ventilation naturelle du séchoir, que la vitesse a varié entre [0,75-0,78 m/s] pendant toute la journée sachant que le point pic de la vitesse est à 14h de (0,78m/s) avec une température au sein de la chambre ( $T=48^{\circ}\text{C}$ ) et avec une distribution de température homogène. Pour cela on peut dire que ce cas de données considéré optimal pour des applications de séchage des produits agroalimentaires de teneur en eau élevée tel que la tomate par exemple, problème soulevé par A. Babahanni [50, 51].

**d- Comparaison des températures à la sortie de capteur en cas de cheminée solaire sans et avec MCP**



**Figure (4.12) : Variation de température à la sortie de capteur dans le cas de cheminée avec MCP**



**Figure (4.13) : Variation de température à la sortie de la cheminée dans le cas d'une cheminée avec MCP**

Les figures (4.12), (4.13), représentent la comparaison des courbes de la variation de température à la sortie de capteur et à la sortie de cheminée dans les cas de sans et avec intégration de MCP. On remarque dans la figure (4.12) que les deux courbes de températures sans et avec MCP sont superposées de [6h30- 8h00], mais à partir de 8h00 à 14h00, nous avons mentionné que les valeurs de température à la sortie de capteur avec une cheminée à MCP sont élevées par rapport à la courbe sans MCP puis qu'il y a l'effet de période de stockage de l'énergie par la chaleur sensible, à un écart de température maximum  $\Delta T = 4^\circ\text{C}$  à 14h00, après 14h00 les deux courbes vont diminuer mais la courbe avec MCP reste un peu élevée par rapport à celle sans MCP jusqu'à 21h30 à cause de la période de déstockage d'énergie puis finalement à partir 21h30 les courbes reviennent identiques.

Dans la figure (4.13), qui représente les deux courbes de la variation de température à la sortie de cheminée solaire pour les cas sans et avec MCP, nous remarquons les mêmes remarques de cas d'intégration de MCP au niveau de capteur. La seule différence ici est dans le cas où l'intégration de MCP est pour augmenter le gradient de température entre l'entrée et la sortie de la cheminée solaire pour améliorer la ventilation naturelle du séchoir ; on remarque alors une extension de temps de ventilation par le temps de déstockage de l'énergie de MCP au niveau de cheminée solaire.

#### **4.4- Etude du comportement thermique du séchoir solaire avec l'intégration de MCP au niveau du capteur et au niveau de la cheminée**

Après avoir étudié le comportement thermique du séchoir par l'intégration de matériaux à changement de phase dans différentes parties de séchoir solaire soit une fois au niveau de capteur et d'autre fois au niveau de la cheminée et à partir la comparaison de tous ces résultats avec l'état sans MCP, et après tout les comparaison on peut dire que l'amélioration de procédure de séchage est très significative de plusieurs points de vue tels que :

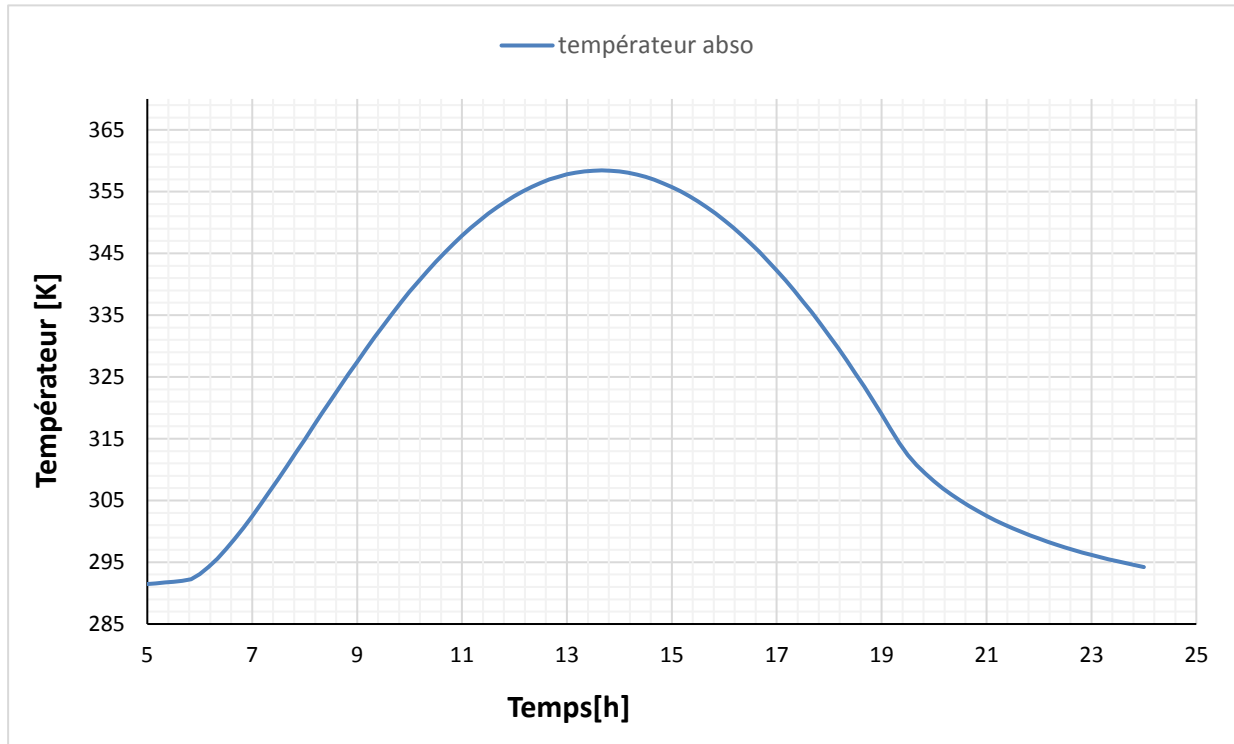
- 1- L'homogénéité de distribution de température au sein de la chambre de séchage qui résout l'ancien problème de stratification thermique [50, 51]
- 2- Les températures de séchage obtenues dans la chambre de séchage sont d'un ordre de grandeur convenable pour sécher les produits agroalimentaires à divers teneurs en eau initiales.
- 3- La vitesse de ventilation naturelle qui est l'objectif de notre travail est amélioré à partir des valeurs de vitesse que nous avons obtenue à la sortie de la chambre de séchage avec absence des points d'accumulation de température.
- 4- Extension du temps de séchage après le coucher de soleil où il y a l'effet de déstockage d'énergie de MCP intégré dans le capteur et la croissance de temps de bonne ventilation naturelle où il y a l'effet de l'intégration de MCP au niveau de la cheminée solaire. Mais dans tous les cas précédents de l'intégration des MCP toujours l'effet de la période de déstockage de l'énergie est un peu faible par rapport à ce qu'il y a dans la littérature de matériaux à changement de phase [33]. Cela peut remettre en cause notre choix de MCP et pour cela nous avons fait une méthode de choix de MCP à partir la température de l'absorbeur (min et max) pour approuver notre choix sur la chaleur latente et sensible de MCP selon les caractéristiques thermiques de notre absorbeur. Cette méthode est montrée dans la figure (4.14) suivante

