



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des sciences de la matière

MEMOIRE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la matière.

Filière : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Intitulé

**Contribution à l'amélioration de fonctionnement d'un
capteur solaire : "Utilisation d'un MCP "**

Présenté par :

Melle. REGGADI Aicha

Melle. BABAHAJ Meriama

Soutenu publiquement le 30/05/2018

Devant le jury :

Président :	HARROUZ Abdelkader	M.A	Univ. Adrar
Promoteur :	MEDIANI Ahmed	M. R. A	URER-MS. Adrar
Examineur :	BENATIALLAH Ali	M.A	Univ. Adrar

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciement

Nous remercions notre DIEU le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la Volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué dans l'Unité de Recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URMER) d'ADRAR, sous la direction de Monsieur, **MEDIANI Ahmed**, attaché de recherche au sein de l'unité.

Nous remercions vivement et chaleureusement Monsieur **MEDIANI Ahmed** encadreur de ce mémoire, pour nous avoir soutenus et guidés tout au long de ce mémoire. Nous remercions l'ensemble des enseignants du département des sciences technologies pour leur patience durant notre étude surtout **Mr. OMARI Boumediene**.

Nous voulons exprimer nos remerciements aux membres de jury, pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

profonde gratitude au **Mr. BENATIALLAH Ali** professeur à l'Université Ahmed Draia Adrar, qui a accepté aussi d'examiner ce travail.

Nous voulons exprimer nous profonde gratitude au **Mr. HARROUZ Abdelkader** docteur à l'Université Ahmed Draia Adrar, qui a accepté la présidence de l'éminent jury de cette mémoire.

Nos vifs remerciement vont aux membres de l'équipe de séchage solaire pour leur soutien et patience.

Nous tenons également à remercier **Mr. BENHAMMOU Mohammed** et **Mr. MOUNGAR Houcine**: chercheurs au sein de l'URERMS pour leurs aides et conseils utiles.

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à tous les membres de l'«URERMS» sans oublier les étudiants.

Promotion 2017/2018



Dédicace

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Nos chers parents, qui nous ont toujours soutenu dans nos études.

Tous nos frères et sœurs chacun avec son nom.

Tous nos familles chacune par son nom.

Tous nos enseignants chacun par son nom, surtout Mr. OMARI Boumediene.

Tous nos collègues chacun son nom.

Toute personne qui nous a aidé, chacune son nom.

Promo physique énergétique 2017/2018.

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Nomenclature	v
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le séchage solaire	
I.1. Introduction	3
I.2. Généralités sur le séchage solaire	3
I.2.1. Définition du séchage solaire	3
I.2.2. Propriétés de l'air de séchage solaire	3
I.2.2.1. Humidité absolue	4
I.2.2.2. Humidité relative	4
I.2.2.3. Températures caractéristiques de l'air humide	5
I.2.2.3.1. Température sèche «Température de bulbe sec »	5
I.2.2.3.2. Température humide «Température de bulbe humide »	5
I.2.2.3.3. Température de rosé (Point de rosée)	5
I.2.4.1. Description du solide humide	6
I.2.4.2. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)	7
I.2.4.3. Humidité relative(teneur en eau à base sèche)	7
I.2.4.4. Répartition de l'eau dans le matériau	7
I.3. Mesure de l'humidité	8
I.3.1. Hygromètre à cheveux	8
I.3.2. Thermo-hygrographe	8
I.4. Modes de séchage solaire	9
I.4.1. Séchage par conduction	9
I.4.2. Séchage par convection	9
I.4.3. Séchage par rayonnement	10
I.5. Transfert de masse	10
I.6. Choix du procédé de séchage	10
I.7. Processus de séchage	11
I.8. Vitesse de séchage	11
I.9. Cinétique du séchage solaire	11
I.10. Types de séchoirs solaire	12

I.10.1. Les séchoirs solaires directs	12
I.10.2. Les séchoirs solaires indirects	13
I.10.3. Les séchoirs mixtes	15
I.10.4. Les séchoirs hybrides	16
I.11. Conclusion	17
Chapitre II : Les capteurs solaires et les matériaux à changement de phase	
II.1. Introduction	19
II.2. Etat de l'art-Travaux scientifiques des capteurs solaires Thermiques	19
II.3. Les capteurs solaires thermiques	20
II.3.1. Principaux types des capteurs solaire thermiques	21
II.3.1.1. Le capteur à tube sous vide	21
II.3.1.2. Le capteur cylindro- parabolique	21
II.3.1.3. Le capteur parabolique	22
II.3.1.4. Capteurs non-vitrés	22
II.3.1.5. Le capteur solaire à air	22
II.3.1.5.1. Les composants du capteur solaire à air	23
II.3.1.5.1.1. La couverture transparente	23
II.3.1.5.1.2. L'absorbeur	23
II.3.1.5.1.3. Le fluide caloporteur	23
II.3.1.5.1.4. L'isolant thermique	23
II.3.1.5.1.5. Le cadre	23
II.3.1.5.2. Effet des obstacles sur les échanges convectifs	24
II.3.1.5.2.1. Influence des chicanes sur la performance d'un capteur à air	24
II.3.1.5.3. Les applications des capteurs solaires à air	24
II.4. Stockage de l'énergie thermique	25
II.4.1. Stockage par chaleur sensible	26
II.4.2. Stockage thermochimique	26
II.4.3. Stockage par chaleur latente	27
II.4.3.1. Les matériaux à changement de phase	27
II.4.3.1.1. Propriétés des matériaux à changement de phase	28
II.4.3.1.1.1. Critères thermodynamiques	28
II.4.3.1.1.2. Critères cinétique	29
II.4.3.1.1.3. Critère chimique	29

II.4.3.1.1.4. Critère économiques	29
II.4.3.1.2. Les applications des MCP	29
II.4.3.1.3. Classification des matériaux à changement de phase	30
II.4.3.1.3.1. Composants organiques	31
II.4.3.1.3.2. Composants inorganiques	32
II.4.3.1.3.3. Composés eutectiques	32
II.4.3.1.4. Etude comparative des composés organiques et inorganiques	33
II.4.3.1.5. Les différentes formes de matériaux à changement de phase	34
II.4.3.1.5.1. Capsules de diverses géométries	34
II.4.3.1.6. Base théorique des matériaux à changement de phase	35
II.4.3.1.6.1. La cristallisation	36
II.4.3.1.6.2. Les problèmes liés au changement de phase	36
II.4.3.1.7. Les capteurs solaires intégrant le stockage(CSIS)	37
II.4.3.1.8. Principe des matériaux à changement de phase	38
II.5. Conclusion	39

Chapitre III : Etude numérique du capteur solaire à air

III.1. Introduction	41
III.2. Simulation numérique du capteur solaire à air sans et avec MCP	41
III.2.1 Simulation numérique du capteur solaire à air sans MCP	41
III.2.1.1. Bilan thermique global du capteur solaire à air	41
III.2.1.2. Principe de captation du rayonnement solaire	41
III.3. Propriétés thermo-physiques du capteur solaire à air	42
III.4. Bilan thermique global de la paroi absorbante	42
III.5. Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire à air	44
III.5.1. Capteur solaire à air plan simple	45
III.5.1.1. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques	45
III.5.1.2. Echanges thermiques par rayonnement	46
III.5.1.2.1. Echange thermique par rayonnement entre la vitre et voute céleste	46
III.5.1.2.2. Echange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre	47
III.5.1.2.3. Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol	47
III.5.1.3. Echange thermique par conduction	47
III.5.1.4. Echange par convection	48
III.5.1.4.1. Echange thermique par convection du au vent	48

III.5.1.4.2. Echange thermique par convection dû au fluide caloporteur	48
III.6. Calcul des pertes thermiques	49
III.7. Expressions analytiques du bilan énergétique	50
III.7.1. Pour la couche de la verre	50
III.7.2. Pour le fluide caloporteur	51
III.7.3. Pour la plaque absorbante	51
III.7.4. Pour l'isolant	51
III.8. Etude numérique du capteur solaire à air sans MCP en CN	52
III.8.1. Les données météorologiques	52
III.8.1.1. La variation temporelle du rayonnement solaire	53
III.8.1.2. La variation de la température ambiante	54
III.8.2. Les courbes des températures des différents composants du capteur solaire en CN	54
III.8.2.1. La variation temporelle de la température de la plaque absorbante en CN	54
III.8.2.2. variation temporelle de la température du fluide sortant du capteur en CN	55
III.8.2.3. La variation temporelle de la température de la vitre en CN	56
III.8.2.4. La variation temporelle de la chaleur utile en CN	56
III.8.2.5. La variation instantanée du rendement du capteur solaire en CN	57
III.9. Simulation numérique du capteur solaire à air sans MCP en CF	57
III.9.1. Les données météorologiques	57
III.9.2. La variation temporelle du rayonnement solaire de 2/5/2018	58
III.9.3. La variation temporelle de la température ambiante de 2/5/2018	58
III.9.4. La variation temporelle de la température de la plaque absorbante en CF	59
III.9.5. La variation temporelle de la température du fluide sortant en CF	60
III.9.6. La variation temporelle de la température du vitrage en CF	61
III.9.7. La variation temporelle de la température des différents composants du capteur à air	61
III.9.8. La variation temporelle de la chaleur utile en CF	62
III.9.9. La variation instantanée du rendement thermique du capteur solaire en CF	63
III.10. Simulation numérique du capteur solaire à air avec MCP	63
III.10.1. L'effet du matériau à changement de phase sur les performances thermiques	64
III.10.1.1. L'effet du matériau à changement de phase sur la plaque absorbante	64

III.10.1.2. L'effet du matériau à changement de phase sur le fluide sortant	66
III.10.1.3 L'effet du matériau à changement de phase sur l'enthalpie à la sortie	67
III.11.Conclusion	70
Chapitre IV: Résultats expérimentaux et discussions	
IV. Résultats expérimentaux et discussions	72
IV.1. Introduction	72
IV.2.Etude expérimentale du capteur solaire en convection naturelle	72
IV.2.1. Présentation de banc d'essai du capteur solaire à air étudié sans MCP	72
IV.4. Les instruments de mesure expérimentale	73
IV.3. Les résultats expérimentaux des températures en convection naturelle	73
IV.4. Validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux en CN	75
IV.5. Résultats expérimentaux et discussions en convection forcée	77
IV.5.1. Les résultats expérimentaux des températures en convection forcée	78
IV.5.2.Validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux en CF	79
IV.6. Conclusion	81
Conclusion générale	83
Références bibliographiques	86
Annexe	89
ملخص	
Résumé	
Abstract	

Liste des figures

Figures	Titres	Page
Figure I.1	Volume de contrôle microscopique	6
Figure I.2	Description du solide humide	6
Figure I.3	Les différents types d'eau dans le matériau	8
Figure I.4	Hygromètre à cheveux	8
Figure I.5	Thermo-hygrographe	9
Figure I.6	L'allure de séchage en fonction du temps	12
Figure I.7	séchoir solaire direct simple	13
Figure I.8	séchoir solaire de type indirect	14
Figure I.9	Chambre du séchoir solaire indirect	15
Figure I.10	Schéma descriptif du séchoir solaire indirect	15
Figure I.11	Séchoir solaire mixte	16
Figure I.12	Séchoir solaire hybride	17
Figure II.1	capteur thermique à concentration	20
Figure II.2	Capteur solaire thermique	20
Figure II.3	Capteur à tube sous vide	21
Figure II.4	Système à réflecteur cylindro-parabolique	21
Figure II.5	Capteur parabolique	22
Figure II.6	Capteurs solaires sans-vitrage	22
Figure II.7	capteur solaire à air	23
Figure II.8	Capteur solaire à air avec les obstacles (chicanes longitudinales)	24
Figure II.9	Rendement des différents types de capteurs selon l'écart de T	25
Figure II.10	Différents types de stockage thermique de l'énergie solaire	26
Figure II.11	Les matériaux à changement de phase	28
Figure II.12	Récipients sang contient MCP	30
Figure II.13	Classification des MCP	30
Figure II.14	MCP sous forme capsule sphérique et cylindrique	31
Figure II.15	Stockage ou le déstockage de chaleur latente	34
Figure II.16	Stockage de l'énergie thermique	35
Figure II.17	Evolution théorique de la température en fonction du temps	35
Figure II.18	Solidification présentant une surfusion	36
Figure II.19	Evolution de la chaleur en fonction de la Température pour un corps pur	37
Figure II.20	Intégration un MCP dans le capteur solaire à air	38
Figure II.21	Principe du Stockage thermique par changement de phase	38
Figure III.1	Schéma de principe d'un capteur solaire plan	42
Figure III.2	Différents échanges thermiques dans un capteur à air	45
Figure III.3	Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air	46
Figure III.4	La variation temporelle du rayonnement solaire	53
Figure III.5	la variation temporelle de la température ambiante	54

Figure III.6	La variation temporelle de la température de plaque en CN	54
Figure III.7	La variation temporelle de la température simulée du fluide à la sortie en CN	55
Figure III.8	La variation temporelle de la température simulée du vitrage en CN	56
Figure III.9	La variation temporelle de la puissance utile en CN	56
Figure III.10	La variation instantané du rendement thermique simulé du capteur en CN	57
Figure III.11	La variation temporelle du rayonnement solaire de 2/5/2018	58
Figure III.12	La variation temporelle de la température ambiante 2/5/2018	59
Figure III.13	La variation temporelle de la température simulée de la plaque absorbante en CF	59
Figure III.14	La variation temporelle de la température simulée du fluide à la sortie en CF	60
Figure III.15	La variation temporelle de la température simulée de la vitre en CF	61
Figure III.16	La variation temporelle de la température simulée des différents composants du capteur solaire à air en CF	61
Figure III.17	La variation temporelle de la puissance utile simulée en CF	62
Figure III.18	La variation instantané du rendement thermique en CF	63
Figure III.19	Variation temporelle des températures de la plaque sans et avec MCP	64
Figure III.20	La variation temporelle de la température du MCP et fluide sortant sans et avec MCP	66
Figure III.21	La variation temporelle de la chaleur latente à la sortie du sans et avec MCP	67
Figure III.22	La variation temporelle de la température du MCP et de la plaque de l'absorbeur sans et avec MCP	68
Figure III.23	La variation temporelle de la température du fluide sortant sans et avec MCP et T mcp	69
Figure III.24	La variation temporelle de la chaleur latente à la sortie du sans et avec MCP	70
Figure IV.1	Capteur solaire à air étudié sans MCP	72
Figure IV.2	L'acquisition des données	73
Figure IV.3	Le Pyranomètre mesurant le rayonnement solaire	73
Figure IV.4	l'anémomètre mesurant la vitesse du vent et la température ambiante	73
Figure IV.5	la variation temporelle des températures expérimentales en CN	74
Figure IV.6	La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CN	74
Figure IV.7	Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CN	75
Figure IV.8	Comparaison entre température du fluide sortant simulée et expérimentale en CN	76
Figure IV.9	Comparaison entre la température de la plaque absorbante simulée et expérimentale en CN	76

Figure IV.10	Comparaison entre la puissance utile simulée et expérimentale en CN	77
Figure IV.11	Le ventilateur utilisé dans capteur solaire en CF	77
Figure IV.12	la variation temporelle des températures expérimentales en CF	78
Figure IV.13	La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CF	78
Figure IV.14	l'allure de l'évolution instantané des températures	79
Figure IV.15	Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CF	80
Figure IV.16	Comparaison entre la température du fluide sortant simulée et expérimentale en CF	80
Figure IV.17	Comparaison entre le rendement simulé et expérimental en CF	81

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau II.1	Caractéristiques de quelques MCP inorganiques	31
Tableau II.2	Propriétés thermiques de certains MCP	33
Tableau II.3	Avantages et inconvénients des MCP	33
Tableau III.1	Propriétés thermo-physiques des différents composants d'un capteur	42

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unité
M_s	Masse sèche du produit	Kg
M_e	Masse humide du produit	Kg
M_a	Masse du gaz	Kg
H_r	Humidité relative de l'air	%
H_a	Humidité absolue	$kg_{eau}/kg_{air\ sec}$
P_s	Pression de saturation	Pascal
P_a	Pression partielle de l'air sec	Pascal
Ψ	Degré de saturation	%
R	Constante des gaz parfaits	J/k.mol
ϕ	Flux de chaleur	W
λ_c	Conductivité thermique	en w/m.k
h_c	Coefficient de transmission par convection	W/m ² .K
T_p	Température la plus chaude (paroi)	K
T_∞	Température la plus froide	K
q_r	La quantité d'énergie rayonnée	W
J	flux molaire de l'espèce due à la diffusion	mol/s.m ²
C_m	concentration molaire en de l'espèce	mol/m ³
X	fraction molaire de l'espèce	-
P	masse volumique de l'espèce	kg/m ³
D_f	coefficient de La diffusion	m ² /s
Mv	La masse d'eau évaporée	Kg
Ms	La masse de produit sec	Kg
dX	L'humidité de produit	%
φ_a	Flux solaire absorbé du rayonnement solaire en	W/m ²
φ_p	Flux perdu par la paroi absorbante	W/m ²
φ_u	Flux utile transmis au fluide caloporteur	W/m ²
φ_{st}	Flux stocké dans le capteur	w/m ²
M_f	Masse en air du capteur	w/m ²
τ_v	Coefficient de transmission de la couverture transparente	%
α_A	Coefficient d'absorption de l'absorbeur en%	%
S	Surface de la paroi absorbante en m ²	m ²
E	Eclairement ou densité de flux au niveau du capteur	W/m ²
\dot{m}	Débit massique du fluide caloporteur	Kg/s.m ²
$\frac{1}{h_r}$	Résistance thermique par rayonnement du capteur	Ω
$\frac{1}{h_c}$	Résistance thermique par convection du capteur	Ω

