

EPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des sciences Appliquées

Département Génie Mécanique

Mémoire



Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Thème

**Etude de l'effet de l'intégration d'une
couche MCP sur les performances d'un
séchoir solaire direct**

Présenté et soutenu publiquement par :

Zengui Bachir et Mansouri Saïd

Soutenu Publiquement le:10/06/2018

Devant Le Jury:

ACHOURI El-Hadj	M A.A	Président	UKM-Ouargla
BECHKI Djamel	M C.A	Examineur	UKM-Ouargla
BOUBEKRI Abdelghani	Professeur	Encadreur	UKM-Ouargla

Année : 2017/2018

Remerciements

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

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

Nous remercions également messieurs, **Dr. BECHKI Djamel** et **Mr. ACHOURI El-Hadj** pour avoir gentiment accepté de faire partie du jury d'examen de ce mémoire.

Nos remerciements sont aussi particulièrement adressés à messieurs **SANDALI Messaoud** 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 des équipes de formation ayant participé par leurs efforts et conseils au cours de notre cursus de formation au département de génie mécanique.

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

Dédicaces

*Louange à Dieu, qui nous a fait pour compléter ce mémoire
et compléter cette modeste recherche scientifique, que je*

donne à :

*Ma mère et mon père et mes frères et tous mes amis et tous
professeurs*

Et à tous les étudiants du master mécanique.

Et à tous ceux qui m'ont aidé avec des conseils.

MANSOURI SAID

Dédicaces

*Louange à Dieu, qui nous a fait pour compléter ce mémoire
et compléter cette modeste recherche scientifique, que je*

donne à :

*Ma mère et mon père m'ont beaucoup aidé et à tous les
membres de ma famille.*

Et à mes amis : EL MOULDI, MASBAH, YUCEF,

MABROUK,

ABDASSAMAED, A BDALKAMAL et MASBAH.

Et à tous ceux qui m'ont aidé avec des conseils.

ZENGUI BACHIR

Tableau de Matière

Remerciement

Dédicace

Nomenclature

Liste des figures

Liste des Tableaux

Introduction générale Pages1

Chapitre I : Généralité sur le séchage et les séchoirs solaires

Introduction.....	3
I.1.Définition.....	3
I.2 Historique	3
I.3 Modes e séchage.....	4
I.4 Les avantages et les inconvénients du séchage solaire.....	4
I.5 Les séchoirs solaires.....	5
I.6 Les type des séchoirs solaires	5
I.6.1 Les séchoirs solaires indirects	5
I.6.1.1 Les avantages et les inconvénients du séchoir indirect.....	6
I.6.2 Les séchoirs solaires mixtes	7
I.6.3 Les séchoirs solaires directs	8
I.6.3.1 Principe de fonctionnement	9
I.6.3.2 Les avantages et les inconvénients du séchoir indirect.....	10
Conclusion	10

Chapitre II: Généralité sur les matériaux à changement de phase

Introduction.....	11
II.1 Définition du matériau à changement de phase	11
II.2 Principe du changement de phase	11
II.2.1 Le transfert thermique par chaleur sensible	11

II.2.2 Le transfert thermique par chaleur latente	12
II.3 Propriétés des matériaux à changement de phase.....	12
II.3.1 Critères thermodynamiques.....	13
II.3.2 Critères cinétiques.....	13
II.3.3 Critères chimiques.....	13
II.3.4 Critères économique	13
II.4 La classification des MCP	13
II.4.1 Les matériaux à changement d'état solide/liquide	15
II.5 Applications des matériaux à changement de phase.....	17
II.5.1 Applications dans l'industrie	17
II.5.2 Dans moteurs à combustion interne.....	17
II.5.3 Applications de MCP dans les bâtiments	17
II.5.4 Applications des MCP dans le stockage solaire.....	18
II.6 Conditionnement des MCP	18
Conclusion	20

Chapitre III: Présentation du problème physique

Introduction.....	21
III. 1 Géométrie du problème	21
III.2 Propriétés thermo-physiques.....	22
III.3 Hypothèses simplificatrices	23
III.4 Equations dimensionnelles gouvernantes	24
III.5 Conditions initiales et aux limites	24
III.6 Equation de la variation de l'intensité solaire en fonction de temps.....	25
III.7 L'équation de la variation de température ambiante en fonction du temps	25
III.8 Présentation brève des outils Gambit et Fluent.....	26
III.9 Principales étapes pour définir un problème de CFD.....	26
III.10 Résolution du problème avec le code Fluent	26
III.11Schéma du maillage du modèle physique adopté.....	28
Conclusion	28

Chapitre IV: Résultats et discussion

Introduction.....	30
-------------------	----

IV.1 Validation du modèle numérique	30
IV.2 Simulation numérique du séchoir solaire direct sans intégration des matériaux à changement de phase	32
IV.3 Simulation du séchoir solaire direct avec intégration des matériaux à changement de phase (MCP) pour la journée 11/04/201	33
IV.3.1 Evolution de l'intensité solaire en fonction du temps	33
IV.3.2 Evolution de la température ambiante en fonction du temps.....	34
IV.3.3 Effet de l'épaisseur de la couche MCP	35
IV.3.4 Effet de la nature du matériau à changement de phase	39
IV.4 Simulation du séchoir solaire direct avec intégration des matériaux à changement de phase (MCP) pour la journée (11/04/2017).....	41
IV.4.1 Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux à matériaux changement de phase (MCP) pour la journée (29/11/2017).....	41
IV.4.2 Effet de la nature du matériau à changement de phase	43
Conclusion générale	pages 46
Références Bibliographiques	
Résumé	

Nomenclature

Lettre latines

Symbole	Désignation	Unité
H	Hauteur	m
L	Longueur du séchoir solaire direct	m
I	Rayonnement solaire	$W.m^{-2}$
T	Température	K
T_a	Température ambiante	K
T_0	Température de référence	K
P	Pression	P_a
P atm	Pression atmosphérique	P_a
h_a	Coefficient de transfert thermique avec l'extérieur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
G	La gravité	$m.s^{-2}$
V_{vent}	Vitesse du vent	$m.s^{-1}$
T	Temps	s
U	La vitesse axiale	$m.s^{-1}$
V	La vitesse radiale	$m.s^{-1}$

Lettre grecque

Symboles	Designation	Unite
ρ	La masse volumique	$kg.m^{-3}$
ρ_p	Masse volumique du polystyrene	$kg.m^{-3}$
ρ_A	Masse volumique de l'aluminium	$kg.m^{-3}$
ρ_v	Masse volumique de verre	$kg.m^{-3}$
λ_v	Conductivité thermique de verre	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_p	Conductivité thermique du polystyrene	$W.m^{-2}.K^{-1}$
λ_A	Conductivité thermique de l'aluminium	$W.m^{-2}.K^{-1}$
C_v	Conductivité thermique de verre	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_p	Conductivité thermique du polystyrene	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_A	Conductivité thermique de l'aluminium	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
B	Coefficient d'expansion thermique	K^{-1}

Liste de Figure

Chapitre I : Généralité sur le séchage et les séchoirs solaires

Figure (I.1) Séchoir solaire indirect	pages 6
Figure (I.2) Les séchoirs mixtes solaires	8
Figure(I.3) Schéma descriptif du séchoir solaire direct	9
Figure (I.4) image de séchoir solaire direct (Laboratoire LENREZA UKM Ouargla)	9

Chapitre II : Généralité sur les matériaux à changement de phase

Figure (II.1) Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état	12
Figure (II.2) classification des PCM (Achat 1983)	15
Figure (II.3) Applications de MCP dans le stockage solaire	18
Fig. (II.4) MCP micro-encapsulés: (a) état liquide et état poudre(b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules	19
Fig. (II.5) MCP macro-encapsulés - conditionnement en (a) balle inoxydable En (b) sac plastique et en (c) briquettes plastiques	20

Chapitre III : Présentation du problème physique

Figure (III.1) séchoir solaire direct avec MCP	21
Figure (III.2) séchoir solaire direct avec MCP	22
Figure (III.8) Schéma du maillage du modèle physique adopté	28

Chapitre VI : Résultats et discussion

Figure (IV.1) Evolution de la température de l'air au milieu de séchoir solaire pour différentes maillages	31
Figure (IV.2) Comparaison entre la température de l'air au milieu du séchoir solaire direct simulé et réel	32

Figure (IV.3) Distribution de température dans le séchoir solaire directe sans MCP	32
Figure (IV.4) La variation de l'intensité solaire en fonction du temps	34
Figure (IV.5) La variation de la température ambiante en fonction du temps	35
Figure (IV.6) Variation de la température moyenne de l'absorbeur en fonction du temps pour différentes épaisseurs de MCP dans le séchoir solaire direct	36
Figure (IV.7) Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire direct avec différents épaisseurs de MCP	37
Figure (IV.8) Fraction de liquide du MCP en fonction de temps	38
Figure (IV. 9) Evolution de la température de l'absorbeur en fonction de temps pour différents types de MCP	39
Figure (IV.10) Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire en fonction de temps pour différents types de MCP	40
Figure (IV.11) Distribution de température dans le séchoir solaire directe avec MCP	41
Figure (IV.12) Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps	42
Figure (IV.13) Evolution de la température ambiante en fonction du temps	43
Figure (IV.14) Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire réel et simulé	44
Figure (IV.15) Fraction de liquide en fonction de temps pour différents MCP	43
Figure (IV.16) Evolution de la température de l'air au milieu de séchoir solaire avec intégration des différents types de MCP	44

Liste de Tableau fouille

Tableau (III.1) Dimensions géométriques du séchoir solaire direct	22
Tableau (III.2) Propriétés thermo-physiques des différents composants du séchoir solaire direct	23
Tableau (III.3) Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations	23

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est l'élément principal des sociétés civilisées, un moyen dont tous les secteurs technologiques, industriels et sociaux ont besoin, car ils sont nombreux et variés, notamment l'énergie solaire, l'énergie thermique et l'électricité.

L'énergie qui nous vient du soleil est l'une des énergies les plus importantes sur laquelle l'homme dépend de sa vie quotidienne pour l'exploiter comme source. C'est une énergie permanente et ne produit pas de gaz nocifs pour l'environnement par rapport aux autres énergies.

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire, le séchage solaire et la distillation solaire ; ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire. Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons. A l'aide des progrès technologiques, les techniques de captation directe d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables [1].

Ces dernières années, il y a eu recours à des façons multiples et diversifiées pour stocker l'énergie dans divers domaines. L'énergie peut alors être stockée en chaleur et en électricité. Le stockage d'énergie sous forme de chaleur peut se faire par l'une des techniques utilisant le principe de chaleur sensible, de chaleur latente ou par voie thermo-chimique où l'enthalpie de réaction est exploitée.

Dans ce mémoire, notre travail présente une étude numérique dans le but d'évaluer les performances thermiques d'un séchoir solaire direct, sans et avec intégration des matériaux à changement de phase. Les calculs de simulation ont été conduits moyennant la méthode 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 pour stocker l'énergie solaire afin de l'utiliser dans les heures peu ou non ensoleillées.

La rédaction du présent mémoire a été structurée en une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à présenter une étude bibliographique sur le procédé de séchoir solaire ainsi que les différents types des séchoirs solaires.

Le deuxième chapitre étudie le stockage de l'énergie thermique sous différentes formes basant sur le stockage par la chaleur latente (matériaux à changement de phase) ainsi que la classification des MCP et leurs différentes formes disponibles.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté la géométrie du problème et les différentes équations mathématiques qui modélisent le comportement thermique du séchoir solaire objet de l'étude.

Dans le quatrième chapitre, les résultats de simulation numérique obtenus seront présentés et discutés dans l'ordre de montrer l'effet de l'utilisation des différentes épaisseurs ainsi que différentes natures de MCP sur la ou les performances thermiques du séchoir solaire.

En fin, une conclusion générale fait état des principaux résultats obtenus confrontés à la problématique définie au départ pour cette étude.

Chapitre I :
Généralité sur le
séchage et les séchoirs
solaires

Introduction

Le séchage est défini comme étant le processus qui consiste à éliminer totalement, ou partiellement le solvant (très souvent l'eau) contenu à l'intérieur d'un matériau poreux. Dans ce chapitre nous parlerons sur le séchage solaire ainsi que les différents types des séchoirs solaires, les plus importants et les plus utilisés dans l'opération de séchage.

I.1. Définition

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide [1].

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année)[2]. L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique [3].

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau, on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures, bactéries) responsables du pourrissement. C'est aussi une étape nécessaire dans la certains produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet d'améliorer la conservation des produits, de faciliter leur transport, de réduire les risques de pertes de produits après récolte et surtout d'élargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année [4].

I.2 Historique

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation de produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figue, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (brique de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.)[5].

I.3 Modes de séchage

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit ; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement. Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, il existe dans la pratique 6 types de séchage [6].

I.3.1 Séchage par conduction :

Dans ces procédé l'échange thermique est obtenu par contact entre le solide humide et une paroi métallique chauffé par un fluide caloporteur, à cause du bon transfert de chaleur dans ces procédé. Cette technique est utilisée pour le produit liquide tel que le solide pâteux et le solide en suspension (mélange liquide-solide) [7].

I.3.2 Séchage par rayonnement :

On peut aussi réaliser des séchages ou la transmission de chaleur se fait par rayonnement. Une surface portée à une température suffisamment élevée émet un Rayonnement infrarouge qui sera absorbé d'une façon plus moins complète par le produit à sécher [8].

I.3.3 Séchage par convection :

En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou plaques [5].

I.4 Les avantages et les inconvénients du séchage solaire

Pour le séchage solaire plusieurs avantages et inconvénients sont parmi eux comme suit [9].

I.4.1 Avantages

- ❖ Economies d'énergie
- ❖ Bonnes conditions de séchage
- ❖ Technique permettant de réduire et maîtriser son impact sur l'environnement

I.4.2 Inconvénients :

- ❖ Chargement

- ❖ Mal adapté aux grosses structures

I.5 Les séchoirs solaires

Il existe une grande variété de séchoirs et selon le point de vue adopté, différentes façons de les classer. On peut, par exemple, retenir comme critère la texture du produit qui détermine son mode de manutention et la manière dont on assure son contact avec l'air asséchant sur la surface chauffante. On peut aussi considérer le principe sur laquelle repose le séchage. Ainsi, dans les séchoirs à ébullition, on élève suffisamment la température du produit pour que la pression de vapeur de son eau devienne égale à la pression totale ambiante et dans les séchoirs à entraînement, on le place dans un courant d'air, dont la pression de vapeur est inférieure à celle régnant juste à son niveau.

Les séchoirs solaires se divisent en trois catégories: les séchoirs directs où les produits sont exposés directement au soleil, les séchoirs indirects où le produit n'est pas exposé directement au soleil et les séchoirs solaires mixtes.

La vitesse de séchage est importante pour choisir le type de séchage à effectuer. L'humidité relative est un facteur affectant le séchage solaire des produits, l'absorbeur, la matière de construction, les inclinaisons et la couverture transparente orientée vers le soleil sont des décisions importantes de conception.

I.6 Les type des séchoirs solaires

I.6.1 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, sa valeur nutritive [10]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

Le séchoir solaire indirect se compose de deux parties : un collecteur qui convertit le Rayonnement solaire en chaleur et une chambre de séchage qui contient le produit.

L'air chauffé dans le collecteur (capteur plan) est soufflé à travers des claies contenant des produits) légumes, fruits, poissons...) disposés en couche mince. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques et la ventilation du séchoir (figure I.1) [11].