#### **4.5- Vérification de choix de la nature du matériau à changement de phase**

Les matériaux à changement de phase sont caractérisés par une température de fusion et chaleur latente déterminé. A partir d'utilisation des différents MCP avec une épaisseur fixe (1cm) dans le capteur et (0,5cm) dans la cheminée l'influence de ces configurations a été représentée dans cette partie d'étude.

Nous avons déterminé le type de MCP à partir les critères suivants :

-Le traçage de la courbe de température de l'absorbeur pendant toute la journée figure (4.14)



**Figure (4.14) : Variation de la température de l'absorbeur au cours de la journée**

- Détermination des temps de lever et coucher de soleil sur la courbe
- Détermination de la température de l'absorbeur au coucher de soleil
- Choix du MCP ayant une température de fusion supérieure à la température d'absorbeur au coucher du soleil.

Cette dernière partie de choix du MCP nous donne indique que le choix le plus convenable pour notre prototype est le MCP (Paraffine WAX). C'est ce matériau que nous avons utilisé pour le cas d'intégration de MCP dans les deux parties du séchoir : capteur et cheminée au même temps pour avoir la différence sur l'effet et le temps de déstockage de l'énergie

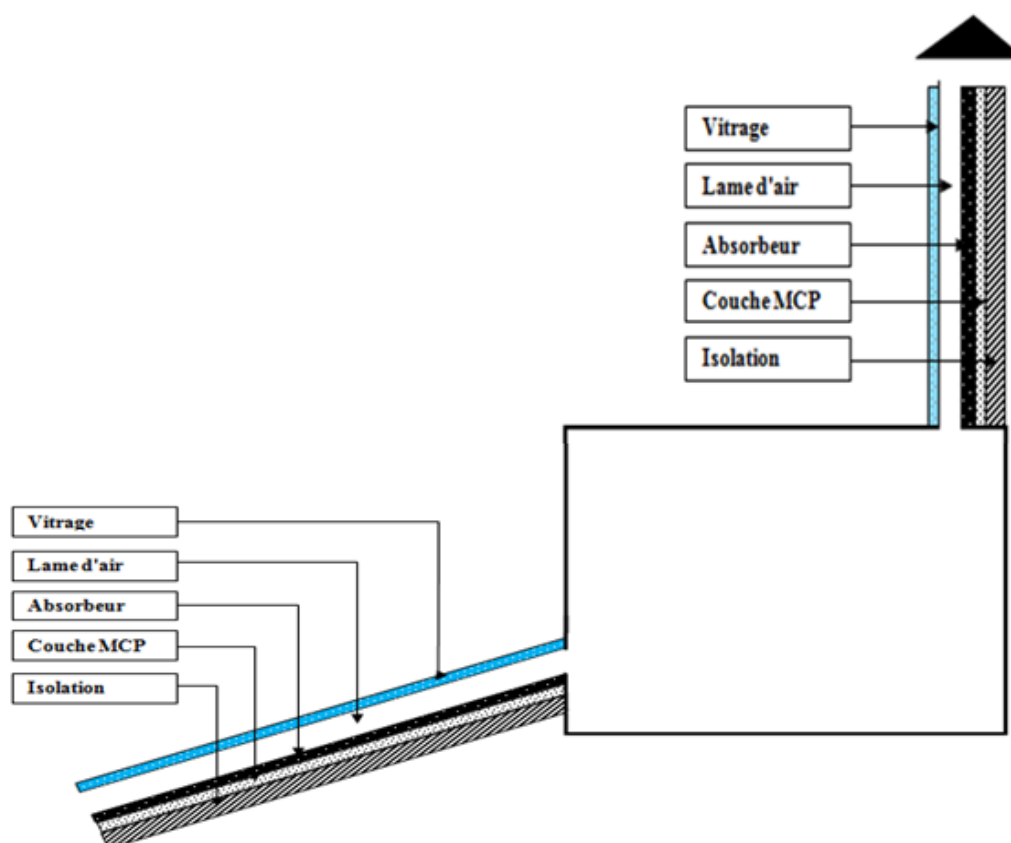


Figure (4.15) : Schéma descriptif du séchoir avec intégration de MCP au niveau du capteur et de la cheminée solaire