$\frac{1}{h_d}$	Résistance thermique par conduction du capteur	Ω
$h_{r,c-v}$	Coefficient d'échange par rayonnement	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
ε_v	Emissivité de la couche du verre	$w/m^2 \cdot ^\circ C$
σ	constante de Stefan-Boltzmann	$w/m^2 k^4$
ε_p	L'émissivités de la couche de la plaque absorbante	%
ε_v	L'émissivités de la couche de la plaque absorbante	%
λ_i	Conductivité thermique du composant i	$W/m \cdot c$
e_i	L'épaisseur du composant i	M
h_c	Coefficient d'échange par convection	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
D	plus petite dimension géométrique du problème en m	M
λ_f	Conductivité thermique du fluide	$W/m \cdot ^\circ C$
ρ_f	masse volumique du fluide en	kg/m^3
L	Longueur du capteur	M
G	Rayonnement solaire global incident	w/m^2
$Q_{stock \acute{e}e}$	La chaleur sensible	J
M	La masse du matériau de stockage	Kg
ΔT	La différence entre température finale et initiale	$^\circ C$
L_f	Chaleur latente de changement d'état du matériau	J/kg
c_{pf}	chaleur spécifique du fluide caloporteur	$J/kg \cdot ^\circ C$
T_{fe}	Température du fluide entré	$^\circ C$
T_{fs}	Température du fluide sortie	$^\circ C$
T_{pm}	Température moyenne de la paroi absorbante	$^\circ C$
λ	Conductivité thermique	$w/m \cdot k$
U_v	Vitesse du vent	m/s
C_p	Chaleur spécifique	$J/kg \cdot k$
L_s	Chaleur latente de fusion	J/kg
Q	Quantité de la chaleur	J
α_A	Coefficient d'absorption de l'absorbant	%
τ_v	Coefficient de transmission de la vitre	%
h_c	Coefficient d'échange convective	$W/m^2 \cdot k$
S	Surface de la paroi solide	m^2
η	Rendement instantané du capteur plan	%
P_r	Nombre de Reynolds	-
N_u	Nombre de Nusselt	-
P_r	Nombre de Prandtl	-
G_r	Nombre de Graetz	-
T_v	Température de la vitre	$^\circ C$
T_p	Température de la plaque absorbante	$^\circ C$
CN	Convection naturelle	-
CF	Convection forcée	-

MCP	Matériau à changement de phase	Kg
T_{pmc}	Température de matériau à changement de phase	°C

ملخص

يرتبط تشغيل المجفف الشمسي بقوة الأداء السليم للاقط الشمسي، و هو الجزء الأكثر أهمية لتوفير الحرارة اللازمة، انطلاقا من تحويل الإشعاع الشمسي الوارد إلى حرارة، حيث يبقى تشغيل هذا التركيب في فترة الليل و أثناء غياب الشمس مصدر قلق لكثير من المؤلفين و الباحثين. من بين الحلول المقترحة: استخدام مواد تغيير الحالة، و التي هي محور عملنا.

حيث قمنا بمحاكاة عمل اللاقط الشمسي، وتجربته عمليا، ومقارنة النتائج في حالتها: التحويل الحراري الطبيعي و القسري، و التي كانت جد متقاربة بين نتائج المحاكاة و النتائج التجريبية في كل حالة. ثم قمنا بإضافة مادة تغيير الحالة على شكل فراش تحت الصفيحة الماصة بكتلة 7 كغ و درجة ذوبان 56 درجة مئوية في النموذج قيد الدراسة، النتائج المتحصل عليها كانت جد مشجعة خاصة في مجال التجفيف الشمسي حيث سمحت بثبوت درجة الحرارة في حوالي 50 درجة مئوية و إطالة مدة العمل بحوالي 3 ساعات بعد غياب الشمس.

كلمات مفتاحية: التجفيف الشمسي، لاقط شمسي هوائي، مواد تغيير الحالة، مردودية حرارية، محاكاة.

Résumé

Le fonctionnement du séchoir solaire est fortement lié au bon fonctionnement du capteur solaire, qui est la partie la plus importante, en fournissant la chaleur nécessaire, en transformant le rayonnement solaire reçu en chaleur, reste le fonctionnement de ces systèmes dans la nuit ou en absence du soleil, un souci pour plusieurs auteurs et chercheurs. Parmi les solutions proposées: l'utilisation des matériaux à changement de phase, qui fait l'objet de notre travail. On a simulé le fonctionnement du capteur solaire et le tester expérimentalement, les résultats de simulation dans les deux cas: convection naturelle ou convection forcée, sont comparés aux résultats expérimentaux, chacun à part. Puis on a ajouté un MCP sous forme d'un lit au dessous de la plaque absorbante, avec une masse de 7 kg et une T_f de 56°C. Les résultats obtenus sont très encourageants, notamment dans le domaine de séchage solaire, car le MCP permet de maintien de la température de fonctionnement à environ 50°C et la prolongation de fonctionnement du système à 3h après le coucher du soleil.

Mots clés: Séchage solaire, capteur solaire à air, matériaux à changement de phase, rendement thermique, simulation.

Abstract

The operation of the solar dryer is strongly related to the sound performance of the solar modules, which is the most important part of the heat supply, from the conversion of solar radiation into heat. The operation of this structure at night and during the absence of the sun remains a concern for many authors and researchers. Among the proposed solutions: Use of change of case materials, which are the focus of our work. We compared the results in two cases: natural and exponential thermal transfer, which was very similar between simulation results and experimental results in each case.

Then, by adding the phase change material in the form of a bed under the absorbent plate with a mass of 7 kg and a melting point of 56 °C in the model under study, the results obtained were very encouraging especially in the field of solar drying where it allowed the temperature to be stabilized in about 50 °C and 3 hours after the absence of the sun.

Keywords: Solar drying, flat plat Solar collector, Materials of phase change, Thermal efficiency, Simulation.

Introduction Générale

Introduction Générale

Le soleil est une source fondamentale aux plusieurs énergies secondaire ,et L'énergie solaire peut convertir à chaleur, destiné au séchage des fruits et légumes à l'aide des capteurs solaires à air ; malgré que l'énergie solaire est disponible presque à toute la journée, gratuite et renouvelable et non polluante ; mais Le problème est le rendement du séchoir solaire reste toujours très faible surtout dans la période nocturne (disfonctionnement total) à cause du coucher du soleil et cela entraîne une diminution de la quantité de chaleur nécessaire pour le fonctionnement d'un séchoir solaire.

L'objectif de cette étude est l'amélioration des performances thermiques du capteur solaire à air et aussi de prolonger la durée de fonctionnement du système étudié. Notre contribution se compose de deux parties:

1^{ère} partie : l'utilisation des formes de chicanes de type carré.

2^{ème} partie : l'utilisation d'un MCP mis dans ces chicanes de type carré. Il s'agit d'utiliser la chaleur latente stockée pendant la journée.

Ce travail a été effectué dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URMER) d'ADRAR chez l'équipe de séchage solaire: en simulant le fonctionnement un capteur solaire ,réalisant du capteur solaire à air: simple, à chicanes sans ou avec MCP. Alors notre mémoire est structuré comme suit :

Le 1^{er} chapitre : est consacré à la recherche bibliographique sur le séchage solaire et ses modes.

Le 2^{ème} chapitre : aussi une présentation bibliographique sur les capteurs solaires et leurs principaux types, particulièrement, le capteur solaire à air à chicanes et avec MCP; et généralités sur les Matériaux à changement de phase.

Le 3^{ème} chapitre : montre les équations mathématiques et le bilan thermique utilisé pour la simulation du capteur solaire à air, les outils utilisés, les différents capteurs solaires étudiés; dernièrement les résultats obtenus : de simulation et de l'expérimental seront exposés ; Puis des commentaires, la validation, et la discussion des résultats résumant le chapitre.

En fin, une conclusion générale résume les principaux résultats et les perspectives pour ce travail.

Chapitre I : Généralités sur le Séchage Solaire

I.1. Introduction

Le séchage par le rayonnement solaire comme une source de chaleur, dont le procédé est effectué dans une chambre bien isolée thermiquement pour assurer l'opération de séchage. Le but de l'opération de séchage est l'évaporation de l'eau qui se trouve à l'intérieur du produit, cette opération est assurée par plusieurs méthodes par exemple : l'exposition au soleil, le stockage dans un endroit sec, également par l'utilisation de l'air chauffé. Le séchage solaire dans les régions à fort ensoleillement est très utile d'un point de vue économique. Cette opération de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des produits agro-alimentaires, qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage, constitue un moyen rentable pour la déshydratation de ces produits.[1]

I.2. Généralités sur le séchage solaire

I.2.1. Définition du séchage solaire

Le séchage solaire est l'opération qui élimine par évaporation de l'eau d'un corps humide (agricole). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. 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. La séparation de l'eau est obtenue par méthode mécanique ou thermique.[2]

I.2.2. Propriétés de l'air de séchage

Le mode de séchage le plus répandu dans l'industrie chimique est le séchage par convection; il consiste à faire agir sur la matière à sécher un courant de gaz ou d'air (de faible humidité) et chaud qui vaporise l'humidité du solide et entraîne la vapeur en se transformant en un gaz ou air humide refroidi. Le mélange air sec et vapeur d'eau constituent l'air humide. Nous définissons ci-après les importantes grandeurs caractérisant l'air humide.[2]

I.2.2.1. Humidité absolue

L'humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité est l'humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, noté par H_a est donnée par la relation suivante :

$$H_a = \frac{m_e}{m_s} \quad (I.1)$$

I.2.2.2. Humidité relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.[2]

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{I.2})$$

➤ **A la saturation**

Soit H_a la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et H_{a_s} la valeur de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport :

$$H_a = 0.622 \left[\frac{P_s}{P_{\text{atm}} - P_s} \right] \quad (\text{I.3})$$

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{I.4})$$

➤ **Les deux grandeurs sont liées par les relations [5] :**

$$H_a = \frac{H_r}{1 - H_r} \quad (\text{II.5})$$

$$H_r = \frac{H_a}{1 + H_a} \quad (\text{I.6})$$

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{a_s}} \quad (\text{I.7})$$

I.2.2.3. Températures caractéristiques de l'air humide

I.2.2.3.1. Température sèche «Température de bulbe sec »

La température de bulbe sec T_S est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec, ledit thermomètre étant placé dans l'air.[2]

I.2.2.3.2. Température humide «Température de bulbe humide »

C'est La température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air, dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation est prélevée de l'air. De façon pratique c'est la T indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton hydrophile humidifié, ce thermomètre est placé dans un flux d'air relativement rapide.[2]

I.2.2.3.3. Température de rosé (Point de rosée)

la Température de rosé T_r est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation. Cette température T_r est tel que

$$T_r = \frac{23748(\ln H_r * P_s - 6.41)}{23.69 - \ln H_r * P_s} \quad (I.8)$$

I.2.3. Caractéristiques d'un solide poreux

On appelle milieu poreux un solide de forme compliqué délimitant et englobant des vides appelés pores. Ces vides peuvent communiquer entre eux et contenir une ou plusieurs phases fluides, Dans les conditions naturelles, le volume poreux est généralement occupé par une phase gazeuse (mélange air + vapeur d'eau) et de l'eau liquide. [2] Les caractéristiques du solide sont liées à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermo-physiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraites et donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croustillage, mais aussi bouchage par entraînement de soluté). Il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.[1]

➤ Porosité volumique d'un produit:

La porosité volumique ε (figure I.1) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume des pores}}{\text{volume apparent de produit}}$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc $1 - \varepsilon$

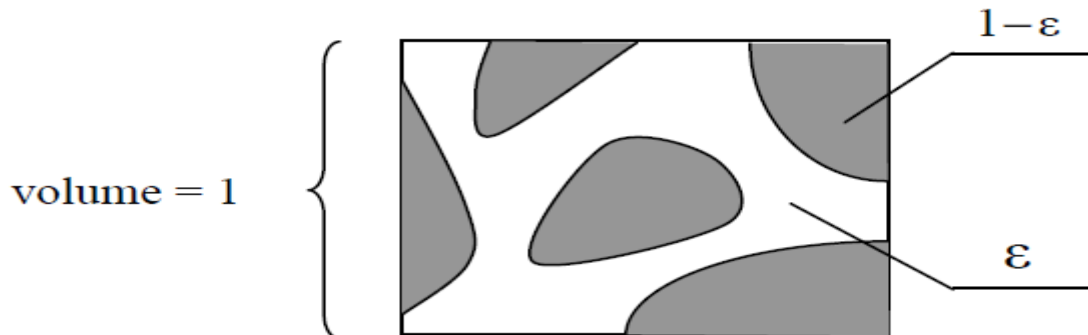


Figure I.1 : Volume de contrôle microscopique [1]

I.2.4. Caractéristiques des solides humides

I.2.4.1. Description du solide humide

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température [5]. L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses. Un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure suivante.[5]

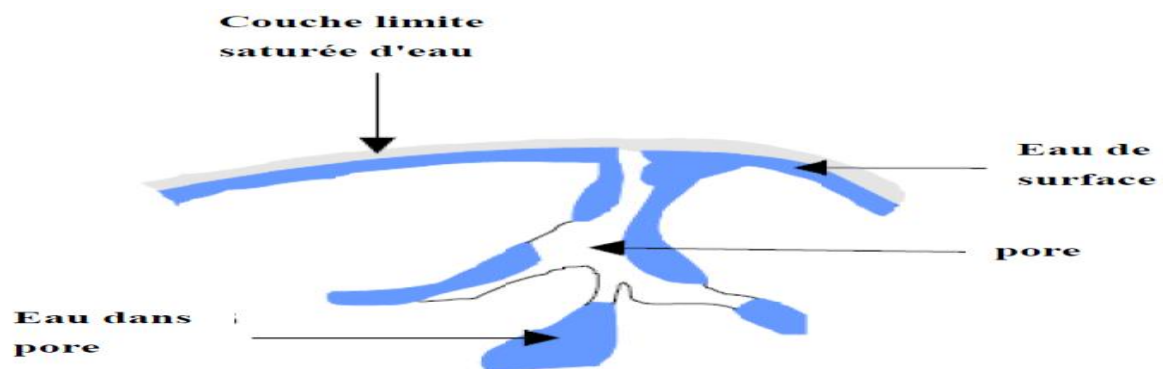


Figure I.2 : Description du solide humide [5]

I.2.4.2. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche) :

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau ou humidité à base sèche s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.[2]

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I.9})$$

I.2.4.3. Humidité relative (teneur en eau à base sèche) :

L'humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.[2]

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{I.10})$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations [5] :

$$X = \frac{X_r}{1 - X_r} \quad (\text{I.11})$$

$$X_r = \frac{X}{1 + X} \quad (\text{I.12})$$

I.2.4.4. Répartition de l'eau dans le matériau

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états (figure I.3) ,eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau. L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire; la quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (ϵ).L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle aussi liée à la taille des pores qui indique la proportion eau liée/eau libre dans le matériau (un produit constitué de "petits pores " aura, à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de "gros pores". La vapeur d'eau mélangée à l'air sec (mélange parfait) occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.