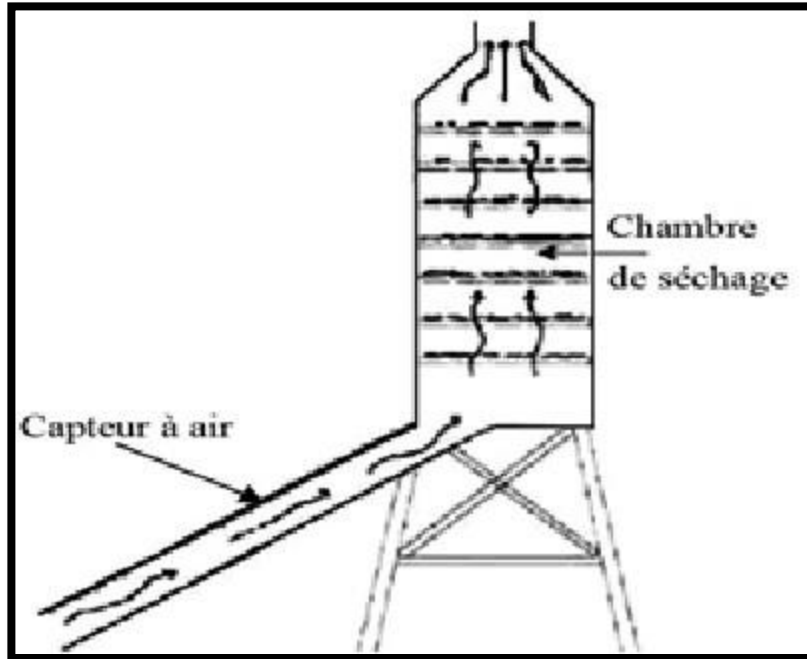


Figure (I.1) Séchoir solaire indirect [12].

I.6.1.1 Les avantages et les inconvénients du séchoir indirect

➤ Avantages du séchoir indirect

Le séchoir solaire indirect présente les avantages suivants [12].

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment la vitamine A et C).
- Possibilité de construire ce type de séchoirs localement, avec un coût réduit.
- Son fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

➤ Inconvénients du séchoir indirect

Le séchage solaire indirect tout au long de la journée est un processus de séchage, mais nous avons constaté qu'il y a de nombreux avantages et inconvénients de ceux-ci comme suit [7].

1-Coût important.

2-Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir

I.6.2 Les séchoirs solaires mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type des séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure I.2A) aurait les mêmes dispositifs Structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage et cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empète directement sur le produit comme le séchoir intégral [14].

Une autre conception (figure I.2B) se compose d'un capteur à air recouvert d'une plaque de verre. La chambre de séchage contenant des claies superposées, les parois sont des contreplaqués, la surface supérieure recouverte de verre. La cheminée solaire prend une forme cylindrique, fabriquée avec des feuilles galvanisées équipées d'un chapeau en métal pour conserver hors de la pluie [15].

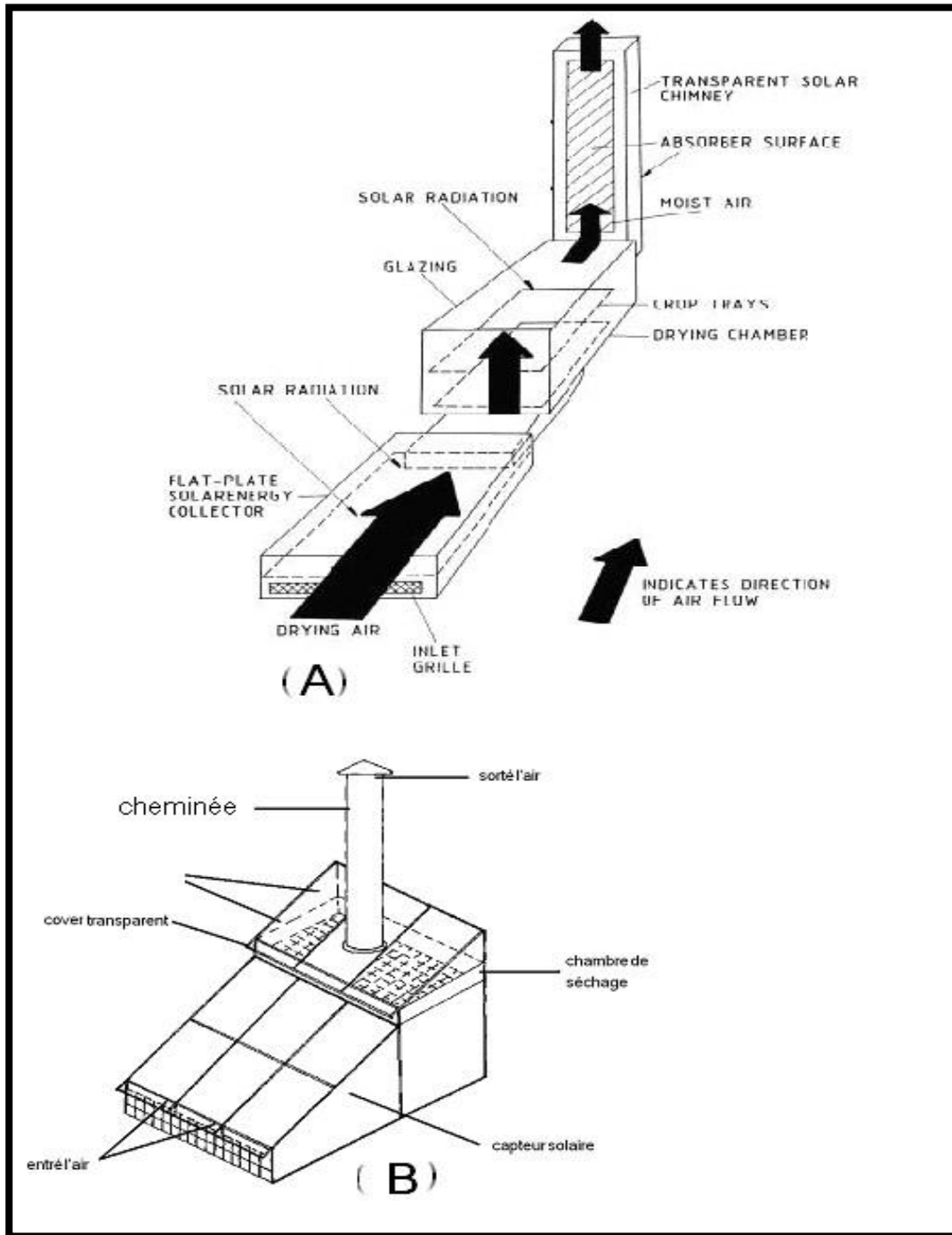


Figure (I.2) Les séchoirs mixtes solaires [11].

I.6.3 Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté au petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités [16].

I.6.3.1 Principe de fonctionnement

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles [1]).

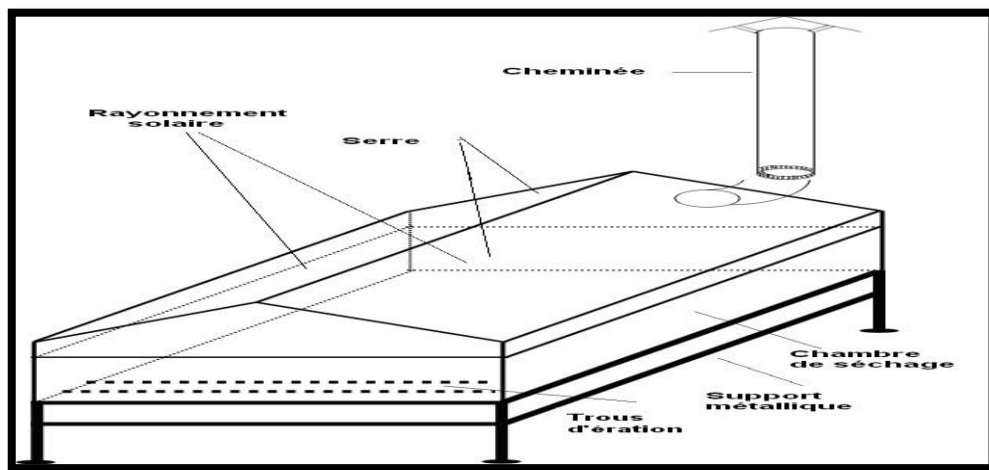


Figure (I.3) Schéma descriptif du séchoir solaire direct [1]



Figure (I.4) image de séchoir solaire direct (Laboratoire LENREZA UKM Ouargla)

I.6.3.2 Les avantages et les inconvénients du séchoir direct

Avantages

- ❖ Meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- ❖ Pas besoin de main-d'œuvre qualifiée.
- ❖ Grandes possibilités de conception : séchoir coffre, tente, cabane, coquillage.
- ❖ Coût faible à moyen.

Inconvénients

- ❖ Faible productivité : 5 à 10 kg de produits frais/m²
- ❖ Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil : destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration [19].
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- ❖ Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments [20].
- ❖ Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissures

Conclusion

Les performances thermiques du séchoir solaire direct dépendent directement des conditions climatiques de la journée. De cet effet il est nécessaire de penser à une solution qui permet de stocker l'énergie solaire fournie pendant la journée et de l'utiliser après le coucher de soleil. Dans le chapitre suivant, on va présenter des généralités sur les matériaux à changement de phase que nous avons utilisés dans notre travail.

Chapitre II:
Généralité sur les
matériaux à
changement de phase

Introduction

Des études fondamentales sur les méthodes efficaces de stockage de l'énergie thermique ont été intensifiées depuis la crise énergétique de 1973-1974, avec de nombreux pays début des programmes de développement de systèmes d'alimentation utilisant l'énergie non conventionnelle sources au niveau national et international[21]. Un système de stockage d'énergie par changement de phase est composé d'un échangeur de chaleur et d'un matériau à changement de phase (MCP) [22].

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont une application particulière des systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) en raison de la fourniture de solutions pour différents systèmes d'ingénierie tels que les applications de construction, les serres, l'énergie solaire et la cogénération [23].

II.1 Définition du matériau à changement de phase

On appelle matériau à changement de phase, ou MCP, tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 °C et 80 °C. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans la vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire, etc.)[24]

II.2 Principe du changement de phase

Tout matériau, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou céder de l'énergie sous forme de chaleur. On distingue deux types de transfert de chaleur (ou transfert thermique) [24].

II.2.1 Le transfert thermique par chaleur sensible

Dans ce cas, le matériau en question peut céder ou stocker de l'énergie en voyant varier sa propre température, sans pour autant changer d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CS échangée par un matériau est la chaleur massique, notée C_p et Exprimée en $J / (kg K)$ [24].

II.2.2 Le transfert thermique par chaleur latente

Dans ce cas, le matériau peut stocker ou céder de l'énergie par simple changement d'état, tout en conservant une température constante, celle du changement d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CL échangée par un matériau est la chaleur latente de changement de phase notée L_f (f pour fusion) pour un changement de phase liquide/solide, et L_v (v pour vaporisation) pour un changement de phase liquide/vapeur. Celle-ci est exprimée en J/kg [24].

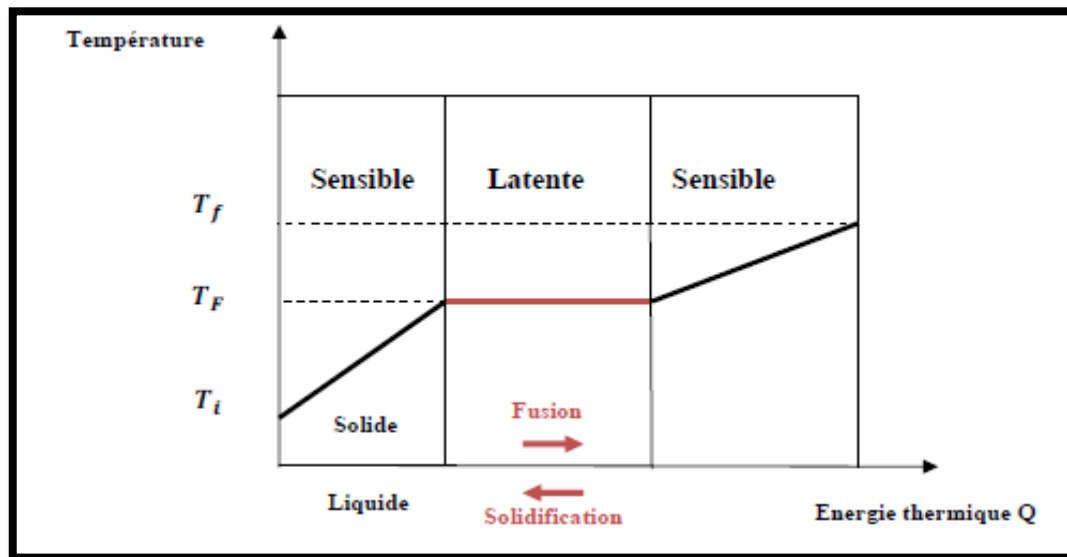


Figure (II.1): Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [25].

II.3 Propriétés des matériaux à changement de phase :

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux de stockage de chaleur «latente». Le transfert d'énergie thermique se produit quand le matériau change son état physique de l'état solide à l'état liquide, ou liquide à solide. On appelle cela un changement d'état, ou "Phase". Les MCP absorbent et libèrent de la chaleur à une température presque constante. Ils stockent 5-14 fois plus de chaleur par unité de volume que les matériaux de stockage sensibles tels que l'eau [26].

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés

comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères.

II.3.1 Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- ❖ Température de fusion dans la gamme de température souhaitée.
- ❖ Une chaleur latente élevée
- ❖ Une chaleur spécifique élevée
- ❖ Une conductivité thermique élevée pour faciliterait la charge et la décharge de l'énergie thermique.

II.3.2 Critères cinétiques

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.

II.3.3 Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- ❖ Une stabilité chimique ;
- ❖ Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable ;
- ❖ Aucune action corrosive sur les matériaux de constructions ou sur leur contenant;

Aussi le matériau ne doit pas être nocif, il doit être non inflammable et non explosif.

II.3.4 Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être :

- ❖ Disponible en grande quantité
- ❖ A bon marché

II.4 La classification des MCP

Il y a un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiés comme PCM du point de vue de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion. Cependant, excepté le point de fusion se situant dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres

critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur. En effet, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermique idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriées adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des MCP, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le MCP un agent épaississant ou un gélifiant approprié.