a- Distribution des températures

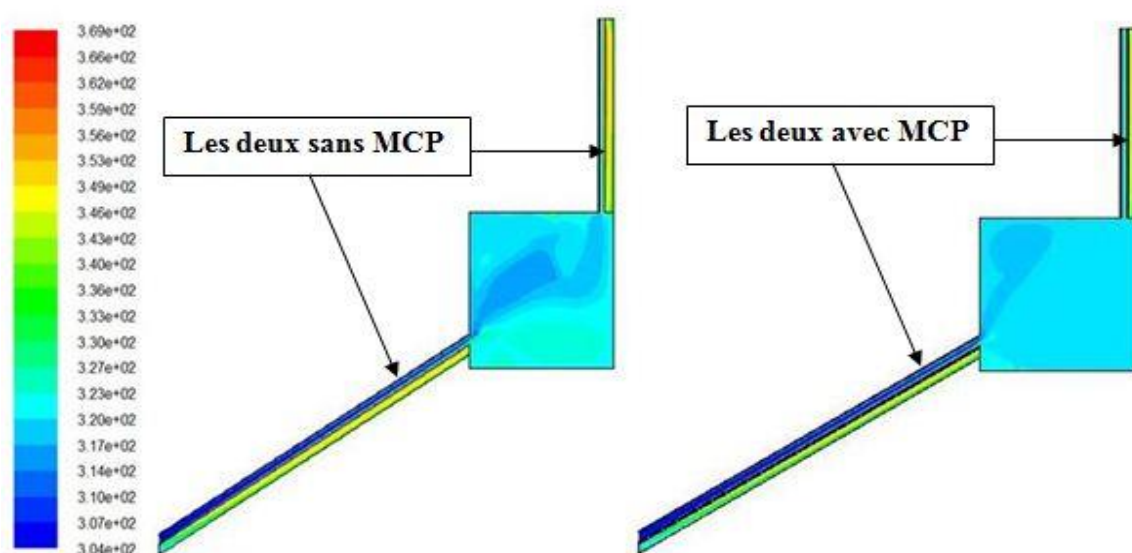
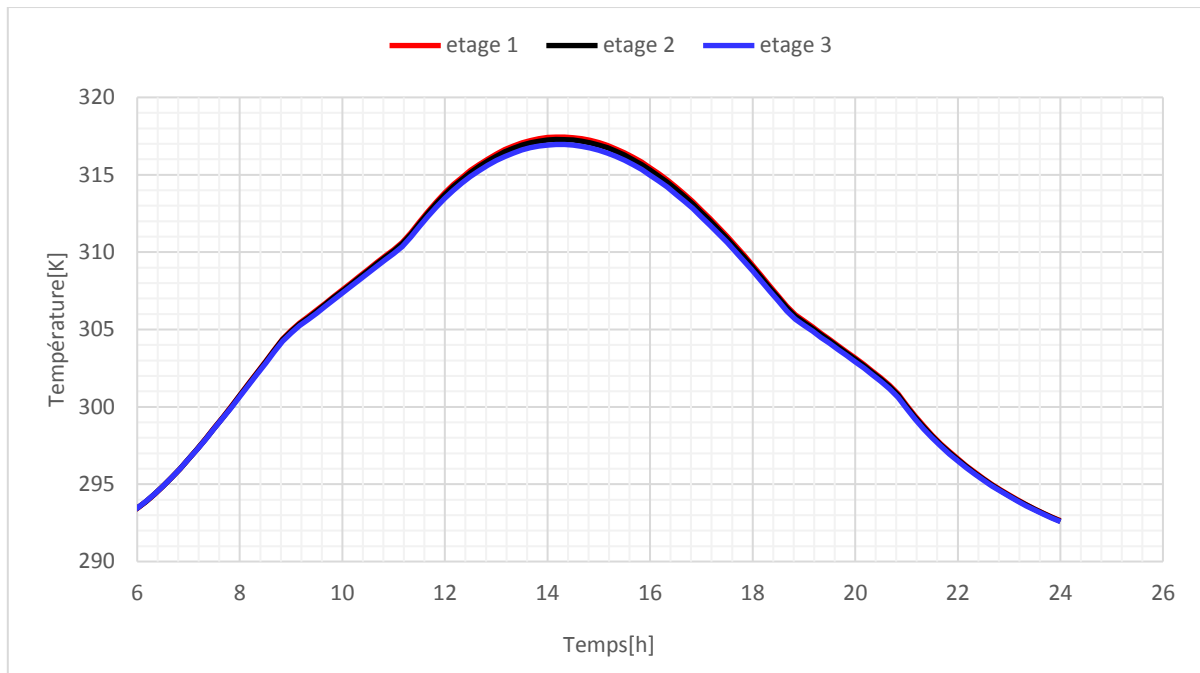