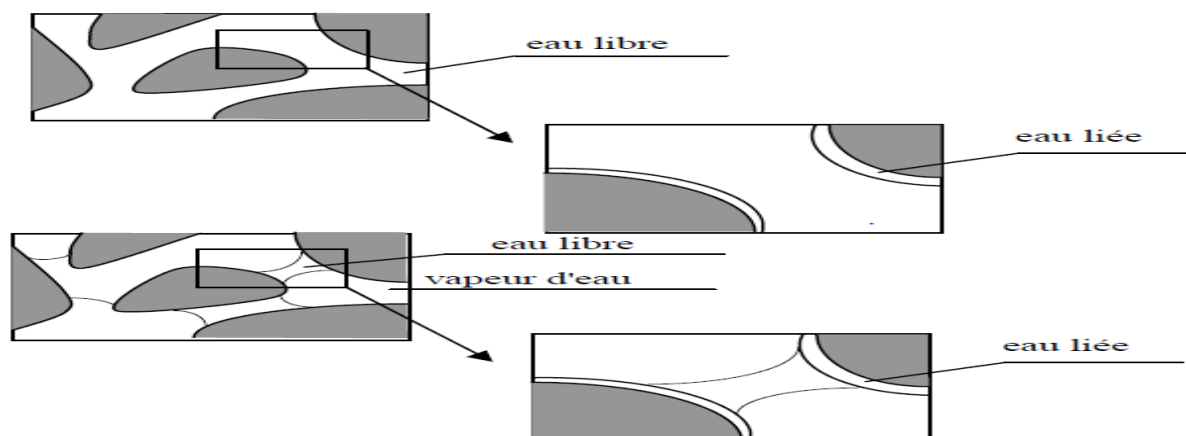


Figure I.3 : Les différents types d'eau dans le matériau.[1]

I.3. Mesure de l'humidité

I.3.1. Hygromètre à cheveux

parfois appelé humidimètre permet de mesurer l'humidité relative HR de l'air. Son principe repose sur le fait que la variation de longueur d'un cheveu dépend de l'humidité de l'air ; il est peu fiable étant donné qu'il est aussi fortement sensible à la température. Cependant, on peut corriger ce problème en intégrant un système de bilame qui compense la température. On obtient alors une précision de $\pm 7\%$ dans une gamme de 10 % à 90 % d'humidité relative.[4]



Figure I.4 : Hygromètre à cheveux.[22]

I.3.2. Thermo-hygrographe

Un thermo-hygrographe est un instrument qui mesure simultanément la température et l'humidité relative de l'air ambiant en fonction du temps et les enregistre sous forme de

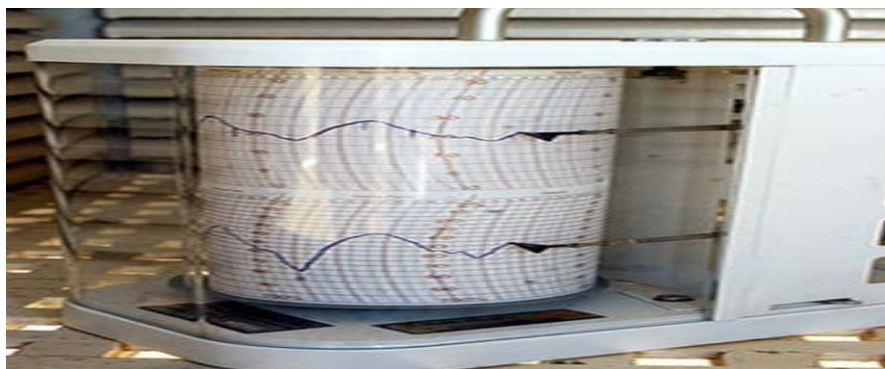


Figure I.5 : Thermo-hygrographe.[22]

I.4. Modes de séchage

On peut distinguer divers procédés de séchage

- Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression).[5]
- Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur et de la phase gazeuse.[5]
- Les procédés chimiques, par l'utilisation des produits déshydratants (acide sulfurique H_2SO_4), acide phosphorique (H_3PO_4); Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, Il existe dans la pratique 3 types de séchage:

I.4.1. Séchage par conduction

Dans ce mode de séchage, L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. La conduction est la transmission de la chaleur dans le matériel par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement .[5]

➤ **Loi de Fourier:**

$$P = -\lambda. S. \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{I.13})$$

I.4.2. Séchage par convection

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur.[5] Lorsque se produit au sein du fluide des courants dû simplement aux différences des gradients de

température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une action mécanique (pompe, ventilateur, etc...), la convection est dite forcée [6]. Le transfert par convection est régi par la loi de Newton ; Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivant[6] :

$$P = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad (\text{I.14})$$

I.4.3. Séchage par rayonnement

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.[5]

➤ **Loi de Stefan –Boltzmann[6]**

$$Q_r = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{I.15})$$

I.5. Transfert de la masse

La diffusion est le mécanisme de transport de la matière sous l'effet d'un gradient de concentration, de plus les zones concentrées en matière vers les zones moins concentrées.

➤ **Loi de Fick**

La loi de Fick caractérise la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique ρ_f dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique.[6], Le paramètre pertinent du milieu est D_f le coefficient de diffusion moléculaire :

$$J = - \rho_f D_f \frac{dC_m}{dx} \quad (\text{II.16})$$

I.6. Choix du procédé de séchage

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné sont basés sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certain facteur [5] :

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.

- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...).[5]

I.7. Processus de séchage

Le séchage solaire utilise généralement air chaud en écoulement autour du corps à sécher. Ce courant gazeux assure à la fois l'apport de chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et l'enlèvement de la vapeur produite. Entre l'entrée et la sortie du séchoir, le gaz se refroidit en même temps qu'il se charge d'humidité. Dans le cas du solide, on observe une diminution progressive de sa teneur en eau et une augmentation de sa température au cours du séchage [5].

I.8. Vitesse de séchage

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface d'évaporation du matériau. La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur. L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors[5] :

$$R = \frac{-dM_v}{S \cdot dt} = \frac{M_s \cdot dX}{S \cdot dt} \quad (\text{I.17})$$

$$M_v = M_s \cdot dX \quad (\text{I.18})$$

$$dX = X_e - X_s \quad (\text{I.19})$$

I.9. Cinétique du séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps. Tous les travaux de séchage montrent que les courbes de la vitesse de séchage en

fonction du temps se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale.[5], on remarque que l'allure de séchage décompose en trois périodes principales:

- phase 1: Période transitoire.
- phase 2 : Période à vitesse de séchage constante.
- Phase 3: Période à vitesse de séchage décroissante.[5]

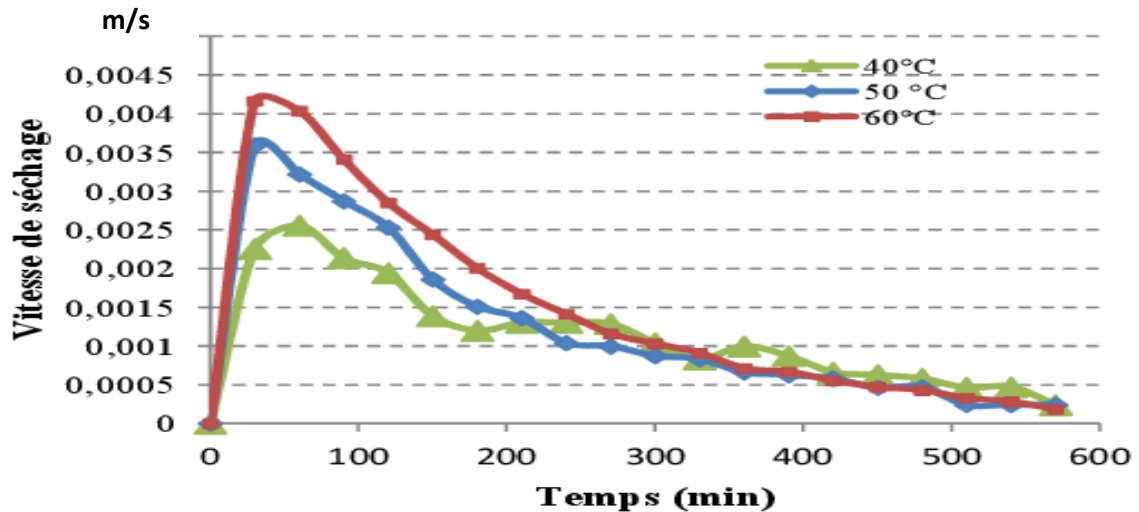


Figure I.6: L'allure de séchage en fonction du temps [4]

I.10. Types de séchoirs solaires

Il existe plusieurs critères pour classer les séchoirs solaires, parmi les plus importants on cite

le séchage direct et le séchage indirect, séchoirs mixtes, séchoirs hybrides.[3]

I.10.1. Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simple ; Ils sont conçus de façon à laisser pénétrer le rayonnement solaire directement dans l'armoire de séchage où il est converti en chaleur par le produit à sécher lui-même et les diverses parois qu'il rencontre. Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement, ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles.[5]

➤ Avantages

- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.[5]

➤ Inconvénients

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et

C, flétrissement, décoloration [5].

- Les produits ne sont pas mieux protégés de l'attaque des poussières, des insectes, des animaux et la pluie.



Figure I.7: Séchoirs solaires directs simples [4]

I.10.2. Les séchoirs solaires indirects

Ce type des séchoirs est souvent plus compliqué que le séchoir direct. Il 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 pénètre dans le collecteur; il est chauffé sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [2].Ce type des séchoirs peut être réalisé à des échelles diverses et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire[5].

➤ Avantages

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des poussières, des insectes, des animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Le produit est protégé contre radiation du soleil directe.
- Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (les vitamines A et C).

➤ Inconvénients

- Rapidité de séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- plus compliqué à réaliser.



Figure I.8: séchoir solaire de type indirect [4]

➤ Chambre du séchoir solaire indirect

La chambre de séchage est une boîte en bois de forme cubique dont la quelle existe les produit agro-alimentaire. Elle est isolée thermiquement avec de la laine de verre sur les parois latérales et sur la toiture et les volets servant d'ouverture .En outre elle est munie d'une cheminée cylindrique sur le toit, ainsi que d'une ouverture sur sa base pour l'admission de l'air chaud provenant du capteur.les quatre faces latérales ont une surface de 1 m² chacune.[10] ; Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles généralement de tôles galvanisés, de bois et de polystyrène...etc. Pour réaliser un séchoir indirect, il faut couplée le capteur solaire à air avec une enceinte bien calorifugée.[3]



Figure I.9: Chambre du séchoir solaire indirect[22]

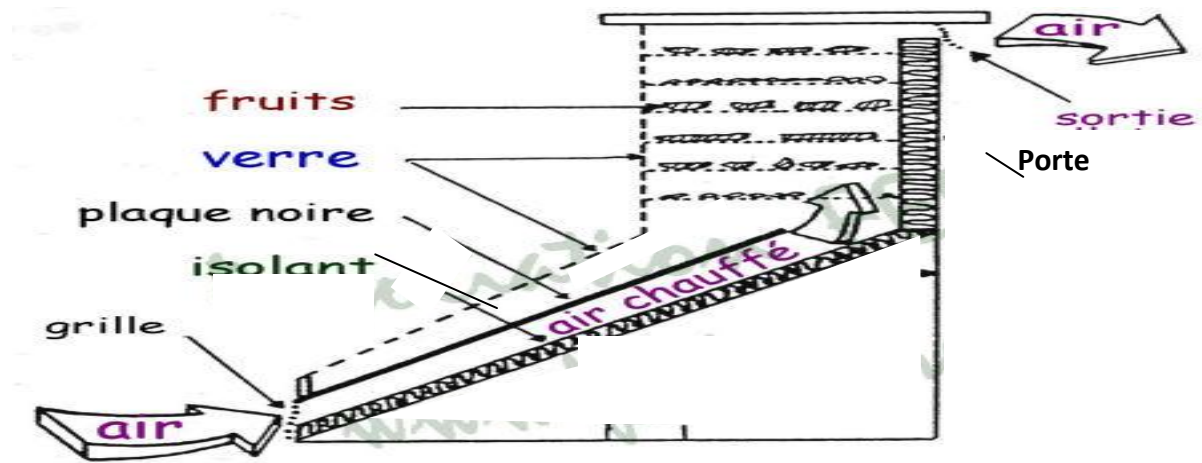


Figure I.10: Schéma descriptif du séchoir solaire indirect [4]

I.10.3. Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs [5].



Figure I.11: Séchoir solaire mixte

I.10.4. Les séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

-Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet tout simplement de préchauffer l'air.[5]

➤ Avantages

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage [5].
- Forte augmentation de la production par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.[5]

➤ Inconvénients

- Coût de production et d'investissement élevé.

- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.
- Personnel qualifié pour la maintenance.[5]



Figure I.12: Séchoir solaire hybride.[4]

❖ **Régime d'écoulement :**

On distingue deux types de régime d'écoulement :

➤ **Régime laminaire :**

L'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes. Entre deux filets fluides adjacents.

➤ **Régime turbulent :**

L'écoulement n'est plus permanent. Il est toujours possible de définir des lignes de courant moyennes à partir du champ des vitesses moyennes.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les différentes notions de base et définition du séchage solaire et ces outils complémentaires, Donc on conclut que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental.

**Chapitre II : Les Capteurs solaires et Les Matériaux à
Changement de Phase**

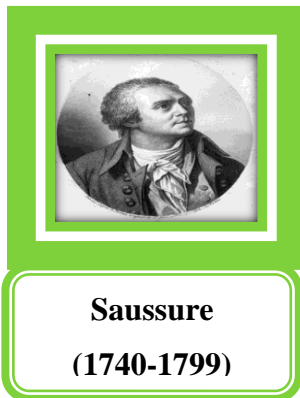
II.1. Introduction

L'énergie solaire thermique est la première source d'utilisation du soleil[5], en utilisant des capteurs solaires qui se distinguent par :

- Généralement pas de dispositif de concentration.
- Fonctionnement à basse température.
- Pas de cycle thermodynamique complexe.
- Unité de petite taille l'usage direct de la chaleur.[7]

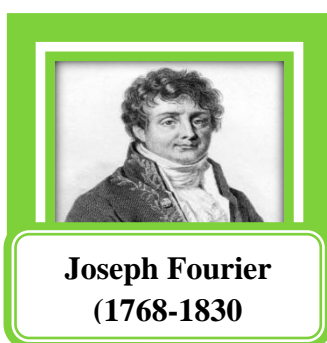
Le capteur solaire est un des principaux composants d'un séchoir solaire ,donc l'amélioration des performances thermiques du capteur sert directement à minimiser la durée et le coût des opérations de séchage solaire.[10]

II.2. Etat de l'art-travaux scientifiques des capteurs Solaires thermiques



Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) :

Ce physicien suisse est considéré comme l'inventeur de la « boîte chaude » en 1767 .Il s'intéressa à l'effet de serre au moyen de vitrages superposés et de ce fait son invention est considérée, à juste titre d'ailleurs, comme le précurseur du capteur solaire plan. Nous aurons l'occasion de lui rendre hommage plus loin, notre réalisation n'étant qu'une version améliorée de sa « boîte chaude ».[4]



Joseph Fourier (1768-1830) :

Mathématicien et physicien français Il aborde la notion de chaleur obscure que nous dénommons de nos jours sous le terme d'ondes infrarouges. Il décrit parfaitement le fonctionnement du capteur plan décrit dans cet ouvrage et précise le rôle du vitrage dans la création de l'effet de serre et la capture des calories solaires.[5]

Parmi les travaux scientifiques portant sur la caractérisation et l'étude des performances des capteurs solaires, on peut citer les travaux suivants :

En 1942 : la théorie des capteurs, établis par HOTTEL et WOERTZ ,Depuis, d'autres d'étude ont été faites notamment celle portant sur la modélisation relative à différences configurations de capteurs solaire thermique.

En 1986 : M. MERZOUK, au centre d'études nucléaires et solaires étudie la contribution à la détermination des performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires sous vide en régime permanent. On peut citer aussi l'étude effectuée, la même année par N. KASBADJI, au CNR de Padoue en Italie, qui porte sur l'étude théorique et expérimentale de trois capteurs solaires en régime permanent.[11]

En 1990 : SEMMAR. D contribue à l'étude et la conception d'un capteur solaire à air pour la production d'air chaud au sein du CDER. Il définit un certain nombre de règles et de critères pour les systèmes utilisant l'air comme fluide caloporteur.[11]

En 2001 : D.LAFRI étudie dans le cadre d'un magister les performances d'un chauffe –eau solaire pour prévoir le comportement thermique de l'eau dans la cuve de stockage. Il conclue qu'avec une capacité de stockage élevée, le rendement des systèmes solaire croit.[11]

En 2014: Vincent Qinglong invente nouvelle génération de capteur plan à concentration.[11]

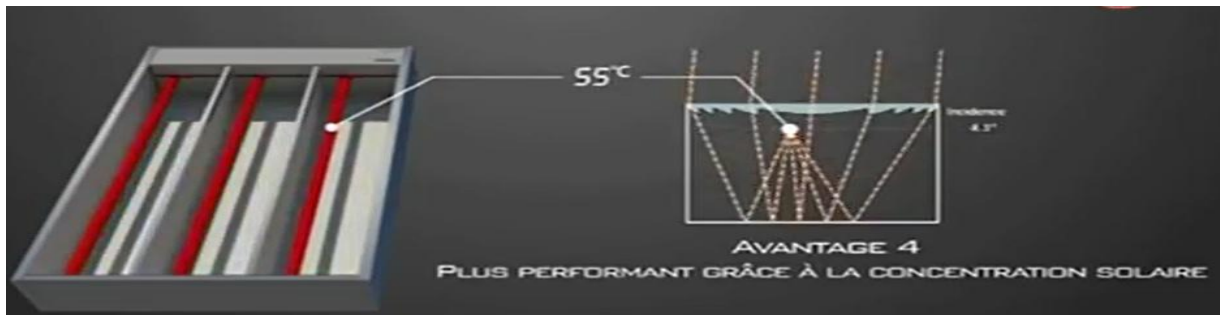


Figure II.1: capteur thermique à concentration.[20]

II.3. Les Capteurs Solaires Thermiques

Le rôle d'un capteur solaire thermique (figure II.2) est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...).