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories :

- ✓ Les composés organiques : paraffines, corps non-paraffine que, polyalcools.
- ✓ Les composés inorganiques : hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- ✓ Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

Les composés organiques et les composés inorganiques présentant des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée sont détaillés dans ce qui suit :

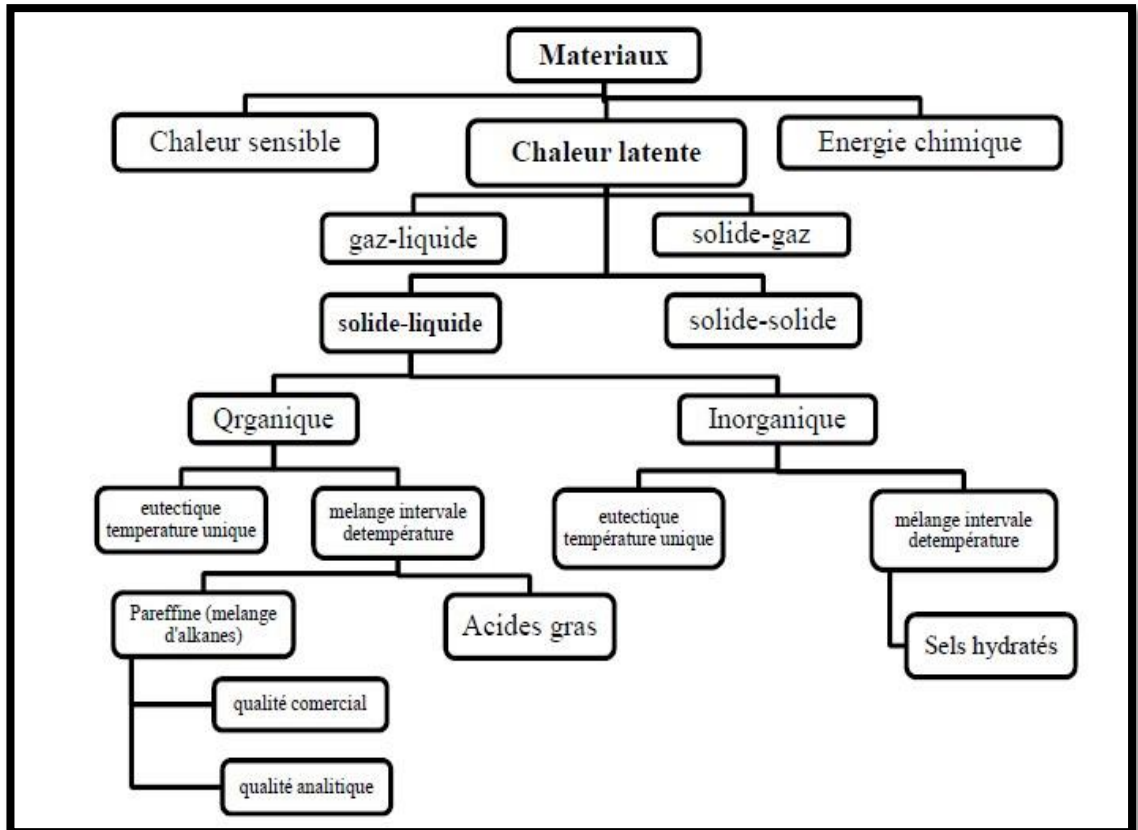


Figure (II.2) classification des MCP (Achat 1983) [27].

II.4.1 Les matériaux à changement d'état solide/liquide

- **Les organiques**

Ce type de MCP est en outre décrit comme paraffinée et non paraffinée. Les principaux avantages sont leur stabilité chimique et thermique, ils sont non-corrosif, recyclable et ils n'ont pas de sous-refroidissement. D'autre part, les inconvénients de L'utilisation MCP organique sont leur inflammabilité, leur faible conductivité thermique et un changement de phase enthalpie inférieure à un autre type de MCP [28].

- **Paraffine**

Les paraffines ont été largement utilisées pour le stockage de l'énergie thermique en raison de leur forte chaleur de fusion, la température de changement de phase variés, super refroidissement négligeable, la pression de vapeur inférieure à l'état fondu et le comportement chimiquement inerte et stable. Ils sont également disponibles dans le

Commerce à un coût raisonnable. Ces MCP sont écologiquement inoffensive et non toxique [29].

➤ **Conditionnement des paraffines :**

Bien que les paraffines aient les propriétés requises d'un MCP leur faible conductivité pénalise la cinétique de charge/ décharge de l'énergie thermique. Pour résoudre ce problème plusieurs types de conditionnement ont été proposés :

- ❖ Les nodules,
- ❖ Les cylindres avec ailettes ou non
- ❖ La micro-encapsulation.

Une autre méthode consiste à augmenter la conductivité apparente en incorporant une matrice métallique ou des fibres de carbone (X. Py, R. Olives, S. Maurin ,2001) [30],

➤ **Non paraffine**

Les non-paraffines sont les plus abondants matériaux de changement de phase ayant des propriétés très différentes. Ces matières organiques ont d'autres sous-groupes D'acides gras et autres composés organiques non paraffinées tels que les esters, alcools, glycols, etc. [29].

➤ **Les inorganiques**

Dans cette famille sont distingués les sels, les sels hydratés et les métaux. Les Composés inorganiques ont généralement une enthalpie de changement de phase Volumique et une conductivité thermique supérieures à leurs homologues Organiques. Ils peuvent toutefois présenter de sérieux problèmes de surfusion, de Toxicité, de corrosion et de fusion non-congruente. Ils sont aussi plus chers.

Une présentation détaillée des sels et des alliages métalliques ayant une température de Fusion supérieure à 120°C est proposée par Ken sarin [31].

➤ **Les eutectiques**

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui, par définition, ont des températures de fusion précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins à fusion congruente.

Les eutectiques ont un potentiel important pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire.

Les eutectiques sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et eutectiques organiques -inorganiques.

II.5 Applications des matériaux à changement de phase

II.5.1 Applications dans l'industrie;

1. Climatisation : Utilisé dans les hôpitaux, les hôpitaux et les bureaux.
2. Usines de lait et de fromage.
3. Protection : Salles de contrôle et drapeaux automatiques [32].

II.5.2 Dans les moteurs à combustion interne:

Utilisation de l'énergie potentielle pour chauffer les moteurs à combustion interne tels que les moteurs diesel, Le système expulse la chaleur lorsque le matériau change Du liquide à l'acier, ce qui permet d'éviter bon nombre des négatifs causés par le fonctionnement des moteurs sont froids. Tels que la consommation de carburant accrue et la concentration accrue de gaz émisCO₂.

II.5.3 Applications de MCP dans les bâtiments:

Le confort thermique est l'un des besoins évidents de toutes les installations encastrées où elles doivent être équipées de systèmes permettant le chauffage Ou refroidissement de l'atmosphère interne Parmi les matériaux utilisés, citons MCP lorsque la température extérieure augmente ou que l'activité de la population augmente Le MCP intervient pour modifier son état afin de maintenir le confort et l'équilibre thermique car il présente quatre moyens économiques de s'adapter le MCP dans les bâtiments ont :

- Incorporation directe de MCP dans un mélange humide de matériaux de construction.
- Incorporation directe par absorption de MCP fondu ou fondu dans les matériaux de construction.

Intégration directe de MCP par couplage MCP est incorporée dans les matériaux d'emballage ou de revêtement et est le plus couramment utilisé parce que la zone d'échange est grande [32,33].

II.5 4 Applications des MCP dans le stockage de l'énergie solaire

Le principal problème lié à l'utilisation de l'énergie solaire est lié au stockage : la production d'eau chaude par transfert d'eau par panneaux solaires est directement liée à la présence du soleil, cette énergie pouvant être obtenue même si elle n'est pas nécessaire [34].

La quantité d'énergie stockée dans un ballon de la même taille est plus grande en utilisant MCP que l'utilisation de l'eau seulement. A titre d'exemple, nous trouvons l'application de Sokolov et Kizman (1991) Pour MCP de chauffer l'eau. Le système contient un tube solaire composé de deux tubes concentriques avec la distance entre eux Rempli de MCP (Fig.2.3) Le rayonnement solaire est absorbé directement sur la surface extérieure puis transféré vers. Le MCP est stocké sous forme de chaleur sensible et latente. La construction est simple [34].

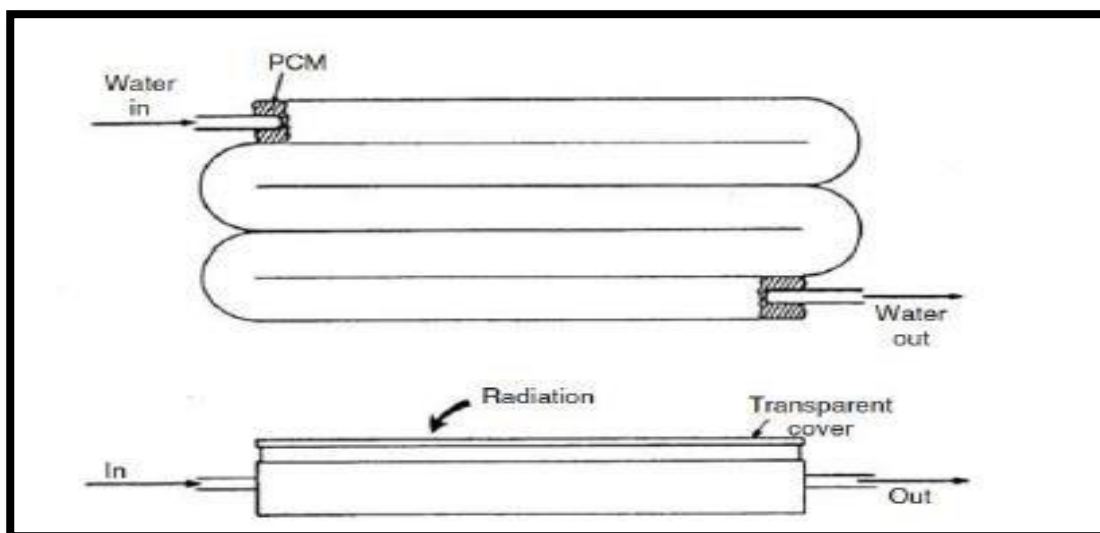


Figure (II.3) Applications de MCP dans le stockage solaire

II.6 Conditionnement des MCP

Les MCP peuvent être conditionnées dans des billes microscopiques en plastique mélangées au plâtre ou au béton ou incorporés dans les pores d'un matériau porteur par imprégnation (figure II.4). La micro encapsulation est une méthode dans laquelle le MCP est confiné dans petites sphères dont le diamètre est de l'ordre du micromètre, sous forme sphérique ou de petits cylindres longitudinaux. Ce matériau de stockage est alors appelé

coulis. La macro encapsulation est une méthode dans laquelle le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions variant du décimètre au mètre (figureII.5).

L'avantage de l'encapsulation du MCP permet de fournir une importante zone de Transfert thermique. Lanai [35, 36] a répertorié plus de 200 matériaux utilisés pour le stockage thermique avec un changement de phase dans une plage de température variant de 10 à 90 °C. Il a évalué la faisabilité technique et économique d'utilisation des MCP encapsulés pour des applications de chauffage solaire résidentiel et a développé des moyens d'encapsulation de certains matériaux dans des conteneurs métallique et en plastique. L'intégration des MCP sous forme de capsules dans les sacs peut améliorer le stockage énergétique dans l'enveloppe du bâtiment [37].

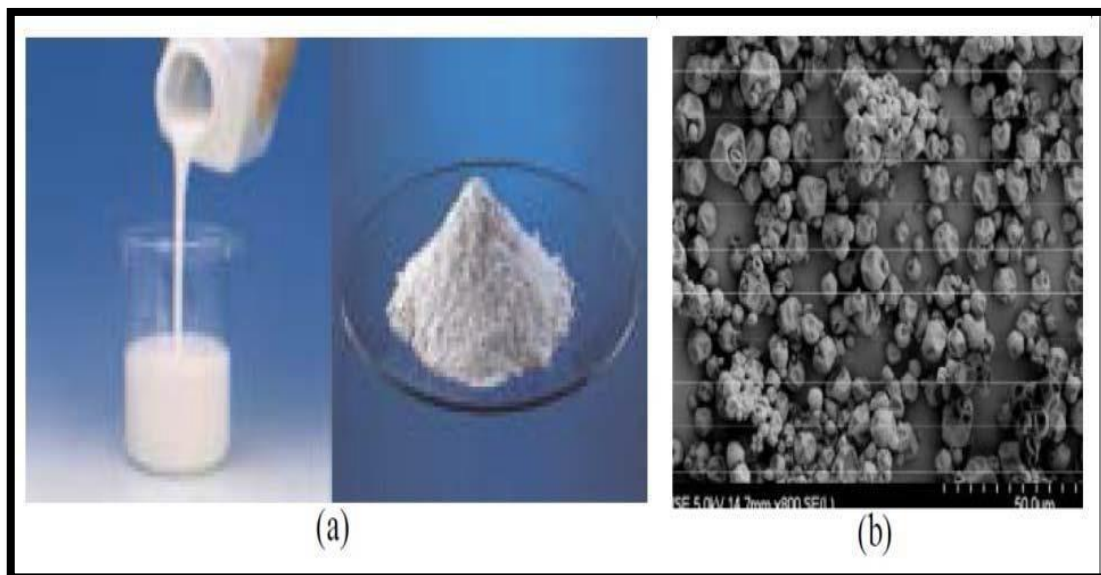


Fig.(II.4): MCP micro-encapsulés: (a) état liquide et état poudre(b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules [38].

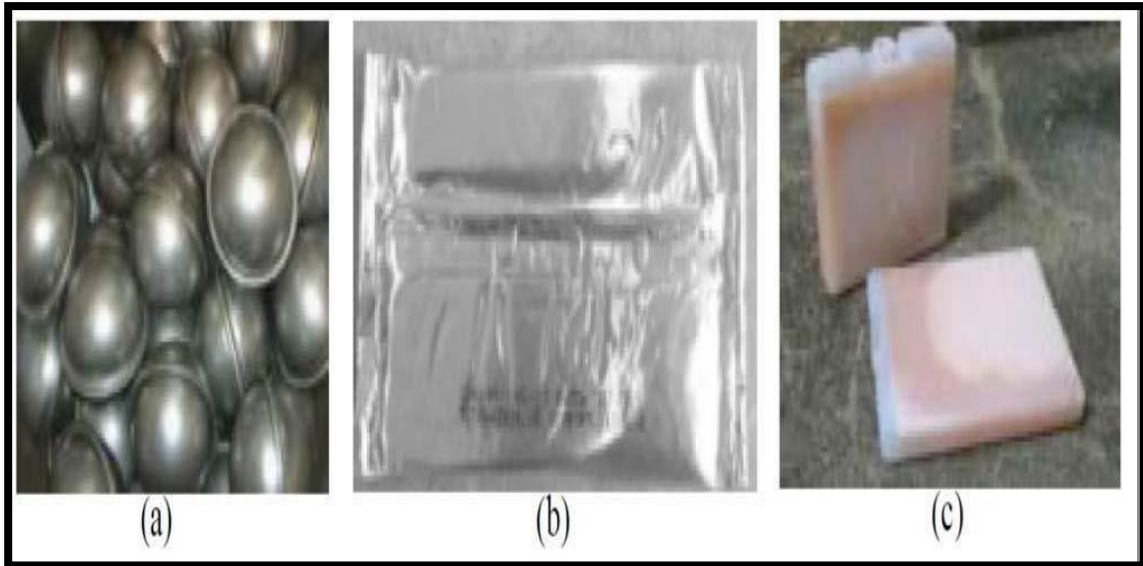


Fig.(II.5): MCP macro-encapsulés - conditionnement en (a) balle inoxydable En(b) sac plastique et en (c) briquettes plastiques [39, 40].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une généralité sur les matériaux à changement de phase concernant leur classification, application et la méthode d'utilisation. La géométrie du problème étudié sera présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre III:

Présentation du

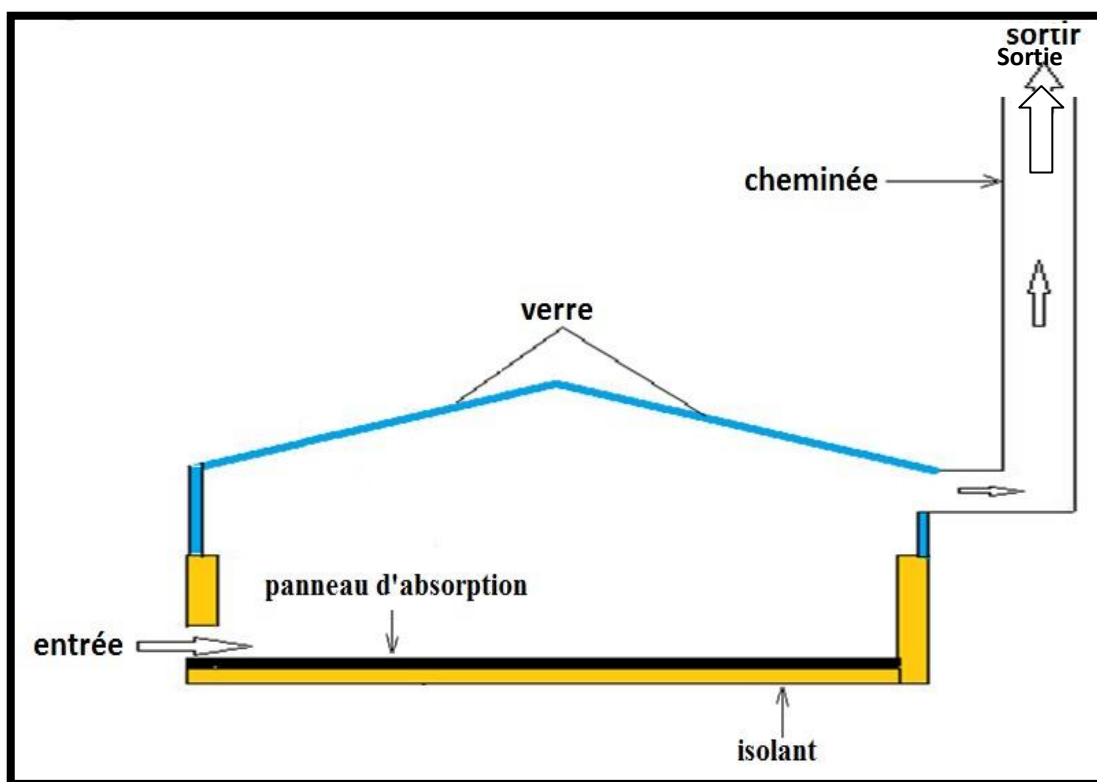
problème physique

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le modèle physique adopté pour les différentes simulations qui seront détaillées dans le chapitre résultat et discussion. La configuration géométrique du séchoir solaire direct et les propriétés physiques de ses composants seront expliquées avant et après l'ajout du MCP. Ce chapitre sera complété par une brève présentation des différentes étapes de la mise en œuvre du problème sur le logiciel Fluent utilisé pour faire la simulation numérique.

III. 1 Géométrie du problème:

Nous donnons un aperçu de la forme géométrique du séchage solaire direct en connaissant ses composants et ses dimensions comme indiqué en Figure(III.1) et Figure(III.2) et Tableau(III.1).



FigureIII.1: Séchoir solaire direct sans MCP.

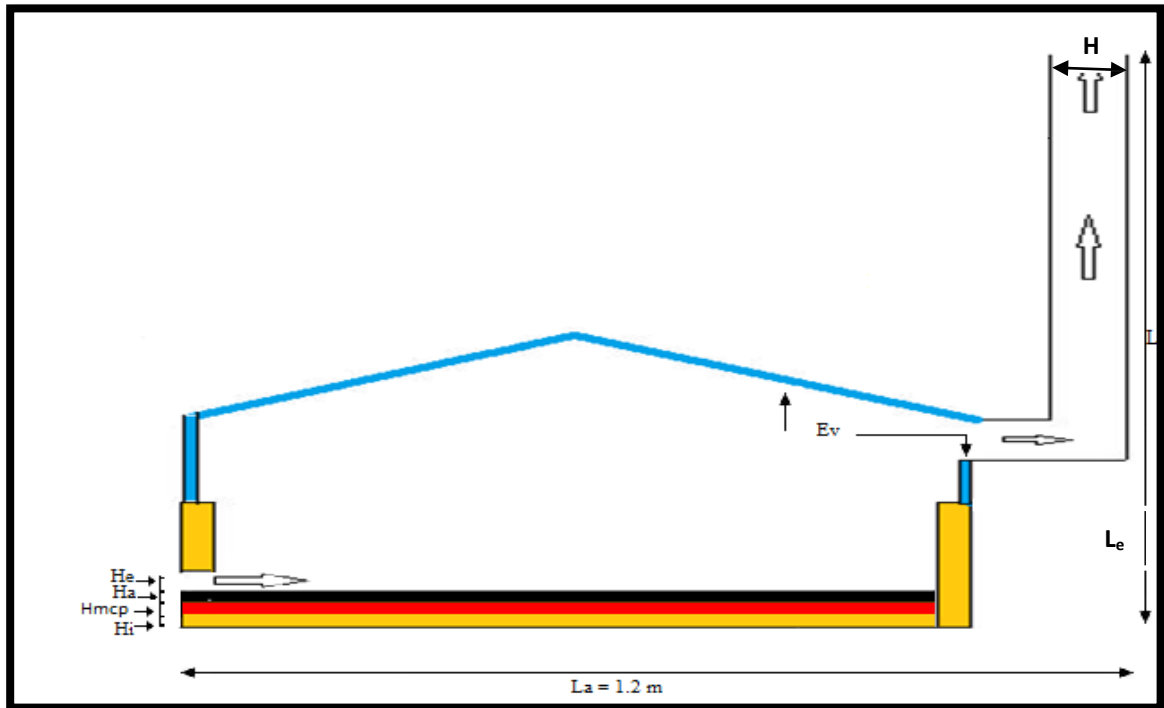


Figure (III.2): séchoir solaire direct avec MCP.

Tableau III.1: Dimensions géométriques du séchoir solaire direct

Dimension	Symboles	Valeurs(m)
Largeur du séchoir solaire direct	La	1.2
Langueur du séchoir solaire direct	Le	1.54
Epaisseur de l'isolation	Hi	0.04
Epaisseur du vitrage	Ve	0.004
Epaisseur de l'absorbeur	Ha	0.003
Entrée	He	0.02
sortie	H	0.1

III.2 Propriétés thermo-physiques

Les propriétés thermo-physiques des éléments constituant le séchoir solaire direct ainsi que les propriétés des MCP à envisager dans cette étude sont exposées dans les tableaux III.2 et III.3 ci-dessous.

Tableau (III.2) : Propriétés thermo-physiques des différents composants du séchoir solaire direct [33-34]:

Matériaux	Propriétés physiques		
	Masse volumique (ρ)	conductivité thermique(λ)	chaleur spécifique (C)
Verre	2500	0.81	840
Polystyrène	700	0.32	2310
Aluminium	2719	202.4	871

Tableau (III.3) : Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations [35-36] :

MCP	Propriétés Thermo-physiques				
	Température de fusion [K]	Chaleur Latente [kJ/Kg]	La masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]
Paraffine	309.7	247	778	0.15	2210
Paraffine	301	244	774	0.15	2160
Paraffine wax	326,5	266	780	0.21	2500
Paraffine	307	150	1850	0.47	2350

III.3 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 [37].

- Ecoulement bidimensionnel et incompressible.
- L'écoulement instationnaire en régime laminaire.
- Fluide visqueux newtonien.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide (C_{pf} , λ_f , μ_f) et du solide (C_{ps} , λ_s , μ_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.

$$\rho = \rho_0 (1 - (T - T_0)) \quad (\text{III.1})$$

III.4 Equations dimensionnelles gouvernantes

→ Equation de continuité:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.2})$$

→ Equations de quantité de mouvement:

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_C) \cos\theta \quad (\text{III.3})$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_C) \sin\theta \quad (\text{III.4})$$

→ Equation de l'énergie :

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

III.5 Conditions initiales et aux limites

- Conditions initiales

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

$$A \ t=0 ; T=Ta$$

La température du ciel est donnée par la formule de Swinbank [38] :

$$Ts=0,0552.Ta^{1.5} \quad \text{(III.7).}$$

Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation suivante [39] :

$$ha=5,7+3,8Vvent \quad \text{(III.8)}$$

III.6 Equation de la variation de l'intensité solaire en fonction de temps [48] :

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

$$G_{sun}(\tau) = \hat{G}_{un} \sin\left(\frac{\tau-a}{b-a}\pi\right), \quad a < \tau < b \quad \text{.....(III.9)}$$

\hat{G}_{un} : L'irradiation solaire maximal

τ : Le temps en heure

a : Heure de lever de soleil

b :Heure de coucher de soleil

III.7 L'équation de la variation de température ambiante en fonction du temps [48]

La figureIV.3 présente la variation de la température ambiante en fonction du temps.

Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante :

$$T_{ao}(\tau) = \bar{T}_o + T_{ar} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 14)\right) \quad \text{(III.10)}$$

\bar{T}_o : température ambiante moyenne

T_{ar} : amplitude de température

III.8. Présentation brève des outils Gambit et Fluent:[40]

GAMBIT: est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous Fluent.

- **Utilisation de Gambit :**

Ce logiciel est utilisé pour définir et créer le modèle d'étude (surface ou volume).

- **Fluent :** est un code CFD (computation al fluide Dynamics) commercial très utilisé Sand industrie'l

III.9 Principales étapes pour définir un problème de CFD

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

1. Lancer gambit
2. Définition du modèle (la géométrie)
- 3• Charger son fichier du maillage
- 4• Vérifier son maillage
- 5• Choix des conditions aux limites
- 6• Exporter le fichier au FLUENT (.Mesh)
7. Lancer FLUENT
8. Choix du modèle physique
9. Contrôle de la convergence
10. Afficher les résultats

III.10 Résolution du problème avec le code Fluent

Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme suit [37]:

A. Choix du type de solveur :

- ❖ Space 2D
- ❖ Time Unsteady, 1st-Order Implicit
- ❖ Viscous Laminar1
- ❖ Heat Transfer Enabled2
- ❖ Solidification and Melting Enabled (juste dans le cas de MCP)
- ❖ Radiation Discrète Transfer Mode

B. choix de matériau:

Le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes, sinon

Il faut les introduire selon nos besoins.

C. Solver Controls :

- Equations :
- Mouvement
- Energie
- Paramètres de calcul instationnaire :

1. Pas de temps : 600

2. Max. Itérations par pas de temps : 10

D- Facteurs de sous-relaxation

- Pression 0.3
- Densité 0.9
- Forces 0.9
- Mouvement 0.6
- Update de Fraction Liquide 0.2
- Energie 1

E- Couplage pression-vitesse

- SIMPLE

F- Schéma de discrétisation

- Pression PRESTO!
- Mouvement première Ordre Up Wind
- Energie première Ordre Up Wind

III.11 Schéma du maillage du modèle physique adopté

Pour les différentes simulations appliquées dans notre étude nous avons choisi de travailler avec le maillage montré par la figure (3.3) ci-dessous

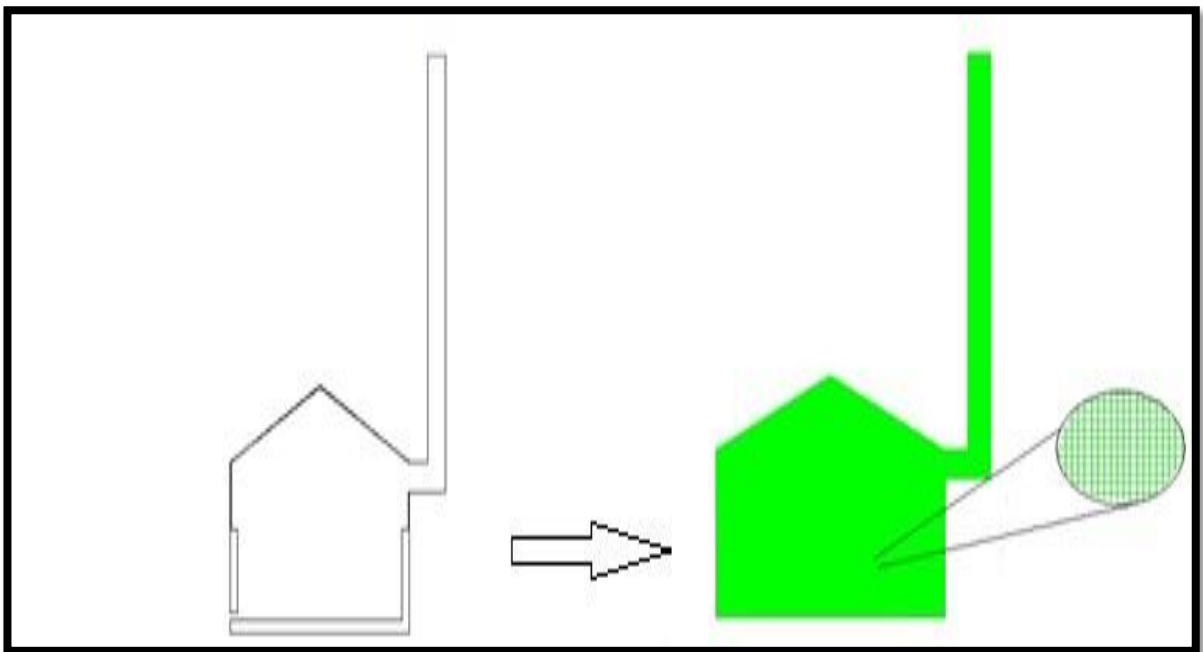


Figure (III.3) : Schéma du maillage du modèle physique adopté

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la géométrie du problème ainsi que les propriétés physiques des différents composants du séchoir solaire. Ensuite, nous avons

spécifié les équations mathématiques gouvernantes qui régissent le phénomène d'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'un séchoir solaire et les étapes suivies pour la résolution utilisant le logiciel CFD Fluent. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes étapes de simulation sur Fluent avec des illustrations afin de mieux expliquer la méthode.

Chapitre IV:

Résultats et

discussion

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats des simulations numériques obtenues à travers notre étude. La procédure de résolution et la présentation des résultats et basées sur les trois volets suivants :

- a- Essais de validation du modèle numérique adopté, faisant recours à des résultats expérimentaux relevés sur un séchoir solaire direct, conçu et réalisé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones aride (LENREZA, Université de Ouargla, Algérie), et ce dans le cadre de travaux antérieurs de master (2014/2015) et de les comparer avec les résultats expérimentaux obtenues par Kanoune Ibrahim et Abdeslam Tritiba (mémoire de master, université de Ouargla, 2017).
- b- Simulation numérique de séchoir solaire sans intégration de matériaux à changement de phase pour évaluer son performance thermique sans utilisation d'une autre source d'appoint de chaleur.
- c- Simulation numérique de séchoir solaire avec intégration de matériaux à changement de phase au-dessous de la plaque absorbante. Cette partie d'étude a été réalisé pour montrer l'effet de l'utilisation des MCP comme une source additif d'appoint de chaleur sur la performance thermique du séchoir solaire. l'effet de la nature et de l'épaisseur de MCP utilisé sera aussi discuté.

IV.1 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 de données expérimentale relevée sur un séchoir solaire direct réel au laboratoire LENREZA dans le cadre d'un mémoire de master génie des procédés [6] (année 2016/2017). A cet effet nous avons proposé trois maillages convenables pour notre cas d'étude parmi lesquels nous avons choisi un cas optimal, se basant sur la comparaison des températures simulées au milieu du séchoir solaire à celles mesurées expérimentalement.

a- Choix du maillage optimal

La comparaison entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux des étudiants est présentée dans la figure (IV.1). La figure représente la variation de la température de l'air au milieu du séchoir solaire en fonction de temps pour différentes maillages.