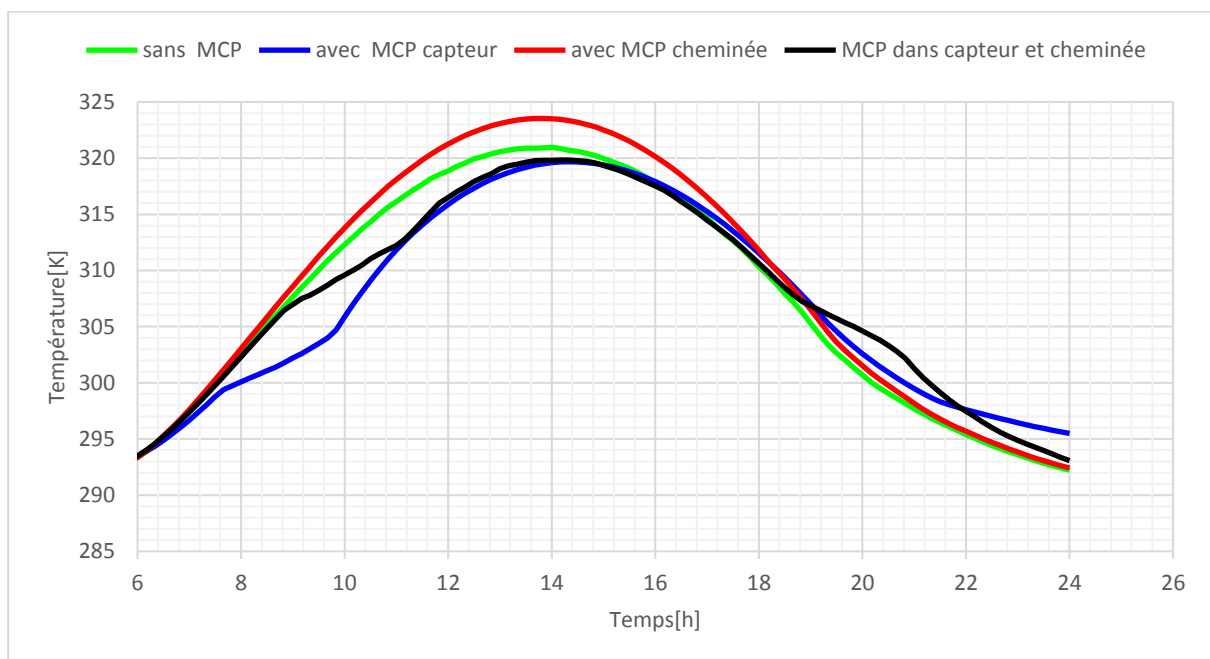
Figure (4.16) : Champ de température au sein du séchoir dans le cas d'intégration de MCP dans le capteur et dans la cheminée