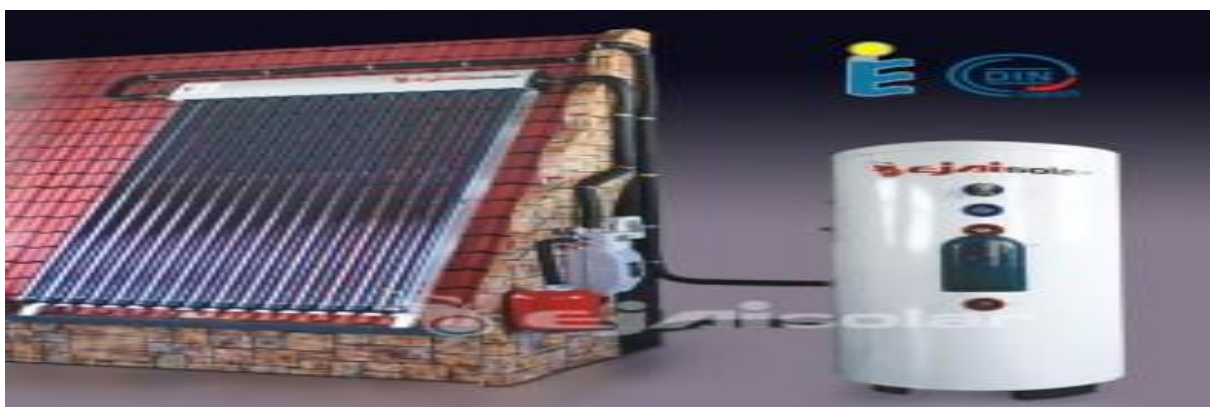


Figure II.2.Capteur solaire thermique.[4]

II.3.1. Principaux types de capteurs solaires thermiques

Un certain nombre de détails différencient les capteurs les uns des autres, principalement, la structure, la surface des absorbeurs, les circuits hydrauliques et la perte de charge, le vitrage.[2] on peut citer :

II.3.1.1. Le capteur à tube sous vide

Un capteur solaire "sous vide" (figure II.3) est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Ces capteurs peuvent atteindre des températures élevées.[2]



Figure II.3 : Capteur à tube sous vide.[8]

II.3.1.2. Le capteur cylindro-parabolique

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (figure II.4).[2]



Figure II.4 : Système à réflecteur cylindro-parabolique[8]

II.3.1.3. Le capteur parabolique

Il utilise un réflecteur en forme de parabole de révolution.[8]



Figure II.5 : Capteur parabolique.[5]

II.3.1.4. Capteurs non-vitrés

Ces capteurs métalliques (figure II.6) sont indiqués pour de l'eau dépassant de 10 à 40 °C la température extérieure. L'utilisation des capteurs non vitrés se limite aux applications nécessitant des températures basses.[2]



Figure II.6 : Capteur solaire sans-vitrage.[8]

II.3.1.5. Le capteur solaire à air

Un capteur à air (figure. II.7) est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est l'air, Il est constitué d'une surface de couleur foncée absorbant la chaleur et d'une surface transparente.[2]

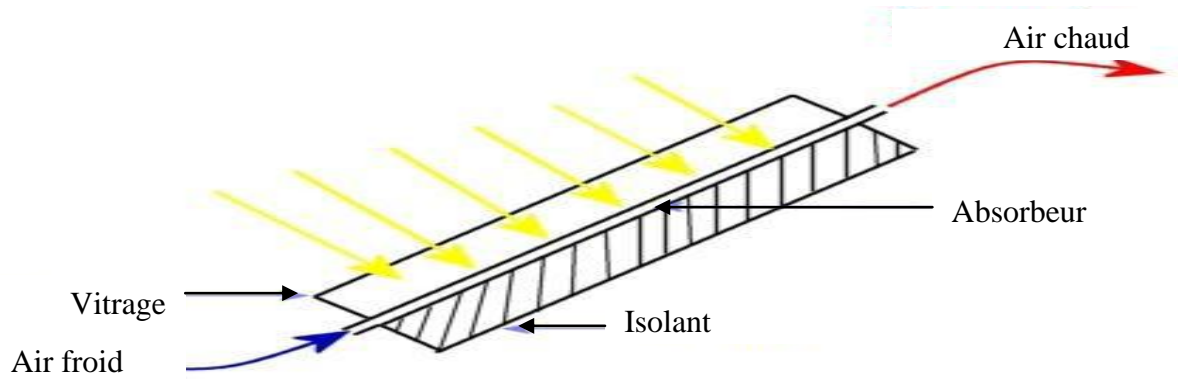


Figure. II.7 : capteur solaire à air.[7]

II.3.1.5.1. Composants des capteur solaires à air

II.3.1.5.1.1. La couverture transparente

L'intérêt d'une couverture transparente (verre) habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ que on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement.[8]

II.3.1.5.1.2. L'absorbeur

plaque plane en métal (cuivre ou acier), Il a pour absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes, il doit être douée d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible.[8]

II.3.1.5.1.3. Le fluide caloporteur

L'air pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante.[8]

II.3.1.5.1.4. L'isolant thermique

une ou plusieurs couches isolant (la laine de verre, polystyrène), pour limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur.[8]

II.3.1.5.1.5. Le cadre

Le cadre doit résister aux agressions des conditions extérieures, aux contraintes intérieures et aux chocs éventuels lors du transport et du montage. Il doit donc être solide, tout en étant le plus léger possible. Le cadre du capteur est en aluminium ou en acier. Le cadre des capteurs

intégrés en toiture est protégé des intempéries et peut ainsi être valablement réalisé en bois.[14]

III.3.1.5.2. Effet des obstacles sur les échanges convectifs

III.3.1.5.2.1. Influence des chicanes sur la performance d'un capteur solaire à air

L'introduction d'obstacles dans la veine d'air dynamique nécessite un choix judicieux du mode de fixation, il est possible qu'ils soient fixés sur l'isolant ou sous l'absorbeur, ou les combinaisons ensemble. Dans tous les cas les performances thermiques sont nettement améliorées, du fait que la surface d'échange totale mise en jeu se trouve augmentée et la section de passage offerte devant le passage du fluide qui est par conséquent réduite.[12]



Figure II.8 : Capteur à air avec les obstacles (chicanes longitudinales).[4]

II.3.1.5.3. Les applications des capteurs solaires plans à air

- Chauffages et climatisation des habitations
- Le séchage des récoltes.[9]

➤ Courbe de rendement des capteurs plans

La figure suivante présente les variations du rendement instantané en fonction de la température réduite $T = \frac{T_m - T_{ext}}{p}$ pour plusieurs types de capteurs.

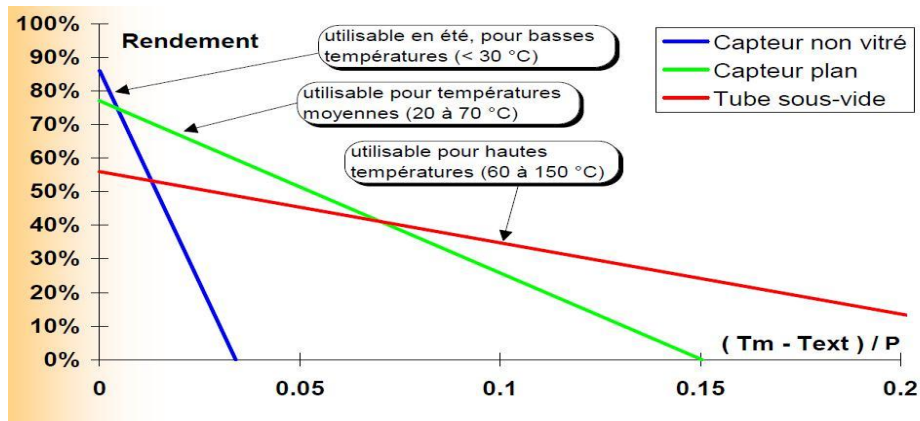


Figure II.9 : Rendement des différents types de capteurs selon l'écart de température($^{\circ}\text{C}$).[5]

Les courbes de rendement des capteurs montrent que pour un ensoleillement constant, les performances des capteurs baissent lorsque l'on demande au capteur de fonctionner à une température éloignée de la température extérieure. Ceci est dû tout simplement aux déperditions thermiques qui augmentent avec la température (de manière linéaire pour les phénomènes de convection et conduction). Il faut donc, pour tirer meilleur parti des capteurs, utiliser une technologie qui correspond le mieux aux niveaux de températures auxquels on veut travailler. Le capteur plan aura un rendement 75% supérieur à un capteur sous vide (55%) par contre il sera moins performant qu'un capteur non vitré(95%).[11]

II.4. Stockage de l'énergie thermique

le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie. Essentiellement trois modes de stockage solaire thermique peuvent être envisagés représenté sur la figure (II.10) .[14]

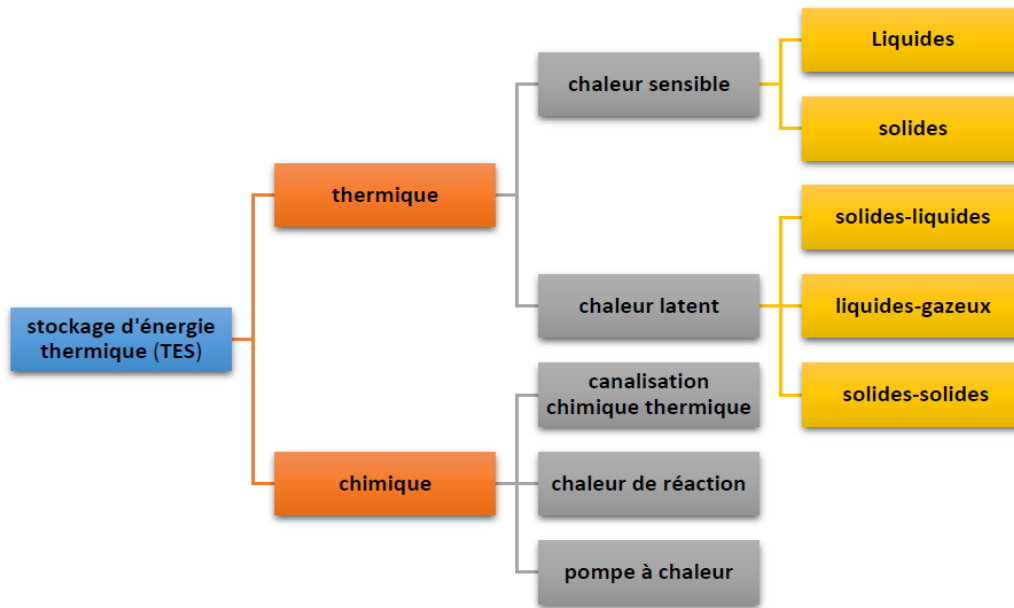


Figure II. 10 : Différents types de stockage thermique de l'énergie solaire.[10]

II.4.1. Stockage par chaleur sensible

l'énergie est emmagasinée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage au sein d'un système fermé au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur.[10], L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique donné par l'équation (II.1)

$$Q_{\text{stockée}} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{II.1})$$

La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle à la masse, à la capacité calorifique et à la différence de températures entre l'entrée et la sortie du matériau de stockage. Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories: les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc. De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du Bâtiment.[12]

II.4.2. Stockage Thermochimique

le stockage thermochimique qui exploite la chaleur de sorption mise en oeuvre dans des processus physico-chimiques renversables d'absorption exothermique et de désorption endothermique d'un gaz sur un milieu absorbant. L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le

stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles. Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente.[10]

II.4.3. Stockage par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce à la Transformation d'état d'un matériau de stockage (solide-liquide). La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes, Par exemple dans le cas de l'eau, 80 fois plus d'énergie est nécessaire pour faire fondre 1 kg de glace pour élever la température de 1 kg d'eau de 1 ° C.[12] La quantité d'énergie thermique stockée via le changement d'état s'exprime par la relation suivante :

$$Q_{\text{latente}} = m \cdot L \quad (\text{II.2})$$

II.4.3.1. Matériaux à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux de stockage de chaleur «latente».[12], L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt 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).[8], bonne adaptation avec sous-refroidissement minimum et être chimiquement stable, de faible coût, non toxique et non corrosif.[12] Les MCP doivent avoir une grande chaleur latente et une conductivité thermique élevée et une température de fusion comprise entre pratique de l'exploitation, par exemple les sels hydratés, les cires de paraffine, les acides gras et les eutectiques de composés organiques et non organiques. [10]



Figure II.11: Matériaux à changement de phase $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [11]

II.4.3.1.1. Propriétés des matériaux à changement de phase (MCP)

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.[8] 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.[10]

II.4.3.1.1.1. 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 faciliter la charge et la décharge d'énergie stockée.[10]

II.4.3.1.1.2. 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.[10]

II.4.3.1.1.3. 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.[10]

II.4.3.1.1.4. Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité
- A bon marché.[10]

II.4.3.1.2. Les applications des MCP

➤ Le transport de produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles, par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver. [10]



Figure II.12 : Récipients du sang contient un MCP.[5]



Figure II.13 : Les médicaments et les pommes contiennent un MCP.[17].

II.4.3.1.3. Classification des matériaux à changement de phase (MCP)

On distingue trois grandes familles de MCP; les composés organiques, les composés inorganiques et les mélanges eutectiques. En général, les composés organiques possèdent une capacité volumique de stockage par chaleur latente de 125 à 200 kJ/dm^3 , alors que les composés inorganiques, du fait de leur forte densité, ont une capacité volumique de stockage presque 2 fois supérieure de 250 à 400 kJ/dm^3 , Chacune de ces familles peut être décomposée en sous-groupes, dont les comportements physiques et chimiques très différents influent sur la conception du système de stockage.[10]

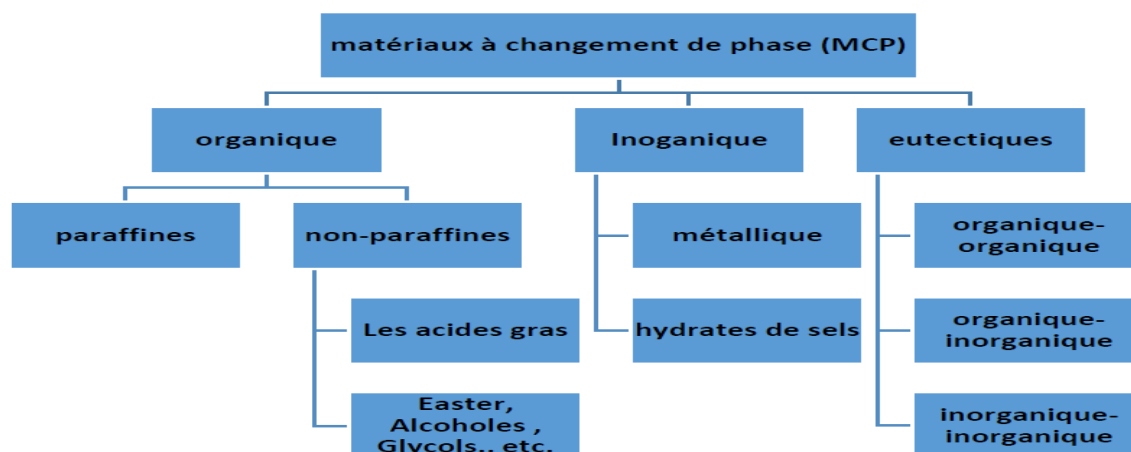


Figure II.14 : Classification des MCP.[10]

Tableau II.1. Caractéristiques de quelques MCP inorganiques[12]

Type de substance	Composé	Température de fusion °C	ΔH_{fusion} KJ/Kg	Conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$	Densité $kg.m^{-3}$
Substances inorganiques	H ₂ O	0	333	0.612 liq. 20°C	998 liq. 20°C 917 sol. 0°C
	CaCl ₂ . 6H ₂ O	29	190.8	0.540 liq. 38.7°C 1.088 sol. 23°C	1562 liq. 32°C 1802 sol. 24°C
	Mg(NO ₃) ₂ . 6H ₂ O	89	162.8	0.490 liq. 95°C 0.611 sol. 37°C	1550 liq. 94°C 1636 sol. 25°C
	MgCl ₂ . 6H ₂ O	117	168.6	0.570 liq. 120°C 0.694 sol. 90°C	1450 liq. 120°C 1569 sol. 20°C

II.4.3.1.3.1. Composés organique

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°C. Les plus utilisés sont paraffinée et non paraffinée des acides gras et des alcools de sucre.[12] Les principaux avantages sont leur stabilité chimique et thermique, ils sont non-corrosive, 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[12].

➤ **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 [12].

➤ **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. [12]

II.4.3.1.3.2. Les composés inorganique

Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C)[8], des mélanges des sels et des métaux. Ce type de matériaux a moins d'avantages que les produits biologiques. Le durable professionnel est qu'ils ont plus à changement de phase enthalpie, mais la corrosion, sous-refroidissement, la phase de ségrégation, le manque de stabilité thermique, et la séparation de phase sont les inconvénients les plus importants [10].

II.4.3.1.3.3. Composés eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs (peuvent être organiques-organiques, inorganiques-inorganique ou inorganique-organique..)[12], ou des éléments chimiques qui a une composition chimique simple et se solidifient à une température de tournesol que toute autre composition obtenue à partir des mêmes composants[10].