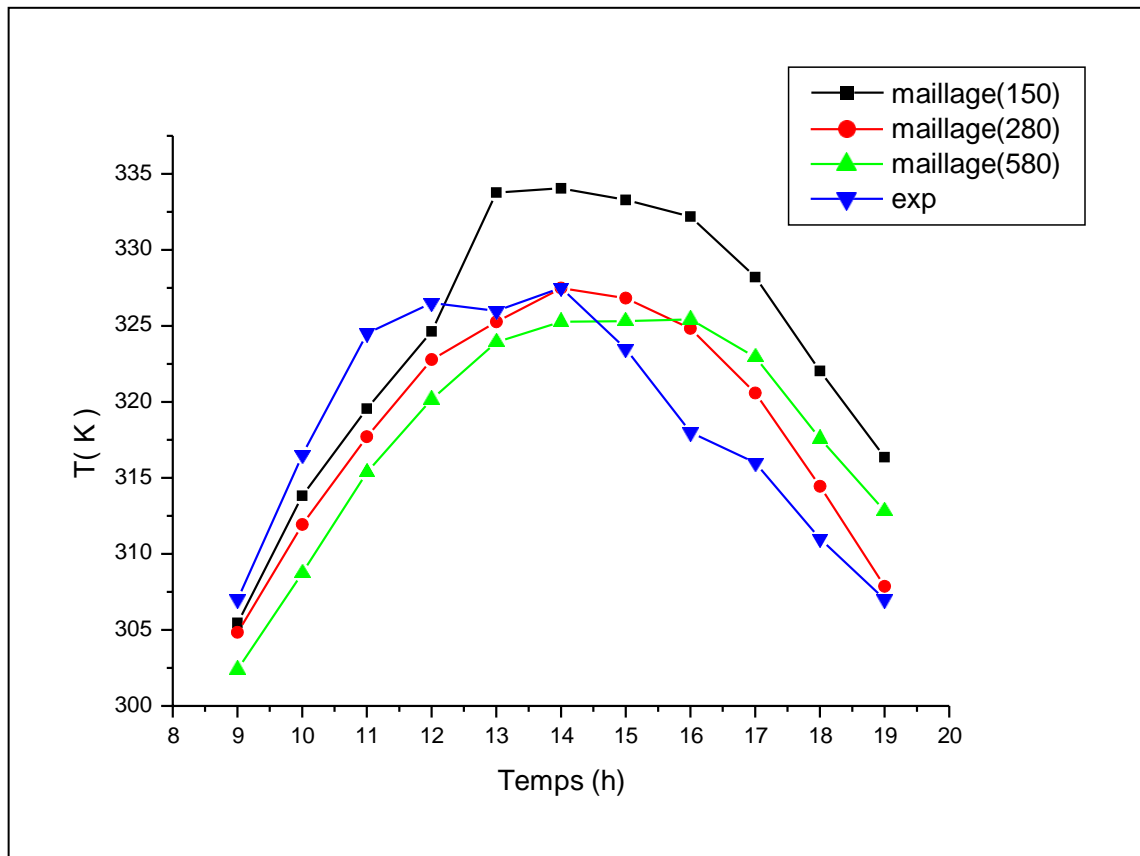


Figure (IV.1) : Evolution de la température de l'air au milieu de séchoir solaire pour différents maillages.

b- Validation

Afin de permettre une comparaison logique nous avons procédé à un essai de simulation permettant de relever à chaque fois la valeur ponctuelle de la température de l'air au milieu du séchoir solaire. Cette valeur pour des intervalles de temps réguliers a été comparée à la valeur mesurée expérimentalement pour les mêmes intervalles de temps. L'ensemble de ces valeurs simulées et calculées sont présentées sur la figure (IV.2). On peut remarquer, tenant compte du phénomène étudié, que les valeurs calculées et mesurées sont en bonne cohérence avec un écart maximal de presque 5°C. Cet écart observé peut être expliqué par la différence entre les conditions climatiques réelles (fluctuations du rayonnement solaire et de la vitesse du vent dans la journée) et celles utilisées par le logiciel de calcul, basées sur une évolution typique régulière.

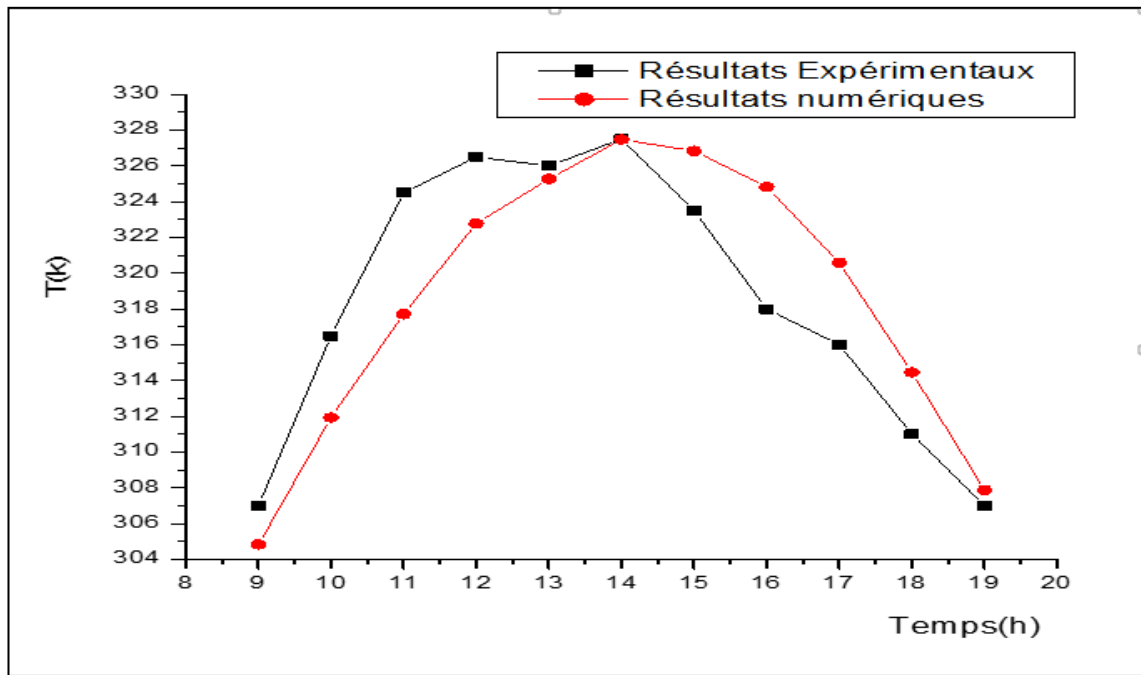


Figure (IV.2) Comparaison entre la température de l'air au milieu du séchoir solaire direct simulé et réel.

IV.2 Simulation numérique du séchoir solaire direct sans intégration des matériaux à changement de phase

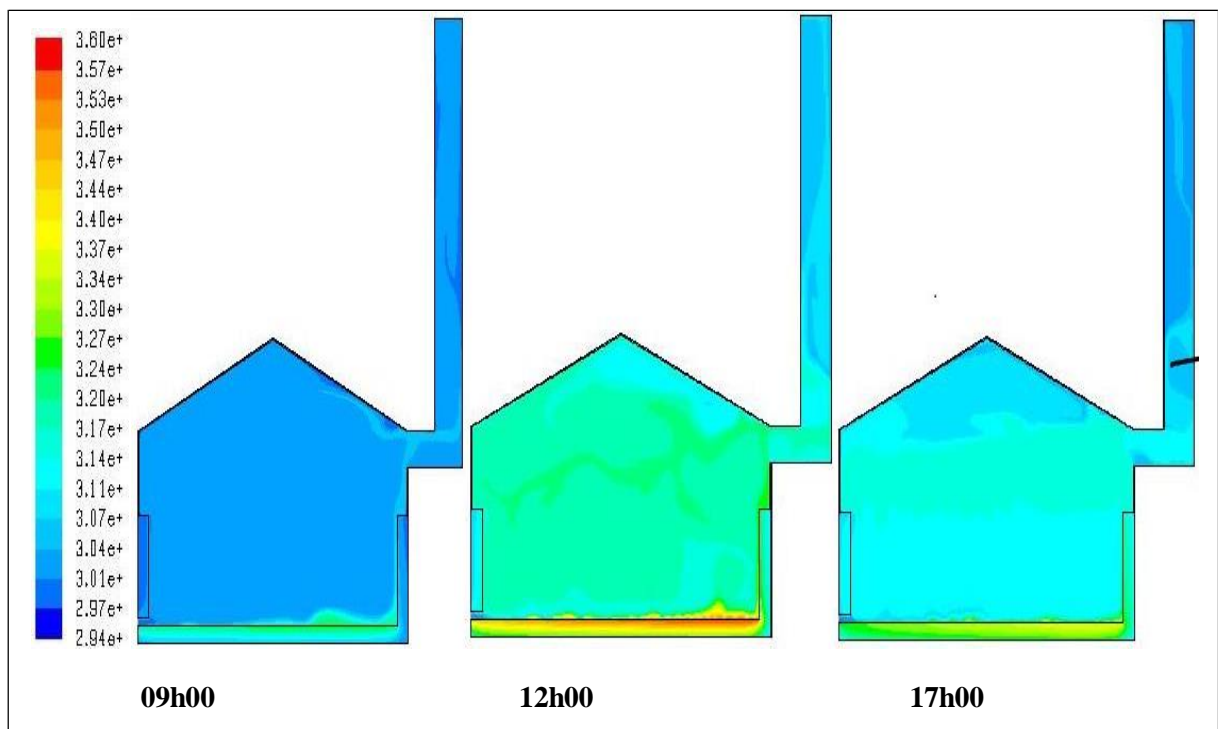


Figure (IV.3) Distribution de température dans le séchoir solaire directe sans MCP.

Figure IV.3 montre la distribution de la température dans le séchoir solaire direct sans intégration de MCP. Après le lever de soleil, à 09h00, le rayonnement solaire n'est pas encore plus élevé et l'absorbeur commence à échauffer l'air circulant à l'intérieur du séchoir solaire où on remarque que le composant le plus chaud c'est bien l'absorbeur grâce à son grand coefficient d'absorption. L'absence de l'homogénéité à l'intérieur du séchoir solaire est due au transfert thermique avec l'extérieur d'un côté, et d'un autre côté par ce que la température de l'absorbeur est encore très faible (325K) ce qui influe sur le bon échauffement de l'air circulant. La température au milieu de la chambre est logiquement faible dans l'ordre de 300K.

A 12h00, on remarque que la température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire est presque homogène surtout dans la chambre de séchage ce qui indique de bons résultats du point de vue comportement séchage. On remarque aussi que la température de l'air de séchage (au milieu de la chambre) atteint une valeur plus élevée et acceptable (324K) pour effectuer une opération de séchage.

A 17h00, on remarque que la température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire reste toujours homogène mais elle est un peu faible (315K) à cause de la diminution du rayonnement solaire. Le composant le plus chaud reste toujours l'absorbeur.

IV.3 Simulation du séchoir solaire direct avec intégration des matériaux à changement de phase (MCP) la journée 11/04/2017

Dans cette partie de notre étude, nous avons considéré l'ajout d'une couche plane rectangulaire d'un matériau MCP en dessous de la plaque absorbante. Les calculs de simulations ont en premier lieu porté sur l'effet d'épaisseurs du même MCP sur la performance thermique du séchoir solaire. En second lieu, plusieurs MCP de natures différentes ont été simulés et comparés pour la même épaisseur. Et afin de ressortir l'influence de la saison, nous avons dans ce dernier cas considéré les résultats de simulation relatifs à deux journées typiques représentant le printemps et l'automne.

IV.3.1 Evolution de l'intensité solaire en fonction du temps

La figure (IV.4) présente la variation de l'intensité solaire en fonction du temps pour une journée bien éclairée. Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante [48]:

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

\hat{G}_{sun} : L'irradiation solaire maximale = 995 w/m²

τ : Le temps en heure, $a < \tau < b$

a : Heure de lever de soleil : 06h20

b : Heure de coucher de soleil : 19h00

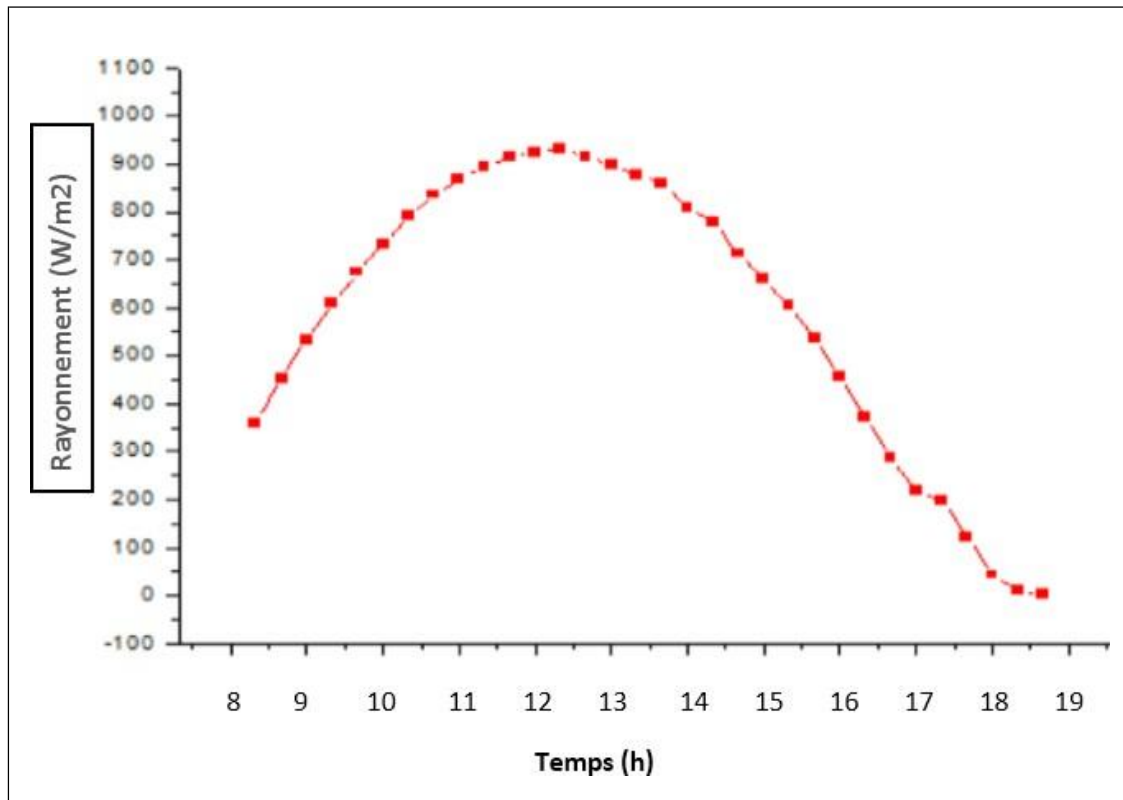


Figure (IV.4) : La variation de l'intensité solaire en fonction du temps.(11/04/2017)

Figure IV.4 montre que la variation du rayonnement solaire en fonction du temps prend une forme sinusoïdale, il se commence à zéro au lever de soleil puis il augmente avec le passage du temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale (995w/m²) à 12h00, après il commence à diminuer jusqu'à devenir nul après le coucher de soleil.