### b- Variations des températures dans différents points du séchoir

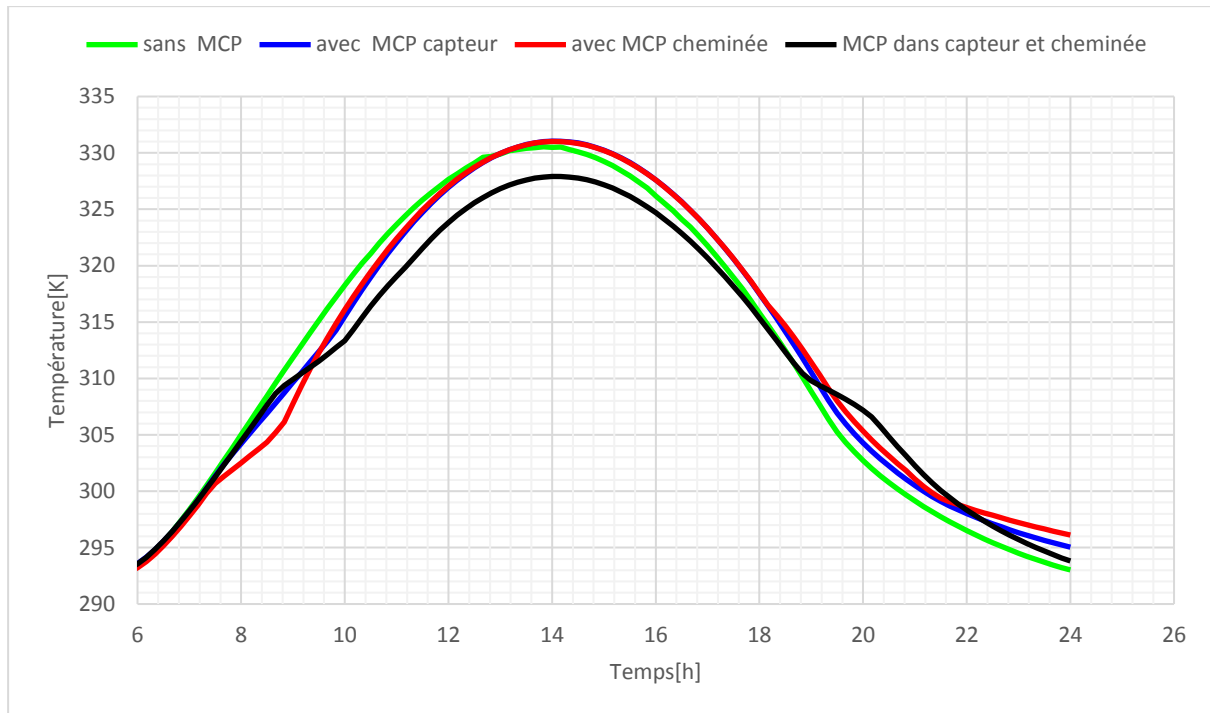


**Figure (4.17) : Température dans la chambre au niveau des étages horizontaux**

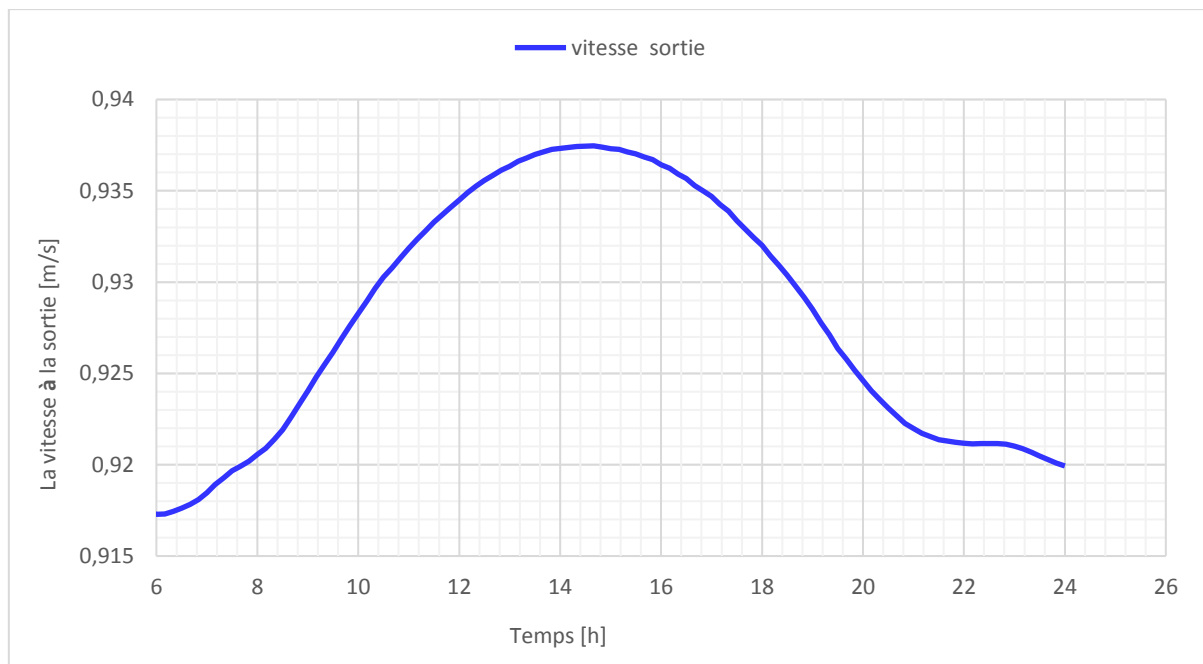
Les figures (4.16) et (4.17) représentent la distribution des températures dans la chambre où on remarque que la distribution est totalement homogène sauf un petit écart de température à la sortie du capteur où il y a l'effet de la vitesse à l'entrée du capteur sous l'influence de l'intégration de MCP wax dans les deux parties de séchoir.



**Figure (4.18) : Température à la sortie du capteur dans le cas d'intégration simultanée de MCP**

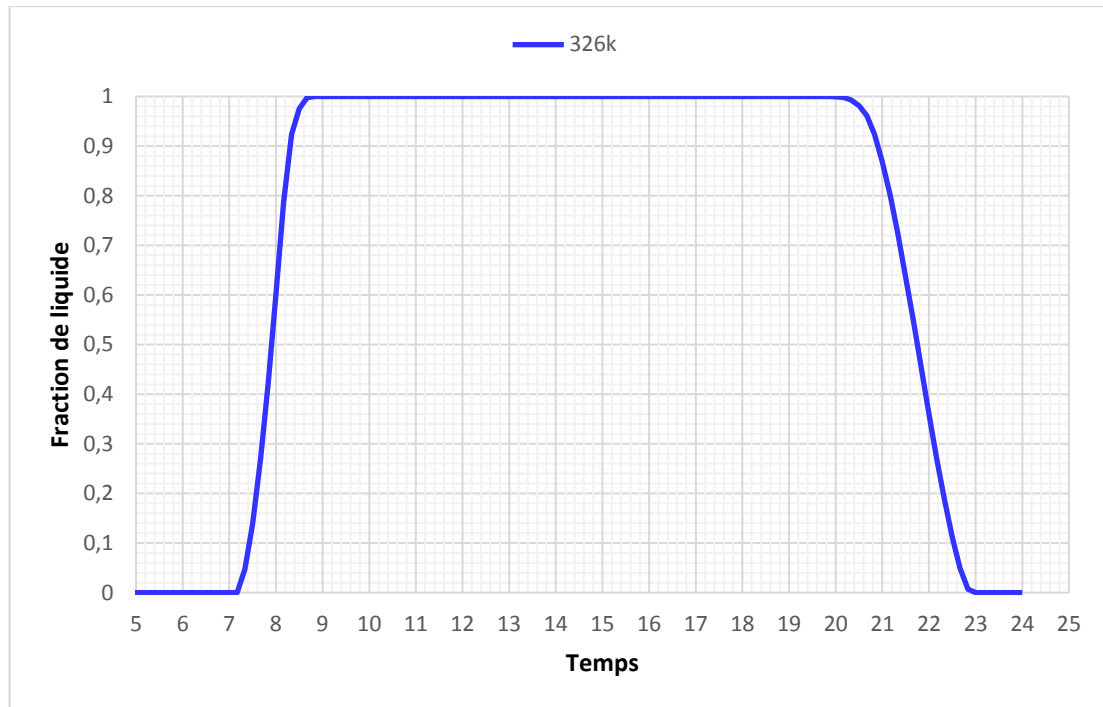


**Figure (4.19) : Température à la sortie de la cheminée dans le cas d'intégration simultanée de MCP**



**Figure (4.20) : Courbe de la variation de la vitesse à la sortie de la cheminée dans le cas de MCP avec les deux emplacements**

A partir des figures (4.18, 4.19) on peut remarquer clairement l'influence de l'intégration de MCP wax par la différence de temps de séchage quand comparé avec les autres cas précédents de (1h15) qui explique l'importance de ce choix de matériau MCP.