Tableau II.2. Propriétés thermiques de certains MCP [14]

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (KJ/Kg)
MCP organiques	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique	21	143
MCP Eutectiques	66.6% $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + 33.3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	25	127
	48% $CaCl_2$ + 4,3% $NaCl$ + 47,3% H_2O	26.8	188
	47% $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + 53% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	30	136

II.4.3.1.4. Etude comparative des composés organiques et inorganiques

Nous allons présenter les avantages et inconvénients des matériaux à changement de phases organique et inorganiques dans le tableau suivant[12] :

Tableau II.3 Avantages et inconvénients des MCP[14]

	Avantages	Inconvénients
MCP Organiques	<ul style="list-style-type: none"> -La surfusion est négligeable. -Systèmes de stockage de chaleur -Pas de ségrégation de phase. -Sont chimiquement stables. -Facilité d'utilisation. -Sobriété écologiques. - Peu sensible aux cycle de fusion et solidification. 	<ul style="list-style-type: none"> -Faible conductivité thermique (0.18-0.25 w/m.k). -Dilatation volumique élevée. -Inflammables.

MCP inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> -Disponibilité. -Grande chaleur de fusion. -Conductivité thermique élevée. -Faible dilatation volumique. -Bon marché. -inflammable. 	<ul style="list-style-type: none"> -La surfusion. -La corrosivité. -Perte d'efficacité liée aux fusion / Solidification. -Déshydrations liée aux cycles thermiques
-----------------------------	--	--

II.4.3.1.5. Différentes formes des matériaux à changement de phase

Il doit 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 tels que la surface de transfert de chaleur ou le coefficient de transfert de chaleur par convection soit élevée entre Pack MCP et le fluide caloporteur. Les récipients de MCP peuvent être sous différentes formes : tube, cylindrique, rectangulaire, que le fluide caloporteur peut circuler autour. [8]

II.4.3.1.5.1. Capsules de diverses géométries

Capsule est un dispositif où les MCP sont enfermés dans des coquilles de petites tailles prenant différentes formes. L'avantage de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange. Macro-encapsulation moyens de remplissage du MCP dans une enceinte macroscopique qui correspond à des quantités allant de quelques millilitres à plusieurs litres. Ce sont souvent des conteneurs et des sacs en plastique ou en métal, comme le montre quelques exemples de la (figure II.14) L'avantage de la macro-encapsulation est que la possibilité de demander à la fois liquide et l'air comme fluides de transfert de chaleur et plus facile à transporter et à manipuler [10].

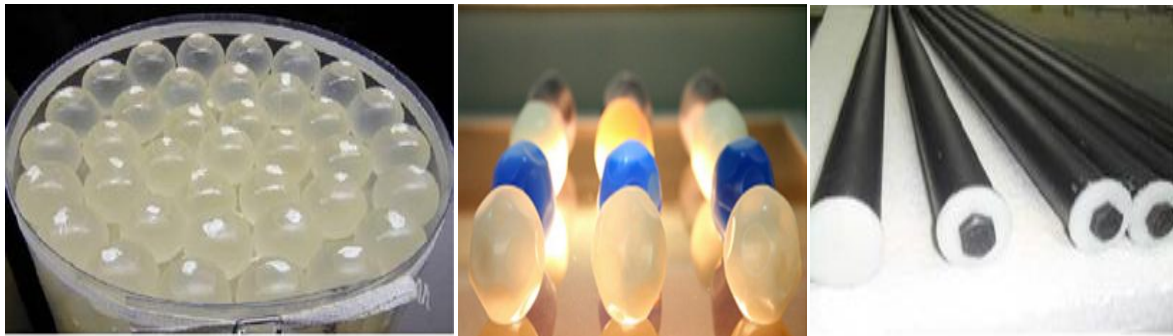


Figure II. 15: MCP sous forme capsule sphérique et cylindrique.[9]

II.4.3.1.6. Base théorique des matériaux à changement de phase

➤ Température de fusion

C'est une des caractéristiques essentielle du matériau ; Elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage ou le déstockage de chaleur latente.[12] Le schéma ci après en est une représentation :



Figure II.16: Stockage et le déstockage de chaleur latente. [12]

Les échanges entre le matériau et le milieu extérieur à température s'effectuent par des cycles de charge et décharge. Ainsi la quantité de chaleur stockée par un MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide est composée de trois termes qui sont dans le cas des corps purs.[12], la quantité de chaleur stockée en fonction de la température est illustrée par la figure suivante :

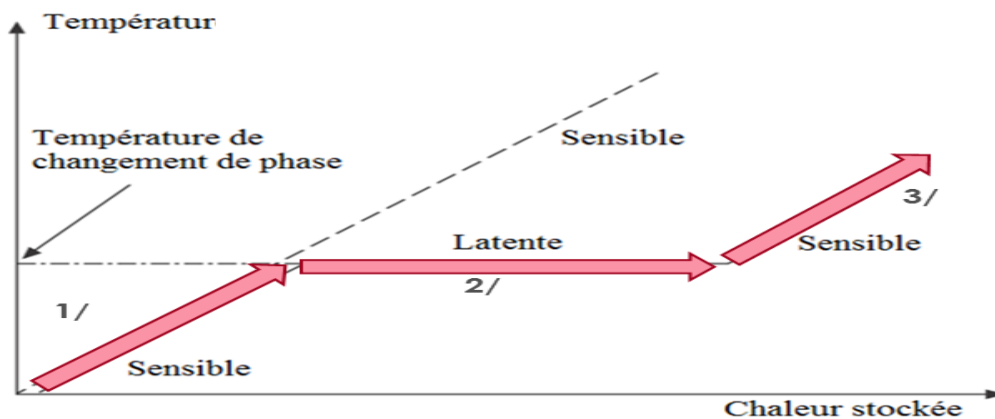


Figure II.17 : Stockage de l'énergie thermique.[4]

Ce schéma (figure II.17) symbolise la charge et décharge mixte (sensible / latente) d'un corps pur observée pendant le changement d'état. Le changement de phase est isotherme dans le cas

de corps pur, pour les corps composés la transition de phase s'effectue sur une gamme de température.[12]

II.4.3.1.6.1. La cristallisation

Le changement de phase liquide /solide permet d'obtenir un solide cristallisé à partir de solutions aqueuses : c'est la cristallisation. L'état cristallin ainsi obtenu est caractérisé par un arrangement régulier des atomes, des molécules ou des ions suivant un modèle rigide appelé réseau. C'est arrangement moléculaire qui fait la différence entre un solide amorphe (solide sans structure régulière).[12] La cristallisation est le résultat de processus: la formation d'un cristal macroscopique. La cristallisation est un processus qui s'accompagne d'un transfert de masse et de chaleur, elle résulte de deux transformations successives :

-La croissance des noyaux et formation du cristal macroscopique.[14]

II.4.3.1.6.2. Les problèmes liés au changement de phase

➤ La surfusion :

Le graphe ci-après illustre l'évolution théorique de la température pendant le changement d'état lors de la décharge thermique.[14]

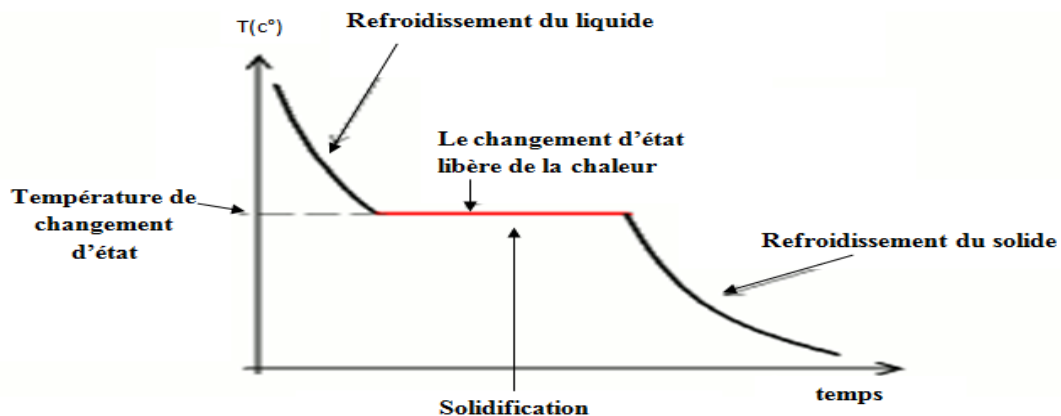


Figure II.18 : Evolution théorique de Température en fonction du temps.[11]

Dans la réalité, les courbes de solidification des corps ont souvent des allures plus ou moins différentes de cette courbe théorique du fait de la surfusion des composés utilisés.[12] Ce phénomène de surfusion est intimement lié à la cristallisation, c'est l'une des difficultés majeures affectant le stockage à chaleur latente. Physiquement comprendre la surfusion

revient à comprendre le mécanismes qui font que lors du refroidissement d'un liquide, la solidification se fait en général en dessous de la température de changement de phase : le matériau peut rester liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de fusion dans certains cas, par contre, on n'observe jamais un solide pur au-delà de la température de fusion [12].

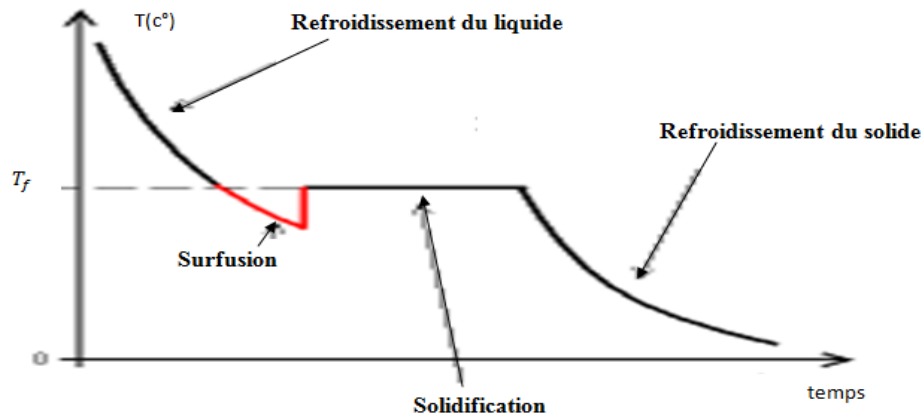


Figure II.19 : Solidification présentant une surfusion.[11]

Sur la zone de solidification de la figure (II.19), on note une chute de température qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur, ce dernier est d'autant plus élevé que la masse du liquide est grande. Si l'échange de chaleur avec l'extérieur est faible.[12] La surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température voulue.[18]

➤ **Les solutions pour remédier à ce problème sont multiples:**

- incorporation d'additifs tensio-actifs
- faciliter la surfusion au moyen de cristaux solides stables autour de la température de cristallisation : ceux-ci servent de points d'accroche pour la cristallisation du matériau
- garder une zone froide à l'intérieur du matériau.[18]

II.4.3.1.7. Les capteurs solaires intégrant le stockage (CSIS)

Le principe du Capteur Solaire Intégrant le Stockage (CSIS) est de positionner le stockage à l'arrière du capteur.[6]

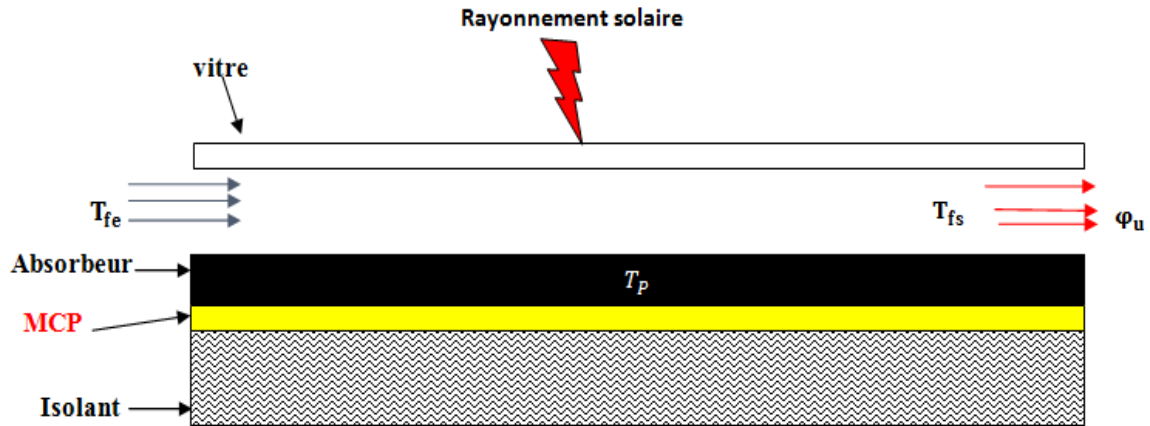


Figure II.20: Configuration d'un matériau à changement de phase dans le capteur solaire à air

II.4.3.1.8. principe de matériau à changement de phase

➤ Principe du changement de phase : chaleur latente

Tout matériau à changement de phase, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou céder de l'énergie sous forme de chaleur. le transfert thermique par chaleur latente (CL) : 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 L_s , en **J/kg**. [5]

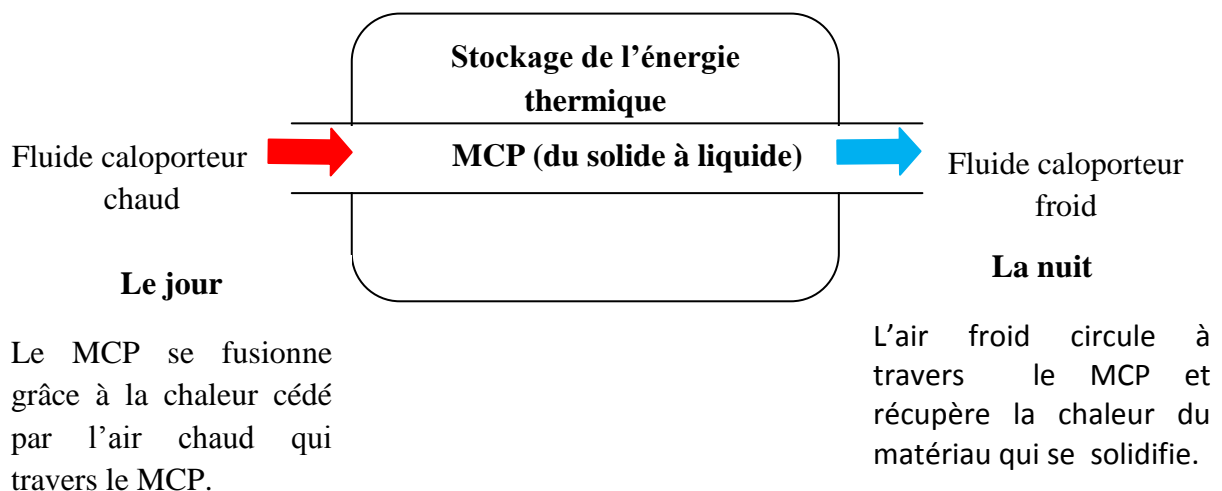


Figure II.21 : Principe du Stockage thermique par changement de phase [4]

Le principe du stockage via des matériaux à changement de phase (MCP) consiste à utiliser des matériaux qui passent d'un état solide à liquide lors d'un apport de chaleur. Par exemple, la paraffine. Placée dans une cuve de stockage sous forme solide à température ambiante, elle est traversée par des tuyaux en cuivre dans lesquels circule de l'air. Lorsque l'air chaude arrive, la paraffine se réchauffe et passe de la forme solide à liquide. A l'inverse, la paraffine va céder sa chaleur en se resolidifiant si l'air devient froide (autour de la température ambiante). Une installation classique consiste à mettre le MCP dans un grand réservoir au milieu duquel passent des tubes pour transporter le fluide caloporteur. Le MCP et le fluide peuvent être différents suivant la production de chaleur qui lui est associée, et donc la température ou la quantité de chaleur que l'on souhaite stocker.[5]

II.5. Conclusion

Dans cette partie, nous avons vu les différents types des capteurs solaires thermiques, surtout le capteur solaire à air et ses composants et généralités sur les matériaux à changement de phase. Le capteur solaire à air est un des principaux composants d'un séchoir solaire, donc l'amélioration des performances du capteur sert directement à maximiser la durée de fonctionnement et à minimiser le coût des opérations de séchage. Le capteur solaire thermique doit accepter le maximum de rayonnement solaire et en laisser sortir le moins possible.

Chapitre III: Etude numérique du capteur solaire à air

III.1. Introduction

Ce chapitre concerne la modélisation (les équations mathématique) et simulation numérique d'un capteur solaire à air sans matériau à changement de phase en convection naturelle puis en convection forcée en un deuxième lieu la simulation du stockage thermique par chaleur latente en utilisant un MCP sera présenté ; attendu que on va comparer entre les résultats numérique dans les deux cas : sans et avec le matériau à changement de phase. les résultats seront présentés sous forme graphes, discutés.

III.2. Simulation numérique d'un capteur solaire à air sans et avec MCP

On va simuler le capteur solaire à air avec sans matériau à changement de phase puis avec ce dernier pour étudier l'influence de MCP sur le fonctionnement sur le système étudié ; puis on compare les deux résultats (sans et avec).