IV.3.2 Evolution de la température ambiante en fonction du temps

La figure (IV.5) 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 [48] :

$$T_{\text{ao}}(\tau) = \bar{T}_a + \bar{T}_c \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 13)\right)$$

\bar{T} : température ambiante moyenne =24°C

T_{ar} : amplitude de température=6°C

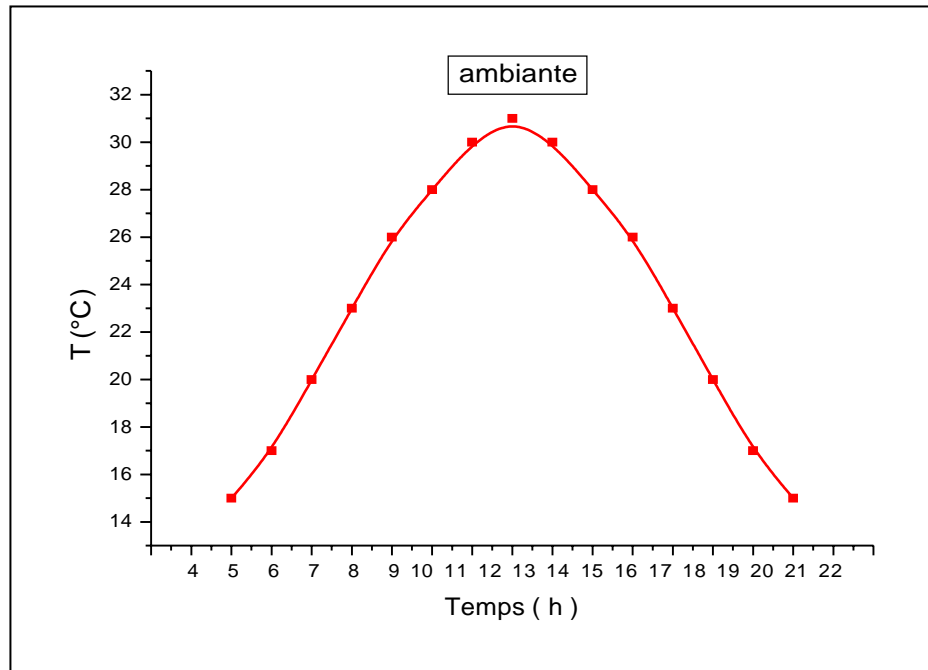


Figure (IV.5) : La variation de la température ambiante en fonction du temps
(11/04/2017)

La figure IV.5 montre que la variation de la température ambiante prend une forme sinusoïdale. Sa valeur minimale est (15°C) avant le lever de soleil et après le coucher de soleil, et sa valeur maximale atteint 31°C à 13h00.

IV.3.3 Effet de l'épaisseur de la couche MCP

Dans ce cas, nous avons intégré différentes épaisseurs de la couche MCP au-dessous de la plaque absorbante dans le séchoir solaire direct. Le MCP utilisé dans ce cas c'est l'un avec la température de fusion 326.5K (ses propriétés thermo-physiques sont déjà mentionnées dans le chapitre III (tableau .III.3). Les épaisseurs utilisées dans ce cas sont 2cm, 4cm et 6cm. Dans le but d'étudier l'influence des quantités des MCP, les résultats obtenus sont comparés en référence au cas du séchoir solaire sans MCP. Pour cela nous avons choisi de tracer les courbes de température de la plaque absorbante en fonction du temps pour différentes épaisseurs.

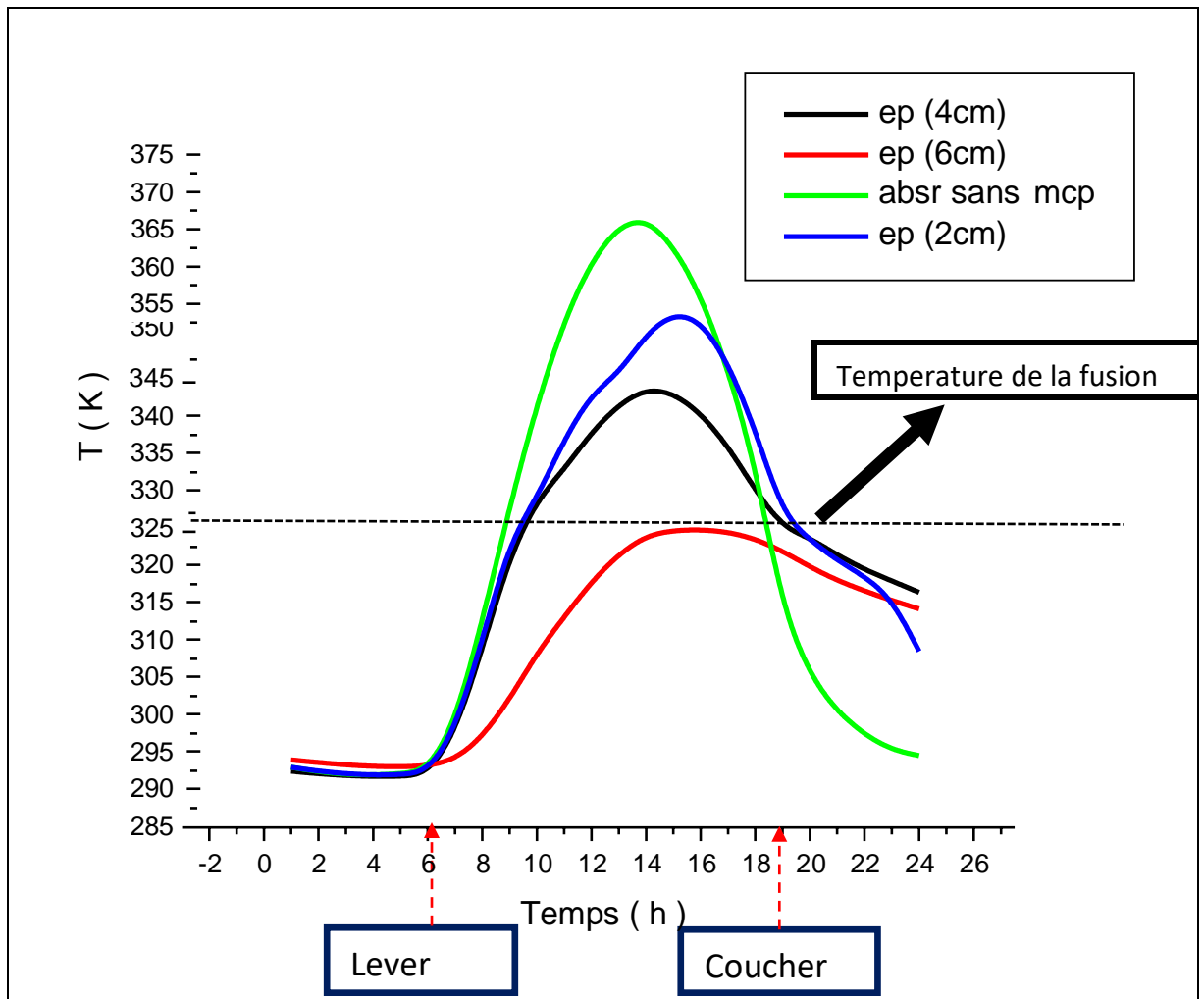


Figure (IV.6) : Variation de la température moyenne de l'absorbeur en fonction du temps pour différentes épaisseurs de MCP dans le séchoir solaire direct (11/04/2017).

La figure IV.6 représente la variation de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de temps, on remarque que la courbe subit une réfraction quand la température de l'absorbeur approche à la température de fusion de MCP (326.5 K). On remarque aussi qu'il y a un faible déphasage, notamment au point du moment de pic, entre les courbes quand on augmente l'épaisseur du MCP. La différence de température maximale de l'absorbeur entre la courbe de MCP et sans MCP augmente quand on augmente l'épaisseur du MCP. Il est très clair qu'à partir de 19h (coucher du soleil), les températures obtenues pour les différentes épaisseurs du MCP sont plus que celles du cas du séchoir sans MCP. On peut citer, à titre indicatif, qu'à 24h00 on observe un écart de température de 23°C entre le cas du séchoir sans MCP et le cas de 4 cm de l'épaisseur de MCP. La meilleure épaisseur de MCP qui donne le meilleur résultat c'est

bien l'épaisseur de 4cm, elle permet de garder la température de l'absorbeur plus élevée après le coucher de soleil environ de 316K à 24h00 et plus que celle du cas du séchoir sans MCP par 23°C.

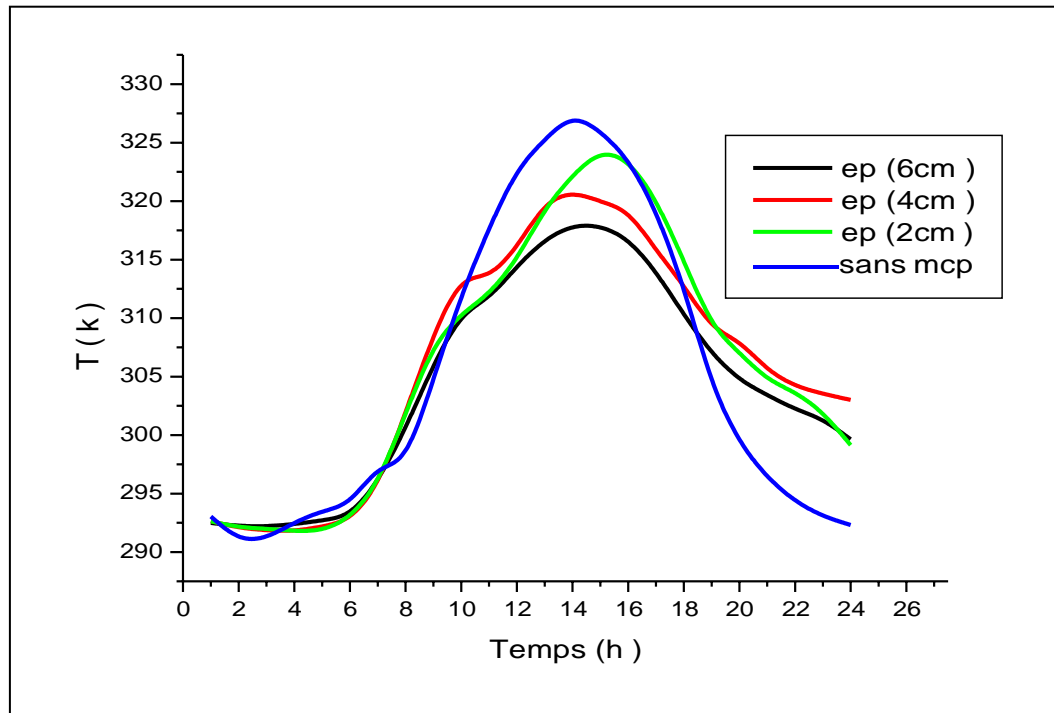


Figure (IV.7) : Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire direct avec différents épaisseurs de MCP.

La figure IV.7 montre l'évolution de la température de l'air de séchage au milieu du séchoir solaire direct avec intégration des différentes épaisseurs de MCP. On remarque que la température de l'air de séchage dans le cas du séchoir solaire sans MCP atteint la valeur maximale (327°C) à 14h00, puis elle commence à diminuer avec le passage du temps jusqu'à devenir égale à la température ambiante après le coucher de soleil. Dans le cas du séchoir solaire sans MCP, le processus de séchage s'arrête directement avec le coucher de soleil et le séchoir ne fonctionne plus.

Avec l'intégration des différentes épaisseurs de MCP, on remarque qu'avant le coucher de soleil, la température de l'air de séchage est moins que celle du séchoir sans MCP, cette diminution est traduite par l'influence de l'addition de MCP au-dessous de l'absorbeur. Le transfert conductif entre le MCP et l'absorbeur entraîne la diminution de la température de l'absorbeur ce qui implique une diminution de la température de l'air avant le coucher de soleil.

Après le coucher de soleil, on remarque que la température de l'air de séchage dans le cas du séchoir avec MCP est élevée que celle dans le cas du séchoir sans MCP grâce à l'intégration du MCP au-dessous de la plaque absorbante. Le MCP stocke de la chaleur pendant les heures bien ensoleillées pour la fournir encore après le coucher de soleil. Le MCP se comporte comme une source de chaleur. En prend à titre d'exemple, à 22h00, la température de l'air de séchage dans le cas sans MCP est de l'ordre de 294K, et elle est 305K dans le cas du séchoir avec 4cm d'épaisseur de MCP. L'intégration d'une couche d'épaisseur 4cm de MCP permet d'augmenter la température de l'air de séchage par 11°C après le coucher de soleil. On peut estimer sur la base de ce résultat la possibilité de prolonger le temps fonctionnement du séchoir solaire par plus de 4 heures après le coucher de soleil, quoique la valeur de température assurée après coucher de soleil ne soit pas assez suffisante pour opérations de séchage des produits agroalimentaires. D'où le besoin d'un autre appoint thermique à rajouter.

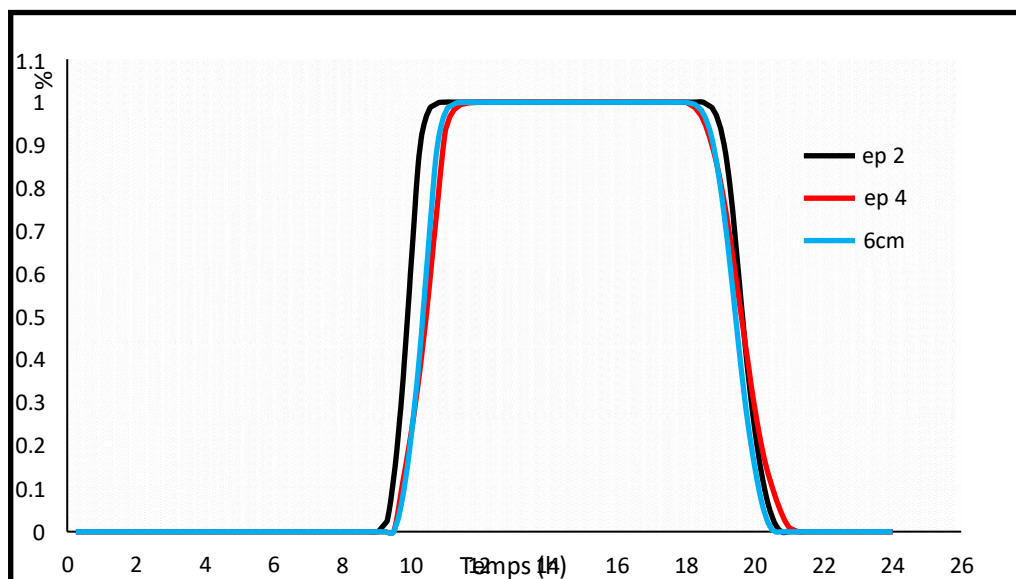


Figure (IV.8) Fraction de liquide du MCP en fonction de temps

Dans l'objectif de vérifier le comportement du MCP en stockage et déstockage nous avons présenté sur la figure (IV.8) la fraction liquide de MCP en fonction du temps pour différentes épaisseurs. On remarque que la fusion de MCP commence à 09h00 et la solidification à 18h00. Cette figure montre que la réfraction des courbes précédentes est dû au l'influence de changement de phase de MCP. Nous remarquons

aussi, que pour toutes les épaisseurs étudiées, la totalité du volume du MCP participe au changement de phase dans ses deux directions ce qui indique que le maximum possible de chaleur a été extrait.