**Figure (4.21) : Fraction de liquide en fonction de temps pour MCP**

La figure (4.21) ci-dessus représente la fraction de liquide du volume total de MCP placé au dessous de l'absorbeur. On remarque que de MCP testés ont achevé au maximum leur cycle de changement de phase (solide-liquide et liquide-solide. Tandis qu'on peut remarquer aussi qu'une partie de MCP avec température de fusion 326 K ne revient pas à l'état solide et donc que le MCP concerné a travaillé partiellement, ce qui laisse penser à la nécessité d'une approche d'optimisation.



---

# *CONCLUSION GENERALE*

---

## **CONCLUSION GENERALE**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude par simulation numérique d'une cheminée solaire intégrée avec une couche de matériau à changement de phase et destinée à la ventilation naturelle d'un séchoir solaire, particulièrement dans les périodes de faible ou non ensoleillement. La présente étude a porté sur la simulation numérique du séchoir solaire sans et avec intégration d'une couche plate d'un matériau à changement de phase dans l'objectif de stocker partiellement l'énergie thermique par chaleur latente.

Plusieurs calculs de simulations ont été pratiqués moyennant la méthode des volumes finis par un modèle instationnaire bidimensionnel mis en application sur le logiciel CFD Fluent dans une méthodologie de traitement telle que :

a- Essais de validation du modèle numérique adopté, faisant recours à des résultats expérimentaux relevés sur un séchoir solaire indirect, conçu et réalisé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides et sahariennes (LENREZA, Université de Ouargla, Algérie), et ce dans le cadre de travaux de master antérieurs (2015/2016).

b- Simulation du séchoir solaire sans intégration de MCP dans le sens de montrer les effets des différents paramètres de conception sur le comportement thermique du système ; à savoir type de cheminée (ordinaire et solaire), positionnement de la cheminée solaire (centrée, décentrée côté nord) et épaisseur de la lame d'air traversant la cheminée solaire (3cm, 4cm et 5 cm).

c- Simulation du séchoir solaire en présence d'un MCP selon trois configurations différentes :

1 - avec intégration d'une couche plate de MCP au dessous de la plaque absorbante au niveau de capteur

2 - avec intégration d'une couche plate de MCP au dessous de la plaque absorbante de cheminée solaire

3- avec intégration d'une couche plate de MCP simultanément au-dessous de la plaque absorbante du capteur et de la cheminée solaire.

Les résultats obtenus dans cette étude, dans le cas d'absence de MCP, nous avons révélé des améliorations sensibles pour le cas d'une cheminée solaire par rapport à l'ordinaire avec un résultat meilleur pour la cheminée solaire d'épaisseur de lame de 3cm et décentrée au côté nord. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration d'une couche de MCP ont montré une nette amélioration du comportement thermique, notamment en période après coucher du soleil. En effet parmi les différents endroits d'emplacement de MCP dans le capteur ou dans

La cheminée ou les deux, le cas d'intégration du MCP (paraffine wax) dans le capteur et la cheminée donnait un meilleur apport thermique pour deux heures de non ensoleillement et une ventilation naturelle convenable de l'ordre de 0,7 à 0,9 m/s.

A l'issue des différentes simulations entreprises nous avons pu retenir quelques éléments que nous notons, en perspectives.

- Effectuer une étude technico-économique afin d'optimiser la quantité du MCP à utiliser
- Il serait aussi très utile d'étudier les effets du mode de distribution du MCP dans le collecteur et la cheminée solaire
- Etudier expérimentalement une cheminée solaire à MCP installée sur un prototype de séchoir solaire indirect.

---

*REFERENCES*  
*BIBLIOGRAPHIQUES*

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HOUHOU HATEM, (2012), Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des certaines produits agro-alimentaires, mémoire de magistère, Université Mohamed Khider – Biskra
- [2] T. Miyazaki, A. Akisawa, T. Kashiwagi, (2006), The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate, Renewable Energy, vol. 31, pp. 987–1010.
- [3] Archiv Bassey 74655 Le séchage solaire en Afrique Compte rendu du colloque tenu à Dakar, Sénégal, du 21 au 24 juillet 1986
- [4] Marchés tropicaux, no 1493 du 21/06/74 (numéro spécial). Sénégal 1960-1973:14 ans de développement économique et social.
- [5] <https://www.google.dz/search?q=La+chemin+ordinaire>
- [6] Yoshiteru Shinada, Ken-ichi Kimura, Hiromasa Katsuragi, Sung-ki Song, Natural Ventilation System for a School Building Combined with Solar Chimney and Underground Pit, Proceedings of Annual Meeting of Japan Solar Energy Society. Suwa. pp. 83-86. (In Japanese) (2007)
- [7] <https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSEpBF94SwKOEIaWWU6BZddW6ixzaSvCktPD-UbjCiVp47HsW-V>
- [8] Mazar, M. 2012. Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public/ Cas du département d'Architecture de Tamda (Tizi Ouzou), mémoire de magistère, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.
- [9] **M.V. Ramana Murthy**, (2008) A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers Renewable and sustainable energy reviews RSER-548; pp 10-548
- [10] Mathur Jyotirmay,, Anupma, Mathur Sanjay, , Experimental investigation on four different types of solar chimneys, Advances in Energy Research AER, pp. 151-156 (2006)
- [11] Adèle SOUPART-CARON, (2015), Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase, thèse de doctorat, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES
- [12] S. Buflino, Les matériaux à changement de phase, 2008
- [13] S.Blaise Ekomy Ango (2011), Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase, Mémoire de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech (France).
- [14] M. Ahmad (2004), Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments, Couplage matériaux changement de phase, super-isolation apports solaires, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier.