III.2.1 Simulation numérique du capteur solaire à air sans MCP en CN et en CF

Pour étudier le comportement des différentes caractéristiques thermiques du capteur solaire à air sans intégration de matériau à changement de phase.

III.2.1.1 Bilan thermique global d'un capteur solaire à air

On va présenter les équations mathématiques utilisées par la simulation numérique.

III.2.1.2 Principe de captation du rayonnement solaire

Le capteur solaire plan à air transforme le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie thermique utilisable, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (air ,eau ,sel fondu....) [11], La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur.[3] le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la Figure (III.1)

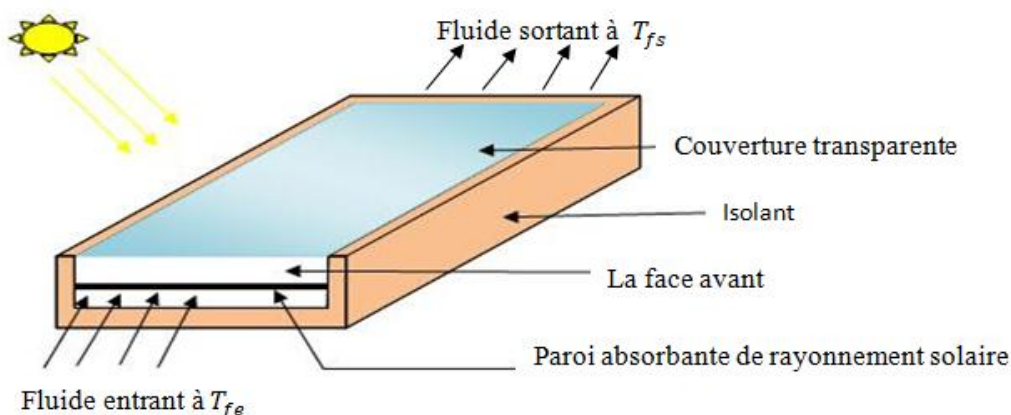


Figure III.1 : Schéma de principe du capteur solaire plan à air [5]

III.3. Propriétés thermo-physiques

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

Tableau III.1. Propriétés thermo-physiques des différents composants d'un capteur [8]

Matériaux	Propriétés physiques					
	Masse volumique		Conductivité thermique		Chaleur spécifique	
	Symbole	Valeur	Symbole	Valeur	Symbole	Valeurs
Verre	ρ_V	2500	λ_V	0.81	c_V	840
Polystyrène	ρ_p	700	λ_p	0.320	c_p	2310
Cuivre	ρ_c	8954	λ_c	383	c_c	386
Aluminium	ρ_A	2719	λ_A	202.4	c_A	871
Acier inoxydable	ρ_{Ai}	7850	λ_{Ai}	15	c_{Ai}	460

III.4. Le bilan thermique globale de la paroi absorbante

A. Bilan thermique d'un capteur plan en régime permanent s'écrit[3] :

$$\varphi_a = \varphi_p + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (\text{III.1})$$

$$\varphi_{st} = M_f c_{air} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

Avec:

M_f est masse en air du capteur définie par : $M_i c_i = M_f c_{air}$, i représentant les différents éléments constitutifs du capteur

➤ **La puissance absorbée par le capteur s'écrit :**

$$\varphi_a = \tau_v \cdot \alpha_A \cdot E \cdot S \quad (\text{III.3})$$

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit[3] :

$$\varphi_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (\text{III.4})$$

➤ **Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme**

$$\varphi_p = h_p \cdot (T_{pm} - T_a) \cdot S \quad (\text{III.5})$$

✚ **Remarque :**

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{pm} peut en première approximation être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \quad (\text{III.6})$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température ΔT existant entre le fluide et la paroi absorbante.

B. Rendements d'un capteur solaire :

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

B.1.L'expression du rendement global instantané d'un CSP est :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{E \cdot S} \quad (\text{III.7})$$

B.2. L'expression du rendement interne instantané d'un CSP est :

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_a} \quad (\text{III.8})$$

B.3. L'expression du rendement optique instantané d'un CSP est :

$$\eta_0 = \frac{\varphi_p}{E} \quad (\text{III.9})$$

On définit également des rendements moyens sur une période donnée (jour, mois, année). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan (3.1) sur la période choisie [11] :

$$\int_0^t \varphi_a dt = \int_0^t \varphi_u dt + \int_0^t \varphi_p dt \quad (\text{III.10}) \quad \text{soit } \varphi_a = \varphi_u + \varphi_p \quad (\text{III.11})$$

On définit alors les rendements global $\bar{\eta}$, interne $\bar{\eta}_i$ et optique $\bar{\eta}_0$ moyens du capteur sur la période considérée par :

$$\bar{\eta} = \frac{\varphi_u}{\int_0^t E.S dt} \quad (\text{III.12})$$

$$\bar{\eta}_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_a} \quad (\text{III.13})$$

$$\bar{\eta}_0 = \frac{\varphi_p}{\int_0^t E.S dt} \quad (\text{III.14})$$

Ces rendements sont à considérer lors d'un calcul de dimensionnement d'un capteur solaire. Il ne faut pas les confondre avec les rendements instantanés qui sont toujours plus élevés (un rendement journalier moyen tient compte du refroidissement nocturne).[19]

II.5. Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire à air**➤ Les hypothèses simplificatrices**

La formulation du problème étudié est sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, hypothèses liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transferts et problème de changement de phase. Afin de permettre une résolution simple et réalisée, nous avons considéré les hypothèses suivantes[8] :

- La conduction thermique dans le sens de l'écoulement du fluide est négligeable.

- Les surfaces horizontales du capteur sont adiabatiques.[5]
- Le vent extérieur est supposé de direction toujours parallèle aux face de capteur.
- Les gradients transversaux de température dans l'absorbeur sont négligés (la conductivité thermique de l'absorbeur est supposée très grande).[3]
- Les variations du volume dues au changement de phase sont négligeables. [18]
- Les propriétés physiques sont les mêmes dans les deux phases pour le MCP.[18]

III.5.1. Capteur solaire à air plan simple

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert que nous appellerons capteur plan simple peuvent être schématisés comme indiquée sur la figure (III.2)[1].

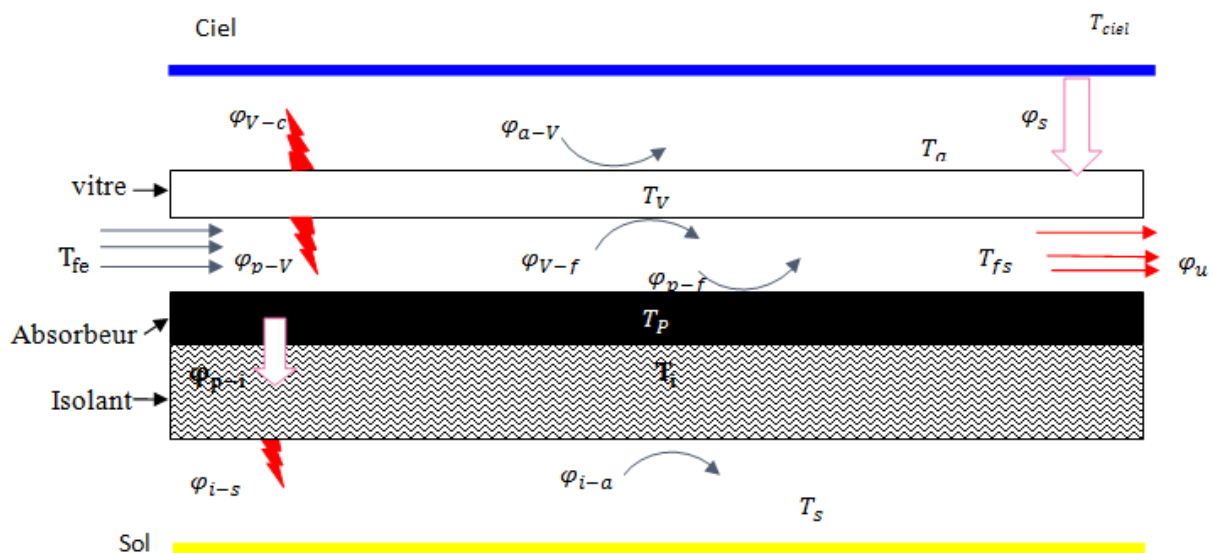


Figure III.2: Différents échanges thermiques dans un capteur à air.[19]

III.5.1.1. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques

Pour déterminer les divers coefficients d'échange thermique h , on introduit les relations suivantes, qu'il s'agit d'un transfert par conduction, rayonnement ou convection[10]. le schéma électrique équivalent des différents transferts thermiques est représenté sur la figure III.3

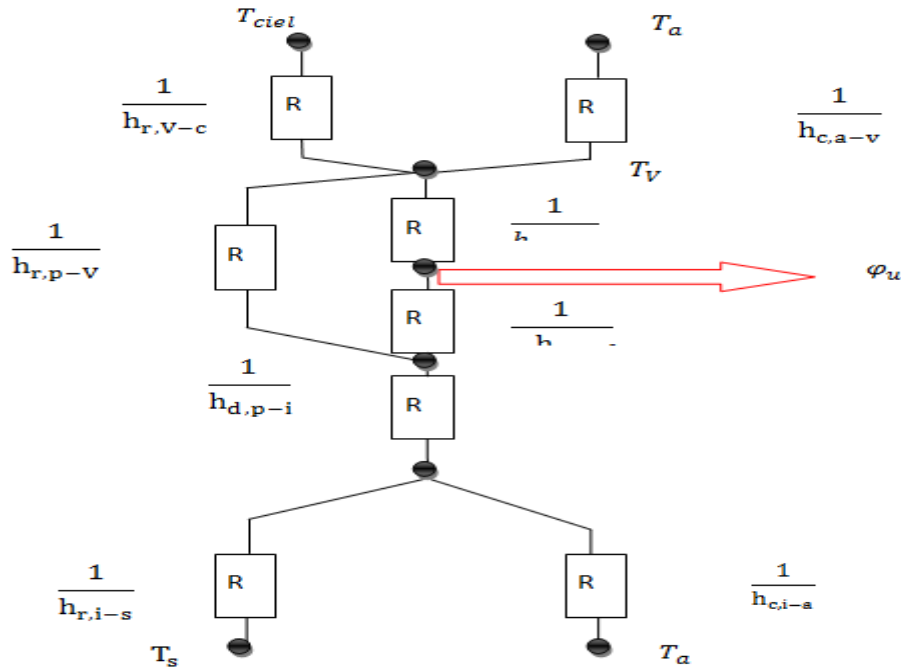


Figure III.3 : Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air.[19]

III.5.1.2. Echanges thermiques par rayonnement

pour le capteur solaire plan, l'échange thermique par rayonnement existe entre :

- la face extérieur de la couverture vitrée et le ciel .
- la face intérieur de la couverture vitrée et la face extérieur de l'absorbeur.
- la face intérieur de l'isolant et le sol.[3]

III.5.1.2.1. Echange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste

La vitre du capteur solaire échange l'énergie par rayonnement thermique avec le ciel. Le coefficient d'échange radiatif entre les deux s'écrit[11] :

$$h_{r,c-v} = \sigma \cdot \epsilon_v \cdot \frac{(T_v + T_{ciel}) - (T_v^2 - T_{ciel}^2)(T_v - T_{ciel})}{(T_v - T_a)} \quad (III.15)$$

➤ Pour un capteur incliné avec un angle β , on utilise la relation suivante [11] :

$$h_{r,c-v} = \sigma \cdot \epsilon_v \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (T_v + T_{ciel}) (T_v^2 + T_{ciel}^2) \quad (III.16)$$

➤ La température équivalente du ciel est donnée par la relation de Swinbank [11] :

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_a^{3/2} \quad (III.17)$$

➤ Une autre relation utilisée par Sarhaddi [11] :

$$T_{ciel} = T_a + 6 \quad (III.18)$$

III.5.1.2.2. Echange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre

Pour l'échange radiatif entre la face intérieur du verre et la face extérieur de la couche de l'absorbeur, le coefficient d'échange est déminé par la relation suivante [11] :

$$T_{r,p-v} = \sigma \cdot \frac{(T_p + T_v) \cdot (T_p^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (III.19)$$

III.5.1.2.3. Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol

La face arrière du capteur solaire échangée de l'énergie par rayonnement thermique avec le sol avec un coefficient d'échange radiatif donné par relation suivante [11] :

$$h_{r,i-s} = \sigma \varepsilon_i \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (T_i + T_s) (T_i^2 + T_s^2) \quad (III.20)$$

➤ La température du sol, est donnée par la relation suivante [11] :

$$T_s = T_a + 2 \quad (III.21)$$

III.5.1.3. Echange thermique par conduction

Cet échange s'effectue à travers les corps solides à cause d'un gradient de température ,il existe au niveau de plusieurs éléments du capteur :

- Au niveau de la couche de verre.
- Au niveau de la plaque absorbante.
- Au niveau de l'isolant.

Le coefficient d'échange thermique par conduction au niveau du composant i s'écrit :

$$h_{d,i} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (III.22)$$

III.5.1.4. Echanges thermiques par convection

- Ceux dus au vent, par rapport aux surfaces avant et arrière du capteur solaire plan.
- Ceux dus au contact entre le fluide caloporteur et le capteur.

III.5.1.4.1. Echange thermique par convection dû au vent

Le coefficient de transfert par convection dû au vent est décrit par relation de **Hottel** et **woertz** suivante [11] :

$$h_c = 5.67 + 3.86. U_v \quad (\text{III.23})$$

Ou par la relation établie par **watmuffet** [11] :

$$h_c = 2.8 + 3. U_v \quad (\text{III.24})$$

Pour un capteur solaire incliné avec un angle β , une autre relation est établie par **Stultz** et **Wen** définie par [11] :

$$h_c = 1.27((T_v - T_a). \cos\beta)^{\frac{1}{3}} + 2.658. U_v \quad (\text{III.25})$$

C'est cette dernière relation qui intervient dans notre modèle numérique, car elle tient compte de l'effet de l'inclinaison du capteur.[19]

III.5.1.4.2. Echange thermique par convection dû au fluide caloporteur

Au cours de la circulation du fluide caloporteur dans la conduite du capteur, ce dernier échange la chaleur par convection avec la couche du verre et de la plaque absorbante. Cet échange dépend de la géométrie des parois, de la vitesse de l'écoulement, des dimensions de la conduit.[11], Le coefficient d'échange thermique par convection est déterminé à l'aide de la relation suivante donnant le nombre de **Nusselt** :

$$N_u = D \frac{h_c}{\lambda_f} \quad (\text{III.26})$$

➤ **Écoulement laminaire : $R_e < 2100$** (III.27)

• $G_r < 100 \Rightarrow N_u = \frac{3.66 + 0.085 \cdot G_r}{(1 + 0.047 \cdot G_r^{\frac{2}{3}})^{\frac{1}{4}}}$

• $G_r > 100 \Rightarrow N_u = 0,116 \cdot G_r^{\frac{1}{3}} + 0,87 \cdot G_r \cdot (1 + 0,045 \cdot G_r^{\frac{1}{3}})^{-\frac{1}{4}}$

➤ **Écoulement transitoire : $2100 < R_e < 10^4$** (III.28)

$$N_u = 0,116 \cdot (R_e^{\frac{2}{3}} - 125) \cdot (1 + (\frac{D_H}{L})^2 \cdot P_r^{\frac{1}{3}})^{-\frac{1}{4}}$$

➤ **Écoulement turbulent : $R_e > 10^4$** (III.29)

$$N_u = 0,018 \cdot R_e^{0,8} \cdot P_r^{0,4}$$

Avec :

$R_e = \frac{\rho_f \cdot D_H}{\mu} \cdot V_f$, $P_r = \frac{\mu_f}{\lambda_f} \cdot c_p$, $G_r = \frac{R_e P_r D_H}{L}$: sont respectivement le nombre **Reynolds**, nombre de **Prandtl** et le nombre de **Gratetz**.