IV.3.4 Effet 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 déterminés. À partir de l'utilisation des différents MCP avec une épaisseur fixe (4 cm) l'influence de ces configurations a été représentée dans cette partie d'étude. Les propriétés thermo-physiques des MCP utilisés sont mentionnées au chapitre III, (tableau.III.3)

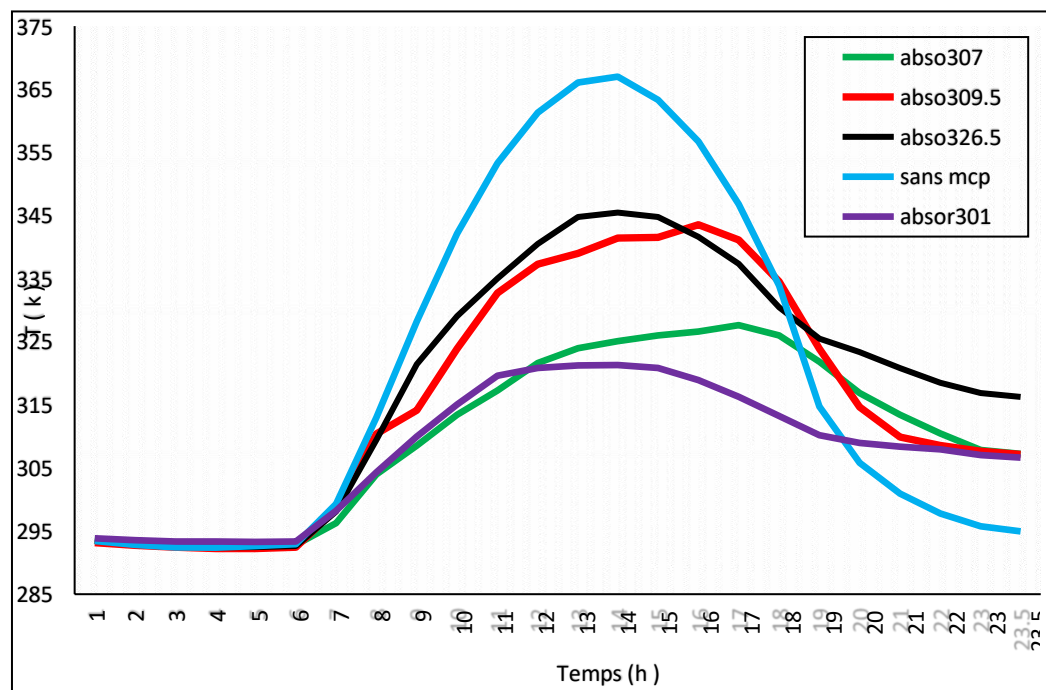


Figure (IV. 9) : Evolution de la température de l'absorbeur en fonction de temps pour différents types de MCP

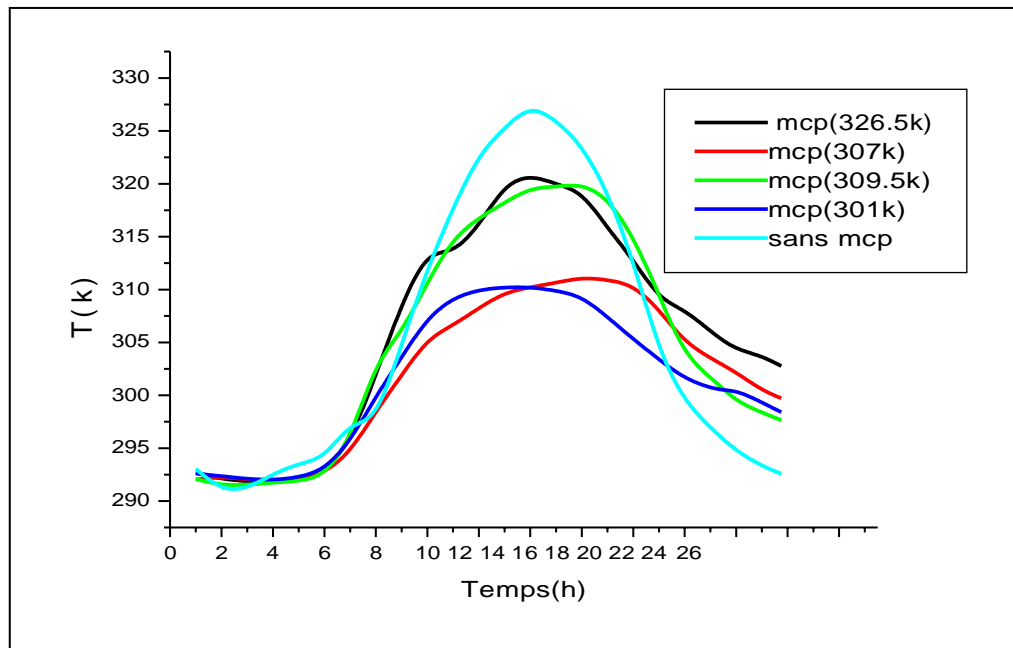


Figure (IV. 10) : Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire en fonction de temps pour différents types de MCP.

Dans les deux figures IV. 9-10, on remarque que les courbes subissent des réfractions dans des températures différentes correspondant la température de fusion de chaque MCP, l'absorbeur est en contact direct avec le MCP donc pendant le temps de changement de phase l'absorbeur va donner une quantité d'énergie obtenue par rayonnement aux MCP qui utilisent cette dernière pour changer leurs phases. On remarque aussi que le déphasage, notamment au point du moment de pic, augmente quand on intègre des MCP avec des températures de fusion faibles, par contre il diminue quand on intègre des MCP avec une chaleur latente de fusion plus forte. Le meilleur MCP c'est l'un qui donne la plus grande valeur de température de l'air après le coucher de soleil. Dans notre cas, on remarque la plus grande température obtenue après le coucher de soleil est trouvée dans le cas de MCP avec la température de fusion 326.5K. On constate que le choix de meilleur MCP dépend fondamentalement des deux paramètres suivants : la température de fusion et la chaleur latente du matériau. Le meilleur MCP c'est l'un qui a une grande chaleur latente avec prise en considération sa température de fusion.

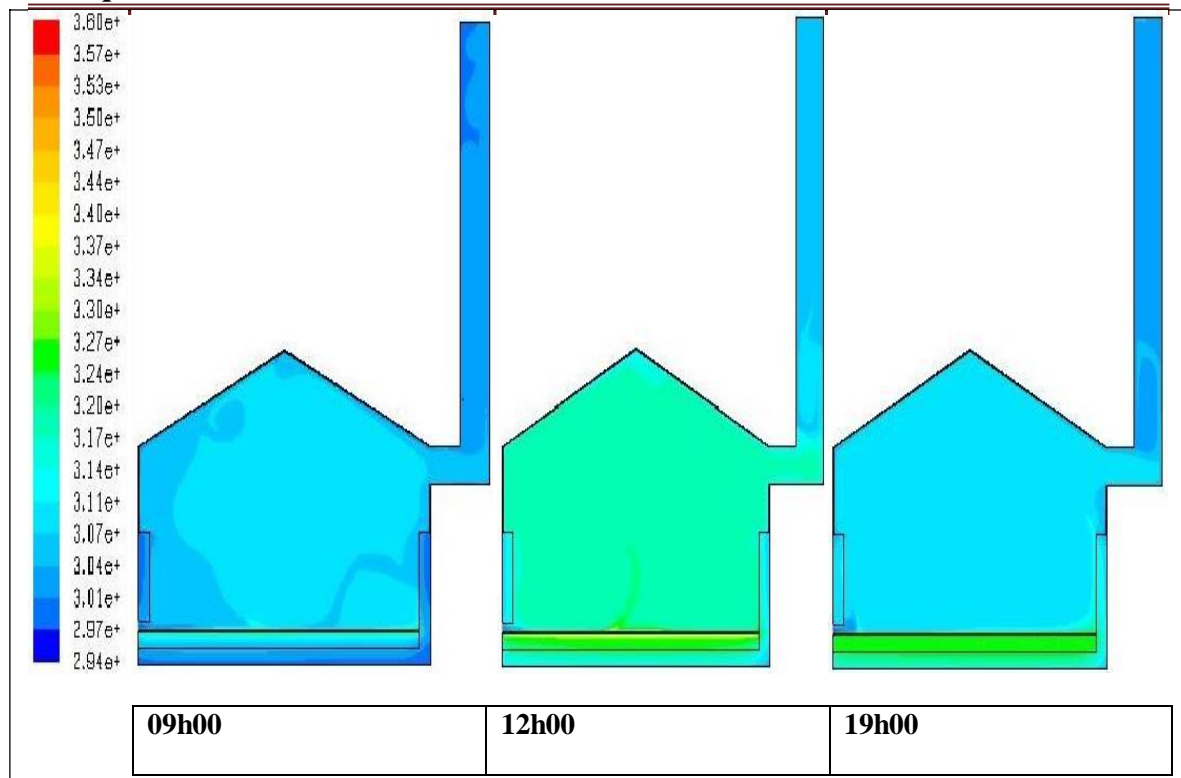


Figure (IV.11) Distribution de température dans le séchoir solaire directe avec MCP

A 09h00, on remarque que la température de l'air à l'intérieur de séchoir s'élevé sous l'effet du rayonnement solaire. Avec le passage du temps et à 12h00, le rayonnement solaire devient plus élevé ce qui permet d'augmenter la température de l'air et de générer une homogénéité à l'intérieur du séchoir solaire. On remarque aussi que la température de la couche MCP est plus élevée par comparaison avec celle à 09h00. Après le coucher de soleil, à 19h00, on remarque que la température de MCP la plus grande par rapport aux autres composantes du séchoir ce qui permet d'alimenter le séchoir par la chaleur et de chauffer l'air circulant. La température de l'air de séchage reste encore homogène et qu'elle est suffisante pour continuer l'opération de séchage grâce l'effet de MCP. Pendant les heures non ensoleillées, le MCP à l'état liquide fournira la chaleur à l'absorbeur ; c'est la chaleur utile du fluide caloporteur en circulation. Par conséquent, Le fluide caloporteur fournit encore de la chaleur après le coucher de soleil. Le MCP se comporte comme une source de chaleur.

IV.4 Simulation du séchoir solaire direct avec intégration des matériaux à changement de phase (MCP) pour la journée 29/11/2017

Dans cette partie d'étude, nous allons présenter des résultats de simulation obtenus pour une journée différente que la première. Cette journée est choisie à travers de la saison d'automne sensiblement plus froide que le cas précédent. Ceci est clair dans

les deux figures ci-dessous (IV. 12-13). Le but de changement de la journée c'est pour voir le degré de l'influence de MCP sur la performance thermique du séchoir solaire dans les journées à faible ensoleillement.

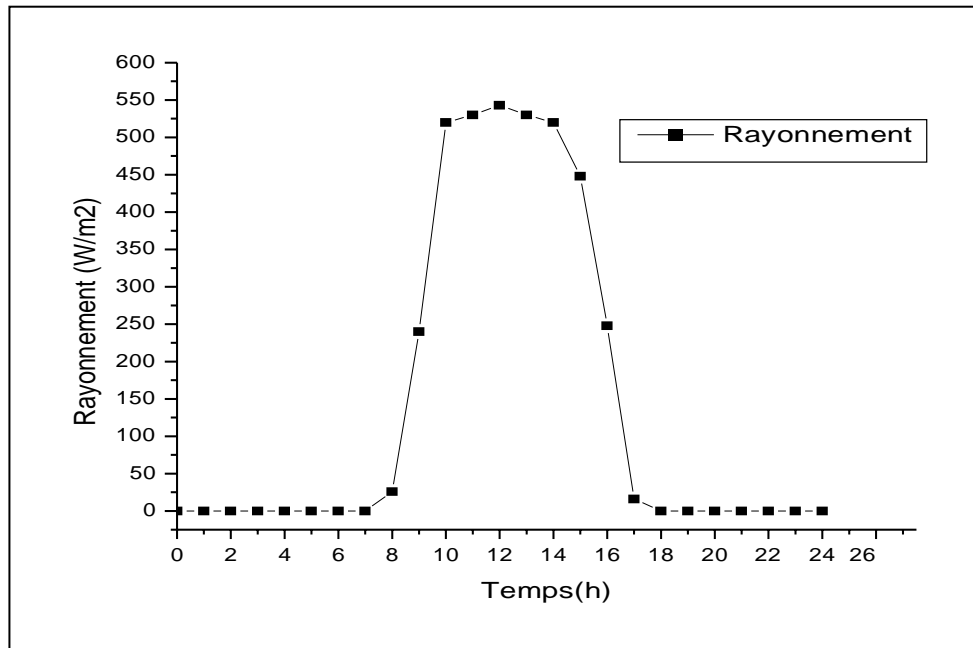


Figure (IV.12) Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps (29/11/2017)

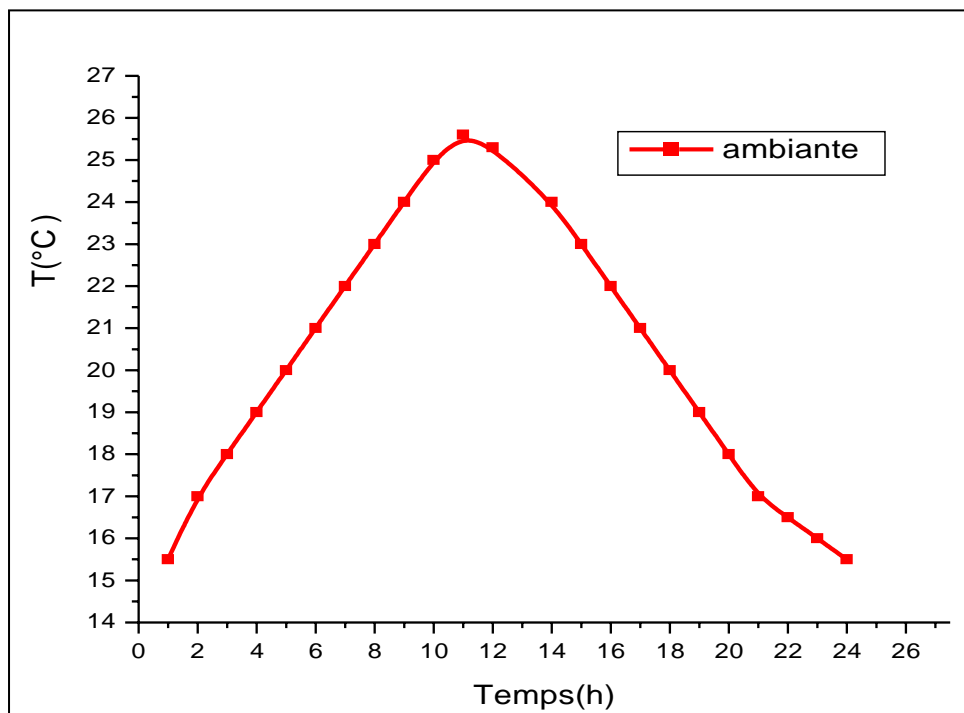


Figure (IV.13) Evolution de la température ambiante en fonction du temps

IV.4.1 Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux

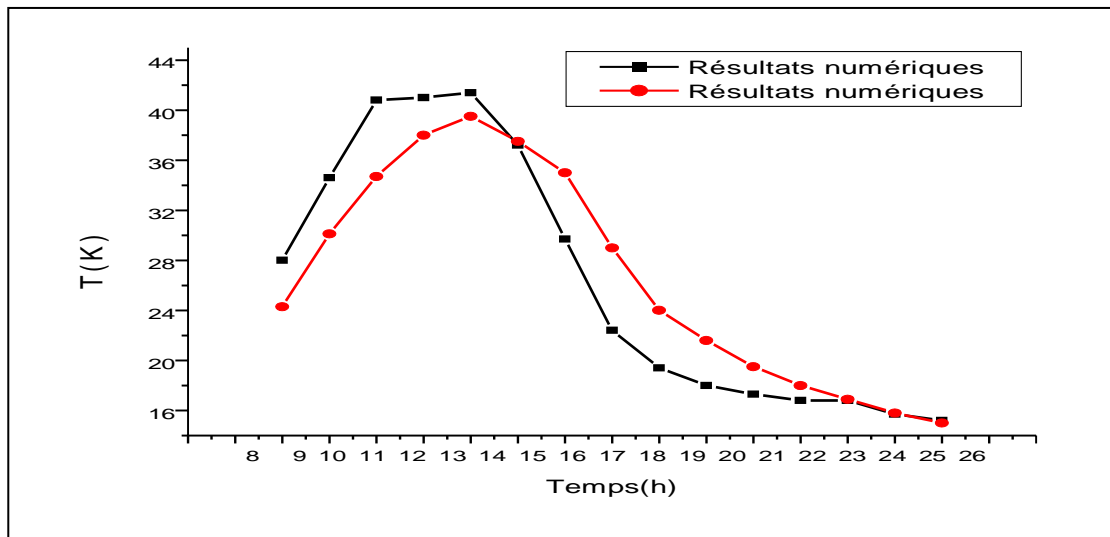


Figure (IV.14) Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire réel et simulé