- [15] A. Gil, E. Oro, G. Peiro, S. Alvarez, et L. F. Cabeza, "Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling", *Renewable Energy*, vol. 57, no. 0, pp. 366-371, Sept.2013.
- [16] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, et D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, Feb.2009
- [17] A. Abhat, "Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials", *Sol. Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 313-332, 1983.
- [18] T. E. Alam, J. S. Dhau, D. Y. Goswami, et E. Stefanakos,( Sept.2015) "Macro-encapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems", *Applied Energy*, vol. 154, pp. 92-101,.
- [19] Ben Xu et al, (2015), Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments, *Applied Energy*, 160, pp286–307.
- [20] ARBIA Aissa et CHAOUBI Ouafa, (2015), Contribution à la simulation des transferts thermiques dans un capteur solaire plan pour application de séchage, mémoire master énergétique académique, Université KASDI MERBAH Ouargla.
- [21] HENDAOUI Islam et REGAGDA Belkacem, (2015) "Etude expérimentale des performances des capteurs solaires plans à air destiné aux applications séchage. Mémoire master génie énergétique académique, Université KASDI MERBAH Ouargla.
- [22] A. Mefti; M.Y Bouroubi; H. Mimouni, Evaluation du potentiel énergétique solaire, *Bulletin des Energies Renouvelables*, N° 2, P12, décembre 2002.
- [23] Quoilin Sylvain (Ingénieur Civil Electromécanicien/Energéticien). Les Centrales Solaires à Concentration, (Mai 2007). Université de Liège. Faculté des sciences appliquées
- [24] Guehza Med lazhar, Impact de l'espace entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire sur le rendement du capteur plan à double vitrage, mémoire de magister Université de Ouargla. 2006
- [25] Bouzaffa Med, Les Capteurs Solaires Plans, mémoire de magister, option énergétique, université d'Ouargla.
- [26] [www.solairethermique.guidenr.fr/images/capteur-plan-1.jpg](http://www.solairethermique.guidenr.fr/images/capteur-plan-1.jpg),
- [27] Site web :[[https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur\\_solaire\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_thermique)]
- [28] P. H. Communay "Héliothermique, (2002). Le gisement solaire, méthode et calculs" Groupe de Recherche et D'édition, France

[29] [https://www.google.dz/search?q=S%C3%A9chage+naturel+ou+au+soleil&espv=2&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi0rZKxz7jTAhXHBbRQKHbFRC9QQ\\_AUIBigB&biw=1366&bih=613](https://www.google.dz/search?q=S%C3%A9chage+naturel+ou+au+soleil&espv=2&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi0rZKxz7jTAhXHBbRQKHbFRC9QQ_AUIBigB&biw=1366&bih=613)

[30] [https://portail.cder.dz/IMG/png/2\\_sechoir\\_solaire\\_direct\\_portatif.png](https://portail.cder.dz/IMG/png/2_sechoir_solaire_direct_portatif.png)

[31] [http://ekldata.com/vhBb4TgtoJvYdKOvjY\\_WQj4W11Y.jpg](http://ekldata.com/vhBb4TgtoJvYdKOvjY_WQj4W11Y.jpg)

[32] P. Durez, (1999), "Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés", Edition du Gret, France.

[33] Shuli Liu , Yongcai Li, An experimental study on the thermal performance of a solar chimney without and with PCM (2015)

[34] Amos Madhlopa, (2016), "Effect of controlling airflow in a solar chimney on thermal load in a built environment", Journal of Engineering, Design and Technology

[35] Mohammad O. Hamdan and Saud Khashan, Numerical Investigation of Solar Chimney Power Plant in UAE, 2014

[36] N. pasumarthi, S. A. sherif, experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model-part I: mathematical model development

[37] B. ABOUELKHAYRAT, H. HAMZA, J. LAHJOMRI, A. OUBARRA, (2013) ; Comportement thermique d'une toiture à doubles couches de matériaux de changement de phase en période estivale et hivernal, 21<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique

[38] BOURGUBA Djaoued, BEKKOUCHE Ismail, (2014) ; Simulation numérique du stockage de l'énergie solaire par chaleur latente, mémoire Master

[39] Adèle SOUPART-CARON, (2015), Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase, Thèse Génie des procédés. Université Grenoble Alpes, 2015. Français

[40] Nadia Saifi, Contribution à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides. Université Kasdi Merbah Ouargla. Thèse Génie des procédés. 2014/2015

[41] Wikipédia, Diffusivité thermique [en ligne] (17 février 2016, à 01:23.) Disponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusivité\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusivité_thermique)> (consultée le 03/03/2016).

[42] Les données du Data base de Fluent.