III.6. Calcul des pertes thermiques

Le flux solaire reçu sur le module du capteur solaire plan ne se convertit pas totalement en énergie thermique utiles. Une partie de ce rayonnement est perdue sous forme de chaleur et rayonnement ,au niveau des surface arrière du module.[11]

$$\Phi_p = \Phi_{p,av} + \Phi_{p,ar} \quad (III.30)$$

Avec :

$$\Phi_{p,av} = S \cdot U_{av} (T_p - T_a)$$

$$\Phi_{p,ar} = S \cdot U_{ar} (T_p - T_a)$$

U_{av} et U_{ar} sont les coefficients de perte thermique sur la surface avant et arrière du capteur respectivement, tel que :

$$U_{av} = \left[\frac{1}{h_{r,p-v}} + \frac{2}{h_{c,p-f}} + \frac{1}{h_{c,v-a} + h_{r,v-c}} \right]^{-1}$$

$$U_{ar} = \left[\frac{1}{h_{d,p-i}} + \frac{1}{h_{c,i-a} + h_{r,i-s}} \right]^{-1}$$

Avec :

$U_{av} + U_{ar}$: est le coefficient global de pertes thermiques.[11]

➤ U_L : Puissance perdue sera donnée par :

$$\varphi_p = S \cdot U_L (T_p - T_a) \quad (\text{III.31})$$

III.7. Expressions analytiques du bilan énergétique

III.7.1. Pour la couche de la verre

➤ Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit :

$$M_V \cdot C_V \cdot \frac{dT_V}{dt} = \alpha_V \cdot \varphi_s + \varphi_{V-a} + \varphi_{V-f} + \varphi_{V-p} + \varphi_{V-c} \quad (\text{III.32})$$

Avec :

$$\varphi_s = E \cdot S$$

$$\varphi_{V-a} = h_{c,V-a} \cdot S \cdot (T_a - T_V)$$

$$\varphi_{V-f} = h_{c,V-f} \cdot S \cdot (T_f - T_V)$$

$$\varphi_{V-p} = h_{c,V-p} \cdot S \cdot (T_p - T_V)$$

$$\varphi_{V-c} = h_{r,V-c} \cdot S \cdot (T_c - T_V)$$

Enfinement cette équation devient :

$$M_V \cdot C_V \cdot \frac{dT_V}{dt} = S [\alpha_V \cdot G + (h_{c,V-a} \cdot (T_a - T_V) + h_{c,V-f} \cdot (T_f - T_V) + h_{c,V-p} \cdot (T_p - T_V) + h_{r,V-c} \cdot (T_c - T_V))] \quad (\text{III.33})$$

III.7.2. Pour le fluide caloporteur

Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit :

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = \varphi_{V-f} + \varphi_{f-p} \quad (\text{III.34})$$

Avec :

$$\varphi_{f-p} = h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f)$$

$h_{c,f-p}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide caloporteur et l'absorbeur.

➤ Le bilan thermique dans cette couche devient :

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad (\text{III.35})$$

III.7.3. Pour la plaque absorbante

$$M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p \cdot \tau_p \cdot \varphi_s + \varphi_{p-i} + \varphi_{p-f} + \varphi_{v-p} \quad (\text{III.36})$$

$$\varphi_{p-i} = h_{d,p-i} \cdot S \cdot (T_i - T_p)$$

$h_{d,p-i}$: Coefficient d'échange thermique par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.[11]

➤ Le bilan énergétique dans cette couche devient :

$$M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = S \cdot [\alpha_p \cdot \tau_p \cdot G + (h_{d,p-i} \cdot (T_i - T_p) + h_{c,p-f} \cdot (T_f - T_p) + h_{r,v-p} \cdot (T_v - T_p))] \quad (\text{III.37})$$

III.7.4. Pour l'isolant

➤ Le bilan énergétique dans cette couche est :

$$M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = \varphi_{p-i} + \varphi_{i-a} + \varphi_{i-s} \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$$\varphi_{i-a} = S \cdot h_{c,i-a} \cdot (T_a - T_i)$$

$$\varphi_{i-s} = h_{r,i-s} \cdot S \cdot (T_s - T_i)$$

$h_{c,i-a}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'isolant et le milieu ambiant.

$h_{r,i-s}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol.[11]

➤ **Donc cette équation devient**

$$M_i \cdot C_i \frac{dT_i}{dt} = S [h_{d,p-i}(T_p - T_i) + h_{c,i-a}(T_a - T_i) + h_{r,i-s}(T_s - T_i)] \quad (\text{III.39})$$

➤ **Système d'équation global**

D'après les équations (III.33), (III.35), (III.37), (III.39), Les équations sont regroupées comme suit (Système S) :

$$(\text{S}) \begin{cases}
 M_V \cdot C_V \cdot \frac{dT_V}{dt} = S \cdot [\alpha_V \cdot G + (h_{c,v-a} \cdot (T_a - T_V) + h_{c,v-f} \cdot (T_f - T_V) + h_{r,v-p} \cdot (T_p - T_V) + \\
 h_{r,v-c} \cdot (T_c - T_V)) \\
 M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_V - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \\
 M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = S \cdot [\alpha_p \cdot \tau_V \cdot G + (h_{d,p-i} \cdot (T_i - T_p) + h_{c,p-f} \cdot (T_f - T_p) + h_{r,v-p} \cdot (T_V - T_p))] \\
 M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = S \cdot [(h_{d,p-i} \cdot (T_p - T_i) + h_{c,i-a} \cdot (T_a - T_i) + h_{r,i-s} \cdot (T_s - T_i))]
 \end{cases}$$

III.8. Etude numérique du capteur solaire à air sans MCP en CN

On va simuler la variation temporelle de la températures et le rendement du capteur solaire à air sans intégration de matériau à changement de phase.

III.8.1. Les données météorologiques

Les données expérimentales relevées du capteur solaire à air étudié en convection naturelle de la journée 29/4/2018, conçu et réalisé dans l'URER-MS .Adrar dans le cadre d'un mémoire de master en physique énergétique et énergies renouvelables (année 2017/2018).

III.8.1.1. la variation temporelle du rayonnement solaire de 29/4/2018

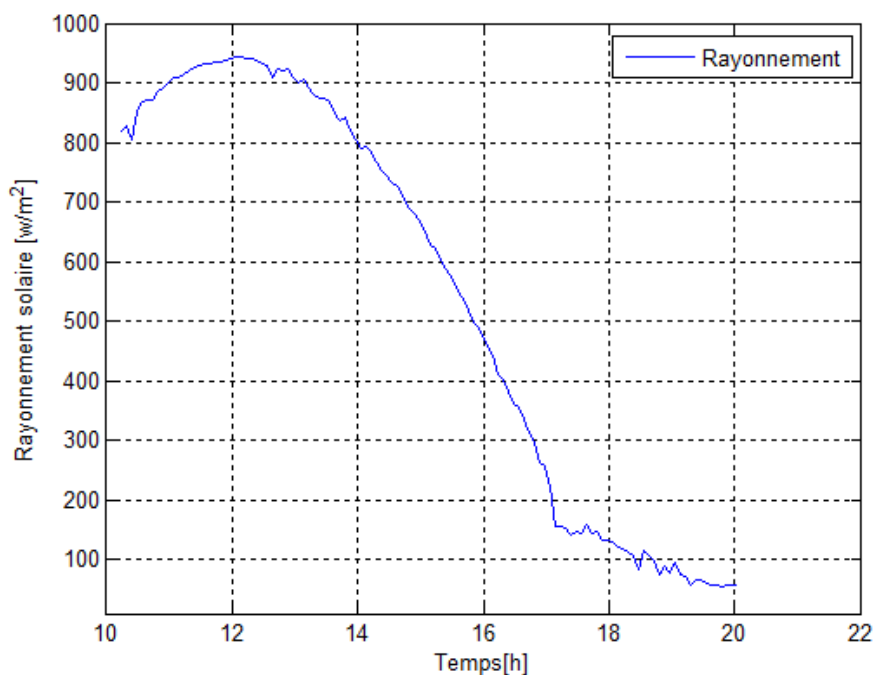


Figure III.4 : La variation temporelle du rayonnement solaire de la journée 29/4/2018

La figure (III.4) représente la variation de l'éclairement solaire en fonction du temps de la journée 29/4/2018 du site de l'étude (Adrar). On observe que le rayonnement solaire prend la forme elliptique au cours de la journée, attendu qu'il prend la valeur maximale 950 w/m^2 qui correspond à 12h3; puis diminue.

III.8.1.2. la variation temporelle de la température ambiante de 29/4/2018

La figure (III.5) représente la variation de la température ambiante en fonction du temps de la journée 29/4/2018 dans site de l'étude.

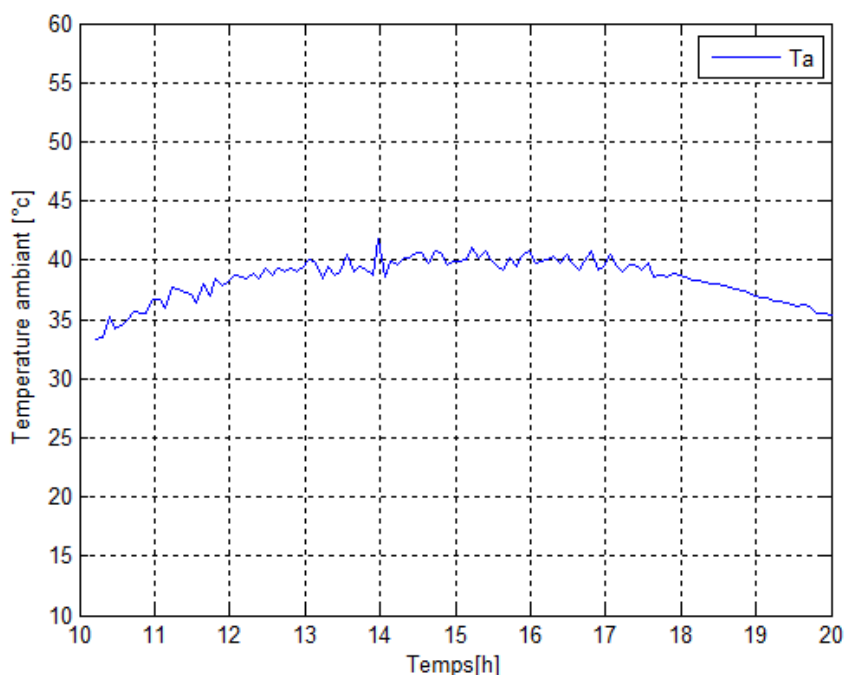


Figure III.5: La variation temporelle de la température ambiante de la journée 29/4/2018

Après l'allure qui représente la variation de la température ambiante en fonction du temps, attendu qu'elle prend sa valeur maximale 40 °C à l'intervalle du temps à [14h-17h].

III.8.2. Les courbes des températures des différents composants du capteur solaire en CN

III.8.2.1. La variation temporelle de la température de la plaque absorbante en CN

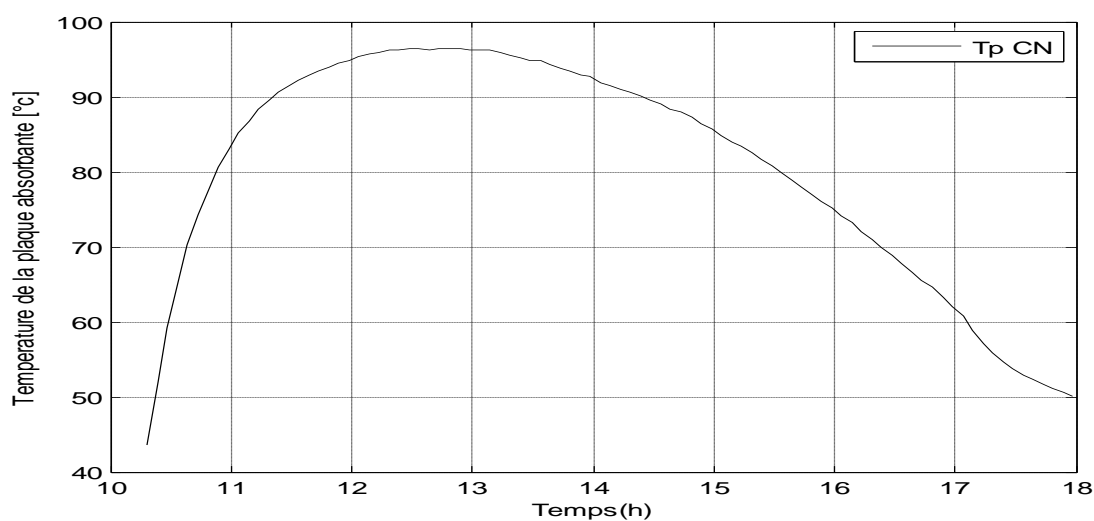


Figure III.6 : La variation de température de la plaque absorbante en convection naturelle

La figure (III.6) représente la variation horaire de la température de la plaque absorbante du capteur solaire étudié en convection naturelle, où on note que cette dernière commence de se chauffer à partir de 10 h et 20 min d'une valeur minimale environ 45°C jusqu'à la valeur maximale 95 °C dans la période [12h-13h], puis elle se diminue.

III.8.2. 2. La variation temporelle de la température du fluide sortant du capteur en CN

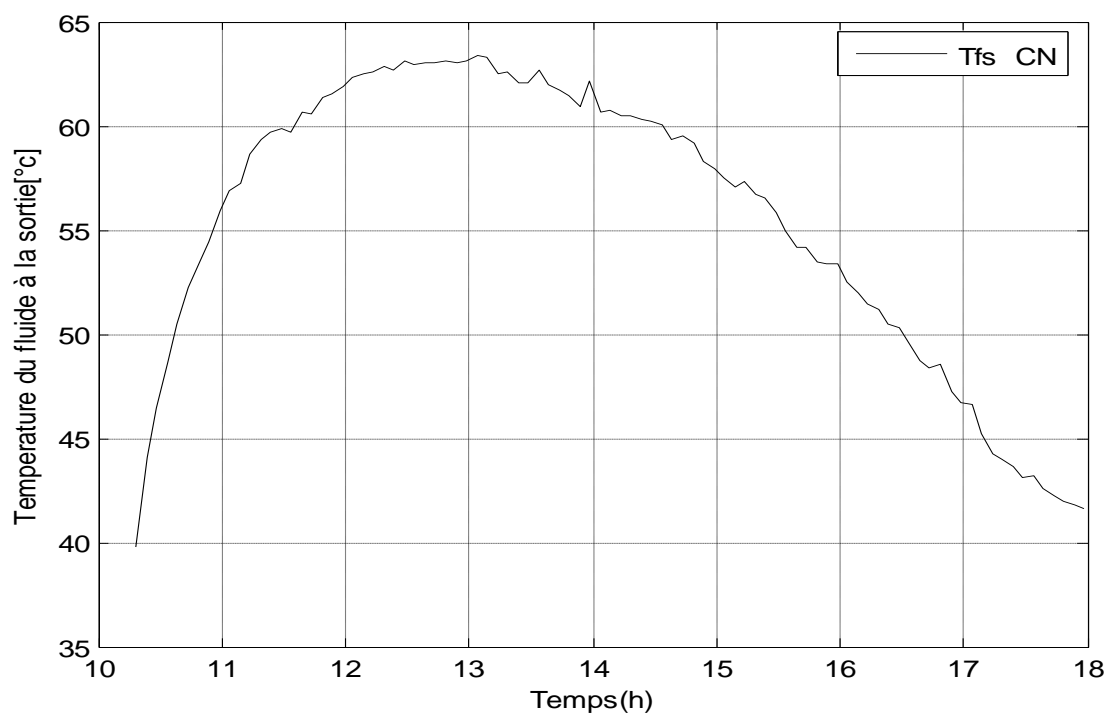


Figure III.7: La variation temporelle de la température simulée du fluide à la sortie en CN

La figure (III.7) représente la variation horaire de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié en convection naturelle, où on observe que la température du fluide à la sortie commence de se chauffer à partir de 10 h et 20 min d'une valeur minimale environ 40°C jusqu'à atteindre la valeur maximale 64 °C dans la période allant de [12h- à 13h], puis elle diminue.