La figure IV.14 montre que la température maximale de l'air au milieu du séchoir ne dépasse pas 41°C dans les deux cas d'étude ; simulation et expérimentale (il est à noter que Les résultats expérimentaux sont issus de mesures non publiées faites au Labo LENREZA); ce qui montre l'influence de rayonnement solaire sur la performance thermique du séchoir solaire. Cette dernière évolue parallèlement avec la quantité reçue du rayonnement solaire. On remarque aussi que le maximum écart de température observé entre les résultats de simulation et de l'expérimental est 5°C ce qui reflète la fiabilité de notre modèle de simulation.

IV.4.2 Effet de la nature du matériau à changement de phase

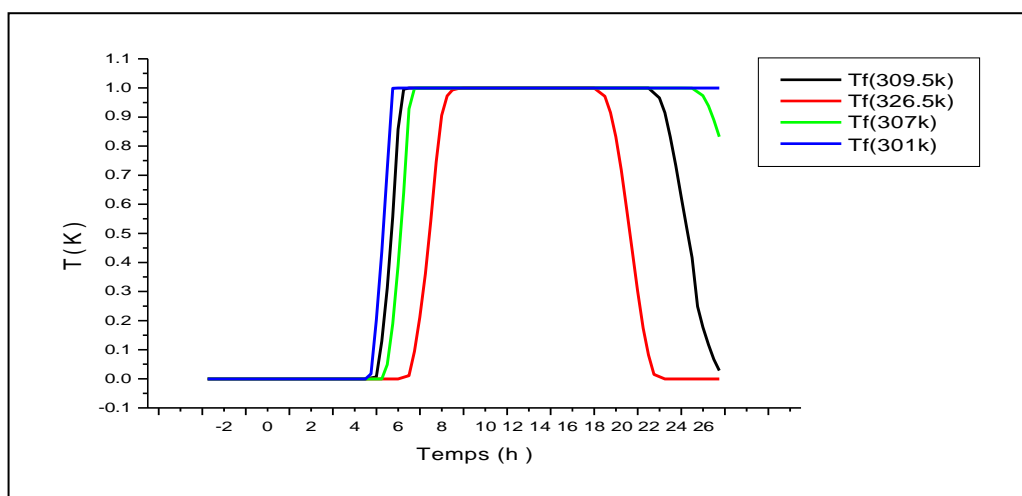


Figure (IV.15) : Fraction de liquide en fonction de temps pour différents MCP

(29/11/2017)

La figure IV.15 ci-dessus représente la fraction de liquide du volume total de MCP placé au-dessous de l'absorbeur. On remarque que trois des MCP testés ont achevé au maximum leur cycle de changement de phase (solide-liquide et liquide-solide). Tandis qu'on remarque aussi qu'une partie de MCP avec température de fusion 301 K ne revient pas à l'état solide à cause de son faible température de fusion qui ne le permette pas de compléter le processus de changement de phase. Le MCP avec la grande température de fusion c'est lui qui fait le cycle de changement de phase premièrement.

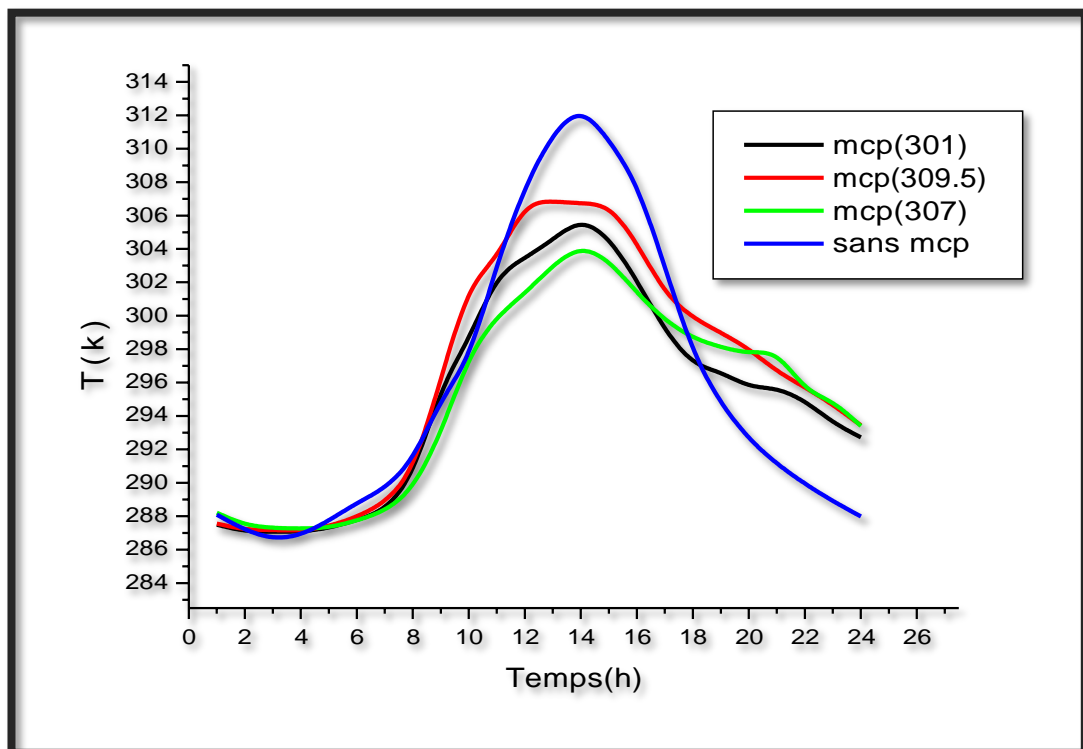


Figure (IV.16) Evolution de la température de l'air au milieu de séchoir solaire avec intégration des différents types de MCP

Dans la figure IV. 16, on remarque qu'avec l'ajout de la couche MCP au-dessous de la plaque absorbante la température de l'air avant le coucher de soleil diminue par comparaison avec le cas du séchoir sans MCP, cette diminution se traduit par l'influence de MCP qui absorbe la chaleur de l'absorbeur par transfert thermique par condition ce qui diminue la température de l'air. Après le coucher de soleil, la température de l'air au milieu dans le cas du séchoir avec MCP devient plus grande que celle du séchoir sans MCP grâce à l'influence de MCP qui relâche la chaleur qui l'a stockée durant la journée pour échauffer l'air circulant. La température maximale de l'air obtenue par l'intégration de MCP est 300 K à 20h00 dans le cas de MCP à

$T_f=309.5$ K, cette valeur de température est insuffisante pour faire une opération de séchage. On constate que le l'utilisation de MCP est n'est pas efficace dans les jours à faible rayonnement solaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail concerne la contribution à l'étude d'amélioration des performances thermiques des séchoirs solaires particulièrement dans la période après le coucher de soleil. La présente étude a porté sur la simulation numérique du séchoir solaire direct 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 vision telle que:

- a- Essais de validation du modèle numérique adopté, faisant recours à des résultats expérimentaux relevés sur un séchoir solaire direct, conçu et réalisé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides et sahariennes (LENREZA, Univ. Ouargla, Algérie), et ce dans le cadre de travaux antérieurs de master (2016/2017).
- b- Simulation numérique du séchoir solaire direct sans intégration de MCP dans le sens d'évaluer sa performance thermique.
- c- Simulation du séchoir solaire direct avec l'intégration d'une couche plate de MCP au-dessous de la plaque absorbante. Cette partie de simulation est menée dans le sens de montrer les effets des apports thermiques offerts par le MCP. Nous avons discuté dans ce cas l'effet de l'épaisseur de la couche de MCP et de la nature de celui-ci.

Les résultats obtenus dans cette étude, dans le cas d'absence de MCP, ont montré la fiabilité de notre modèle de simulation adopté par comparaison avec les résultats de l'expérience. 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. Pendant les heures non ensoleillée, le MCP à l'état liquide fournira la chaleur à l'absorbeur ; c'est la chaleur utile du fluide caloporteur en circulation. Par conséquent, le fluide caloporteur fournit encore de la chaleur après le coucher de soleil. Le MCP se comporte comme une source de chaleur. En effet parmi les épaisseurs testées, celui de 4cm donnait un meilleur apport thermique pour une durée supplémentaire de quatre heures après le coucher de soleil, tandis que le MCP à

température de fusion à 326.5K (53.5°C) se montrait meilleur parmi les autres matériaux testés. D'autre part les résultats obtenus dans notre étude ont aussi montré que l'utilisation des MCP semble ne pas être efficace dans les jours à faible rayonnement solaire.

A L'issue des différentes parties de cette étude, nous avons pu retenir quelques éléments que nous notons, en perspectives :

- Nécessité d'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 séchoir solaire

Références Bibliographiques

- [1] Charreau. A, Cavaille, R. Séchage théorie et pratique, Technique de l'Ingénieur, génie des procédés, 1991, 2480-1; 2480-23.
- [2] BIMBENET, J. J. Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire Cahiers du génie Industriel Alimentaire (GIA), Sepaic, Paris 2 ème édition pp34 Cité par H. 1984.
- [3] BOUSSALIA, Amar. Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. 27/06/2010.
- [4] Boukadoum et Boulemtafes Amel, Le séchage solaire des produits agricoles ,Recherche et Développement pp10 (https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_021_07.pdf, consulté le ../01/2017)
- [5] BAHADJ, Ahmed. Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre. 2016. PhD Thesis.. pp3
- [6] KANOUNE, Brahim; TRITIBA, Abdeslam. Etude et amélioration de l'efficacité énergétique d'un séchoir solaire direct à convection naturelle. 2017. PhD Thesis. Université Kasdi Merbah Ouargla
- [7] Khenblouche Abdelkader, Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire, mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla ,07/06/2014 PP3.
- [8] SCHNELL, D. Technique de séchage, Traduit de l'allemand. GMBH, Eschborn, 1983.
- [9] Herba bio La journée annuelle technico-économique des plantes à parfum, aromatiques et médicinales bio dans le Puy de Dôme, 9 octobre 2008.
- [10] DUDEZ, Philippe; THÉMELIN, André; REYNES, Max. Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés. Édition du Gret, 1996.
- [11] MAHDADI, Roukia. Etude Comparative de L'efficacité Énergétique de Deux Prototypes de Séchage Solaire. PhD Thesis.2009.pp30-35.
- [12] DADDA, B.; KHERROUR, S.; SERIR, L. Réalisation d'un séchoir solaire indirect. Revue des Énergies Renouvelables, 2009, 127-134.
-] 14[EKECHUKWU, O. Va ; NORTON, Brian. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy conversion and management, 1999, 40.6: 615-655.

- [28] Jessica Giro-Paloma et al, Types, methods, techniques and applications for microencapsulated phase change materials (mmcp): A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 2016,
- [29] Rathod , Manish K.; Banerjee, Jyotirmay. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 246-258.
- [30] PY, Xavier; Olives, Regis; Mauran, Sylvain. Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material. *International Journal of heat and mass transfer*, 2001, 44.14: 2727-2737.
- [31] Nallusamy, N.; Sampath, S.; Velraj , R. Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources. *Renewable Energy*, 2007, 32.7: 1206-1227.
- [32] Ahmad, Maha. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires. 2004. PhD Thesis. Université Joseph Fourier (Grenoble).
- [33] Abou Hassan Ali, Modélisation et caractérisation de modules de stockage de chaleur comprenant des matériaux à changement de phase, Rapport de stage Master Recherche,(2012).
- [34] Dincer.I and Rosen, M. *Thermal energy storage: systems and applications*, 2nd .2011, pp. 84-141pp 1059-1075.
- [35] Lane, G. A .Rossow , H. E. Encapsulation of heat of fusion storage materials. In: *Proceedings of 2nd southeastern conference on application of solar energy*. 1976. p. 442-450.
- [36] Lane, George A. Low temperature heat storage with phase change materials. *International Journal of Ambient Energy*, 1980, 1.3: 155-168.

- [37] Khudhair, Amar M.; Farid, Mohammed M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy conversion and management*, 2004, 45.2: 263-275.
- [38] BASF, 'Wecreatechemistry. [Http: //www.basf.fr/ecp2/France/fr/](http://www.basf.fr/ecp2/France/fr/)'.
- [39] Akrouche, Amina. Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase. 2011. PhD Thesis.
- [40] Ghasallaoui , Adem, et al. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 2007, 40.9: 1107-1121.
- [41] Wang, Xiaowu, et al. Heat storage performance of the binary systems neopentyl glycol/pentaerythritol and neopentyl glycol/trihydroxy methyl-aminomethane as solid–solid phase change materials. *Energy conversion and management*, 2000, 41.2: 129-134.
- [42] Wikipédia, Diffusivité thermique, site web: https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusivit%C3%A9_thermique.
- [43] Les données du Data base de Fluent.
- [44] Chen, Zhenqian; GU, Mingwei; Peng , Donghua. Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30.14-15: 1967-1973.
- [45] Khalifa, KHALIFA, Abdul Jabbar N.; SUFFER, Kadhim H.; MAHMOUD, Mahmoud Sh. A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44: 174-181.
- [46] Settou, Belkhir et Benhamze Abderrahmane, Simulation théorique d'un capteur solaire utilisant des matériaux à changement de phase pour le stockage de la chaleur latente. Thèse de Master, 2015/2016
- [47] Oudjedi, S., et al. Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie: 2). *Revue des Energies Renouvelables SMSTS*, 2008, 8: 255-266.
- [48] Naphonm. NAPHON, Paisarn. Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater. *International communications in heat and mass transfer*, 2005, 32.1-2: 140-150.
- [49] Chen, Wei; LIU, Wei. Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28.11-12: 1251-1258.