- [43] Zhenqian Chen et al, Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin, integrated metal foam porous structure filled with paraffin, Applied Thermal Engineering, 2010, vol 30, pp 1967-1973.
- [44] Abdul Jabbar N. Khalifa, A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material, Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, vol 44, pp 174-181.
- [45] Wei Chen et Wei Liu, Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber, Applied Thermal Engineering, vol 28, 2008, pp 1251–1258.
- [46] S. Oudjedi1 et al, Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie : 2). Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger, 2008, pp 255 – 266.
- [47] P. Naphon, Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol 32, 2005, pp.140–150.
- [48] D. Fedala, ''Initiation à la CFD'', Octobre 2007
- [49] CHAFOU Noura, KHEBBAR Omnia. Etude expérimentale de séchage solaire de la tomate à convection naturelle. 2016, mémoire master génie des procédés, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [50] Babahani Amhamed. Investigation expérimentale d'un séchoir Solaire indirect en vue d'amélioration de la qualité du produit fini. Magister Génie des Procédés, Université d'Ouargla, 2013.
- [51] A. Babahani, D. Halassa, A. Boubekri, D. Mennouche, H. Belahia, Proc. Du 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage, Ouargla - Algeria, (2015) 419-424
- [52] AKCHICHE Zineb. Étude de comportement d'une cheminée solaire en vue de l'isolation thermique. Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah Ouargla 05/05/2011
- [53] BENHAMZA Abderrahmane et SETTOU Belkhir, (2016), Simulation numérique d'un capteur solaire plan utilisant des matériaux à changement de phase. Mémoire de Master Université KASDI Merbah Ouargla



## الملخص

هذا العمل مساهمة علمية، عن طريق المحاكاة العددية، لتحسين التهوية الطبيعية الحصول على توزع امثل للحرارة داخل الغرفة التجفيف فيهدف إلى تحسين أداء المجفف الشمسي مع أقل تكلفة و لزيادة مدة اشتغاله اليومي، تم هذا العمل عبر جزئين الأول اللاقط الشمسي ومدخنة الشمسية بدون مواد تغير الحالة الفيزيائية و الثاني بإضافة طبقة من هذه المواد تحت اللوح الممتص، و لغرض متابعة تخزين جزء من الطاقة عبر الحرارة اللاطية و زيادة في عملية التهوية الطبيعية تم القيام بالكثير من الحسابات، عبر برنامج CFD Fluent الذي يعتمد على طريقة الحل بالحجم المحدود الحالة المعالجة كانت ثنائية البعد و متعلقة بالزمن، و تم تغير عدة عوامل في هندسة الشكل المعالج و المقارنة بين حالة واختير الحلة الفضل من اجل إضافة مواد تغير الحالة الفيزيائية ثم نقارن بين حالتين بإضافة مواد تغير الحالة الفيزيائية و بدون إضافتها.

النتائج المحصل عليها من الدراسة، أعطت تأثير كبير عند القيام بتغيير العوامل، [نوع المدخنة (مدخنة شمسية، مدخنة عدية)، موقع المدخنة (وسط، الجهة الشمالية)، سُمك الممر الهوائي (3 سم، 4 سم، 5 سم)، و معامل التشكل] و من جهة أخرى النتائج من حالة إضافة تلك المواد على مستوى اللاقط الشمسي أعطت، بسُمك 1 سم يزيد في مدة اشتغال اللاقط لمدة تصل إلى ساعتين و تحسين في عملية التهوية الطبيعية للمجفف الشمسي بضمان توزع متجانس للحرارة داخل المجفف الشمسي بدرجة حرارة 48 درجة مئوية وسرعة استخراج الهواء 0،7 إلى 0،9 متر في الثانية.

**الكلمات المفتاحية:** مواد تغير الحالة الفيزيائية، اللاقط الشمسي، الطاقة الشمسية. المجفف الشمسي، المدخنة الشمسية، الحراري، والتهوية الطبيعية

## Résumé

Ce travail présente une étude, par le moyen de simulation numérique, à l'amélioration des performances thermiques dans un séchoir solaire indirect, sans et avec intégration des matériaux à changement de phase au niveau du capteur ou la cheminée ou simultanément dans les deux. La conception étudiée est destinée à la ventilation naturelle d'un séchoir solaire ainsi que l'augmentation de la durée de fonctionnement journalière du séchoir. Plusieurs calculs ont été faits, 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 séchoir avec ou sans MCP.

Les résultats obtenus, dans le cas d'absence de MCP, ont révélé des améliorations sensibles pour le cas d'une cheminée solaire par rapport à l'ordinaire avec un résultat meilleur pour la cheminée solaire d'épaisseur de lame de 3cm et décentrée au coté nord. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration d'une couche de MCP ont montré une nette amélioration du comportement thermique, notamment en période après coucher du soleil. En effet parmi les

différents endroits d'emplacement de MCP envisagés, le cas d'intégration du MCP (paraffine wax) dans le capteur et la cheminée donnait un meilleur apport thermique pour deux heures de non ensoleillement et une ventilation naturelle convenable de l'ordre de 0,7 à 0,9 m/s.

**Mots clés : cheminée solaire, stockage d'énergie, chaleur latente, MCP, capteur solaire**

### **Abstract**

This work presents a study, by the numerical simulation means, to improve thermal performances in an indirect solar drier, with and without integration of phase change materials on the level of solar collector or chimney or simultaneously in both. The studied design was intended for the natural ventilation of a solar drier as well as the increase in the daily operating time of the drier. Several calculations were done, using the finite volume method, with a two-dimensional non-stationary model applied on CFD Fluent software. To this end various geometrical and conceptual parameters were studied and compared in the case of a drier with or without MCP.

The obtained results, in the absence of MCP, revealed noticeable improvements in the case of a solar chimney compared to the ordinary one. The better result was obtained in case of north placed solar chimney with knife air thickness of 3cm. In addition, the results from the case of an integrated MCP layer showed a clear improvement of the thermal behavior, particularly in off sunshine period. Indeed among the various places of MCP (collector, chimney or on both), the case of integrated MCP (paraffin wax) in the solar collector and the chimney gave a better thermal contribution for two hours of non sunshine period and a suitable natural ventilation of about 0,7 to 0,9 m/s

**Key words: solar chimney, energy storage, latent heat, PCM, solar collector**