III.8.2.3. La variation temporelle de la température de la vitre en CN

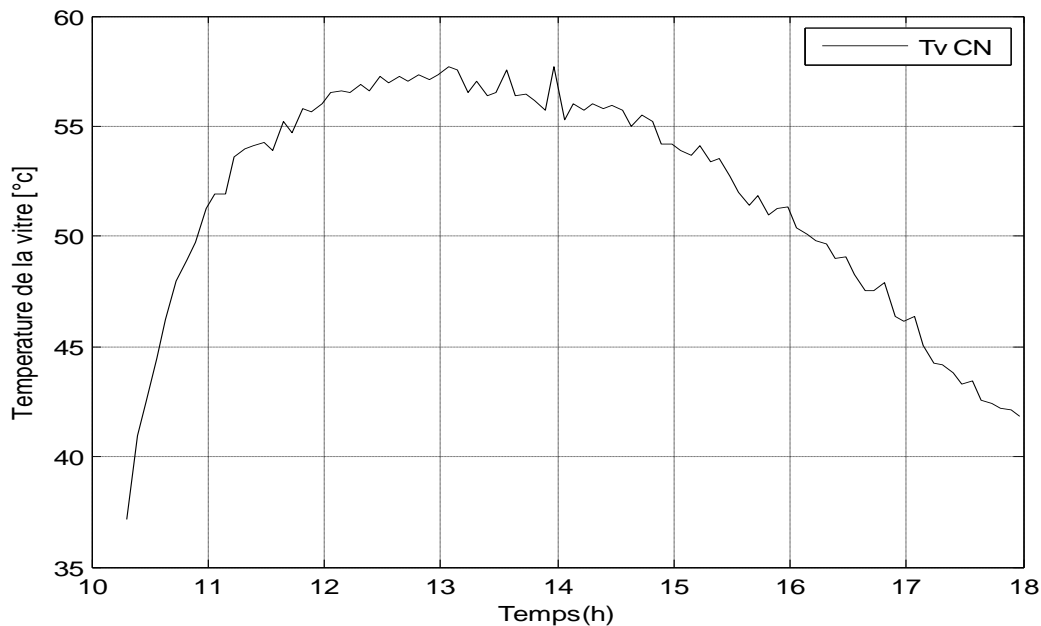


Figure III.8: La variation temporelle de la température de la vitre en CN

III.8.2.4. La variation temporelle de la chaleur utile en CN

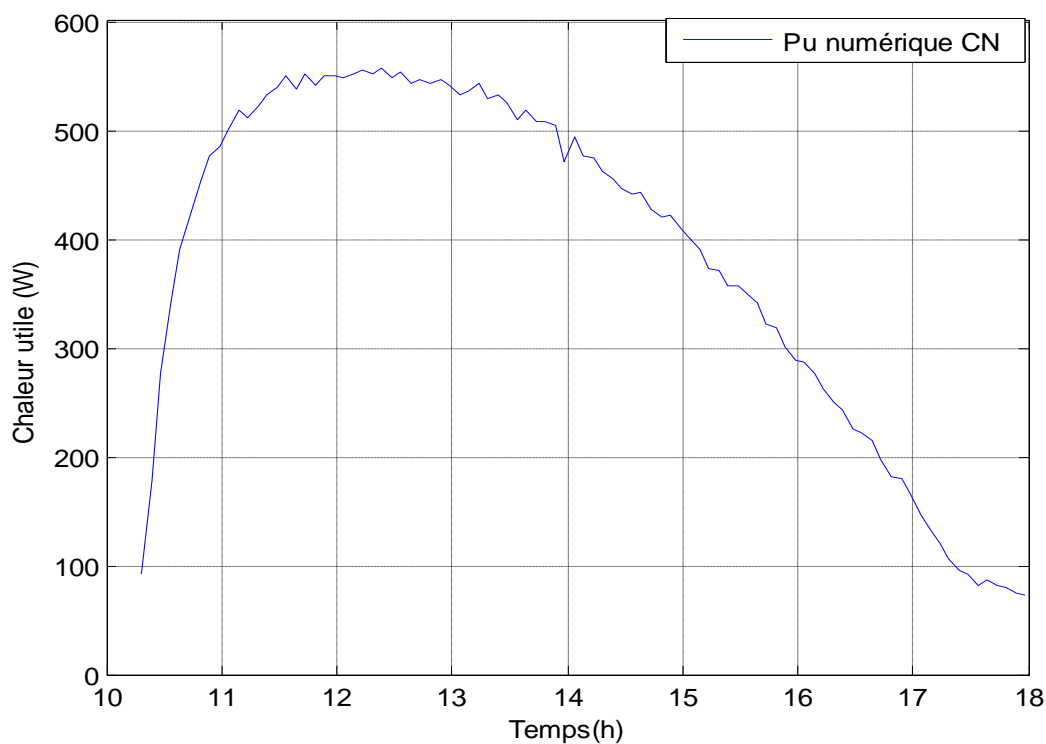


Figure III.9: la variation de la puissance utile en convection naturelle

La figure (III.8) représente la variation horaire de la température de la vitre d'un capteur solaire étudié en convection naturelle, où on remarque que la température du vitrage commence de se chauffer à partir de 10 h et 20 min d'une valeur minimale environ 36°C jusqu'à la valeur maximale 57 °C dans l'intervalle [12h-13h], puis elle diminue; à cause de la diminution de la quantité de chaleur rayonnée par le soleil.

A partir de la figure (III.9), on note que la variation instantanée de la puissance utile a une forme semblable à celle du rayonnement solaire, elle touche sa valeur maximale 550 w à 12h.

III.8.2.5. La variation instantanée du rendement thermique du capteur solaire en CN

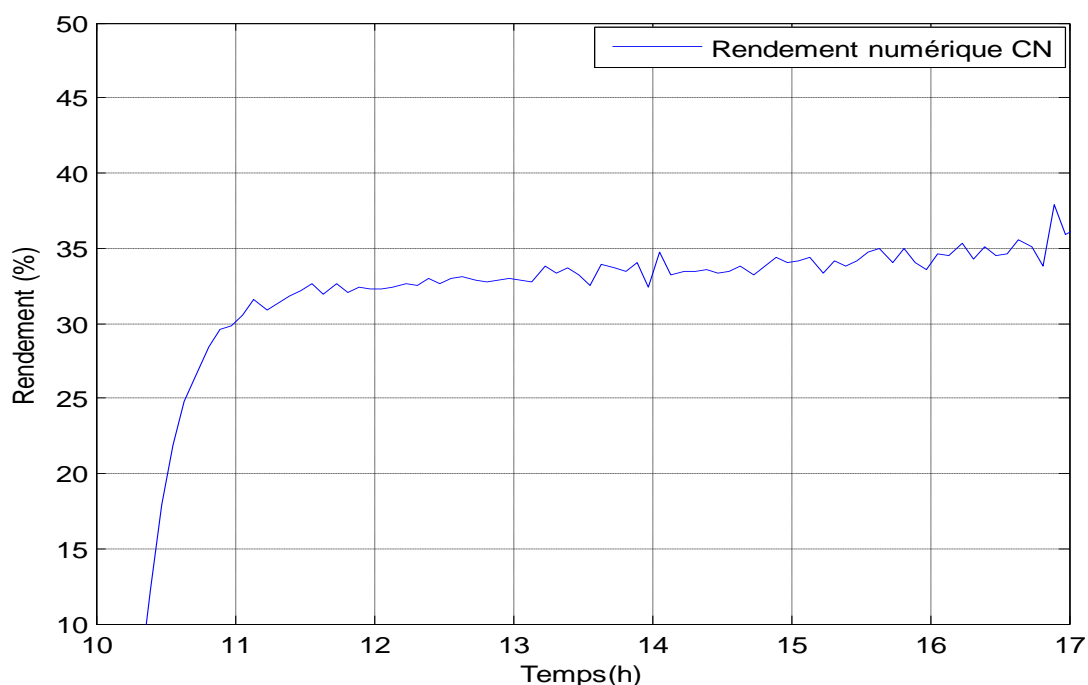


Figure III.10: La variation instantané du rendement thermique simulé du capteur en CN

On observe que le rendement commence d'augmenter à partir 10h 20min, Tandis qu'il varie rapidement pour atteindre sa valeur maximale presque 38% à 17h.

III.9.Simulation numérique du capteur solaire à air sans MCP en convection forcée

Nous allons simuler notre capteur en convection forcée pendant la journée 2 mai 2018.

III.9.1.les données météorologiques

On va utiliser pour la simulation les données météorologique de la journée 2/5/2018.

III.9.2. la variation temporelle du rayonnement solaire de 2/5/2018

La figure (III.11) représente la variation de l'éclairement solaire en fonction du temps de la journée 2/5/2018 du site de l'étude (Adrar).

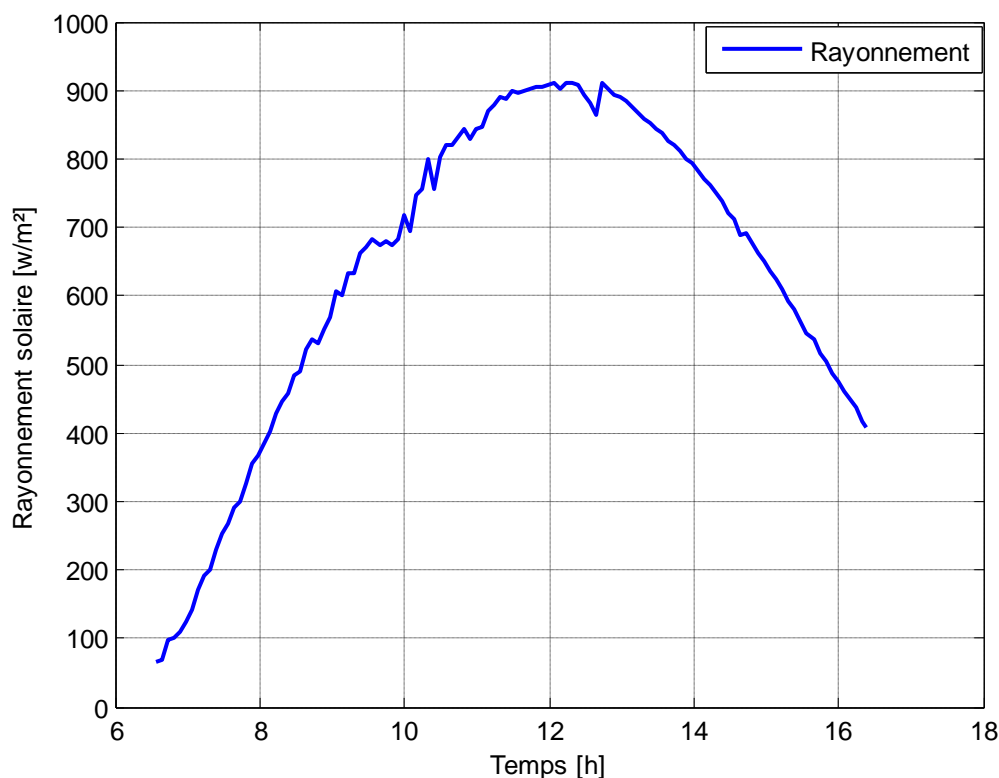


Figure III.11 : La variation temporelle du rayonnement solaire de la journée de 2/5/2018

La figure (III.11) représente la variation de l'éclairement solaire en fonction du temps de la journée 2/5/2018 du site de l'étude (Adrar). On observe que le rayonnement solaire prend la forme elliptique au cours de la journée, attendu qu'il prend la valeur minimale 50 w/m² qui correspond à 6h30 min, puis il augmente rapidement pour s'arriver la valeur maximale 900 w/m² à 12h et après ça diminue jusqu'à il est devenu nulle à 18h30mi ; pendant qu'il prend une forme semblable par rapport l'heure 13h.

III.9.3. la variation temporelle de la température ambiante de 2/5/2018

La figure (III.12) représente la variation de la température ambiante en fonction du temps de la journée 2/5/2018 du site de l'étude.

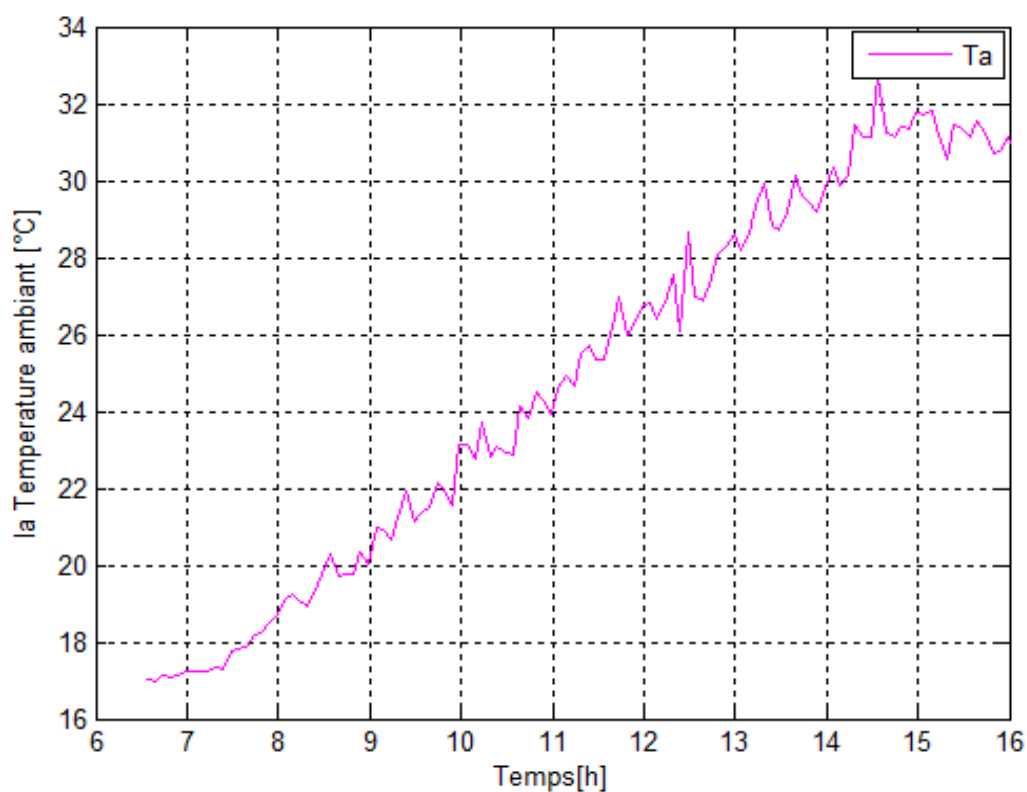


Figure III.12: La variation temporelle de la température ambiante de 2/5/2018

III.9.4. La variation temporelle de la température de la plaque en CF

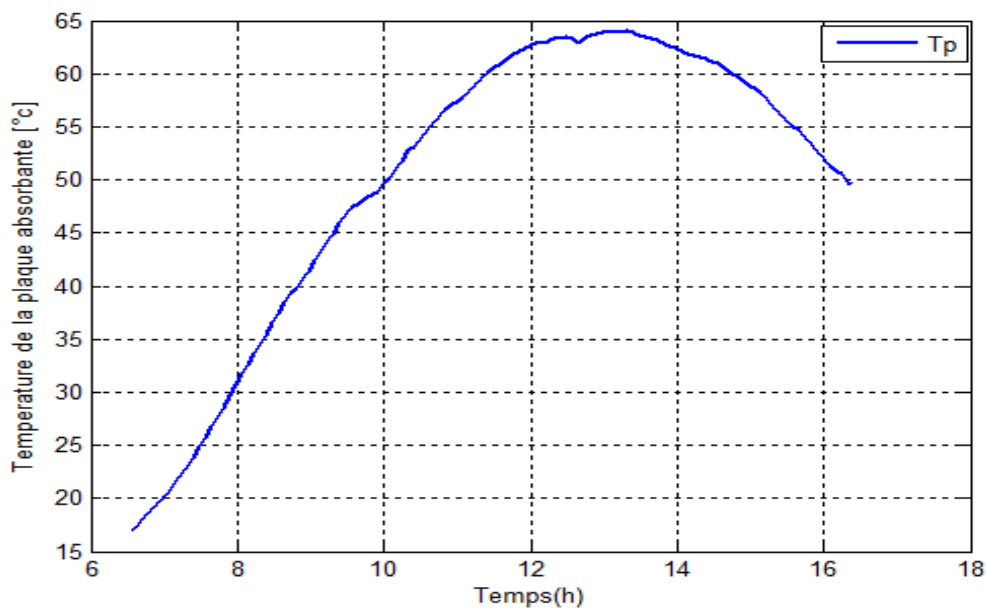


Figure III.13: La variation temporelle de la température simulée de la plaque en CF

La figure (III.12) représente la variation de la température ambiante en fonction du temps, attendu qu'elle possède une allure elliptique pendant qu'elle prend sa valeur minimale $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 6h30 min et sa valeur maximale $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ à l'intervalle du temps [14h30-16h30].

La figure (III.13) représente la variation horaire de la température de la plaque absorbante du capteur solaire étudié, où on note que cette dernière commence de se chauffer à partir de 6 h et 56 min d'une valeur minimale environ 16°C jusqu'à la valeur maximale $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans la période [12h-14h], puis elle se diminue.

III.9.5. La variation temporelle de la température du fluide à la sortie du capteur en CF

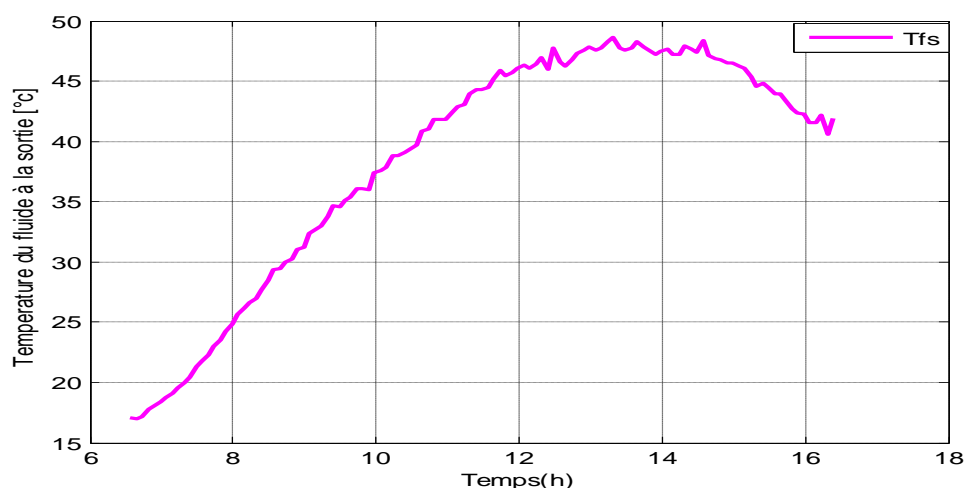


Figure III.14: La variation temporelle de la température simulée du fluide à la sortie en CF

La figure (III.14) représente la variation horaire de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié, où on observe que la température du fluide à la sortie commence de se chauffer à partir de 6 h et 56 min d'une valeur minimale environ 16°C jusqu'à atteindre la valeur maximale $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans la période allant de [12h- à 14h30], puis elle diminue.

III.9.6. La variation temporelle de la température de la vitre en CF

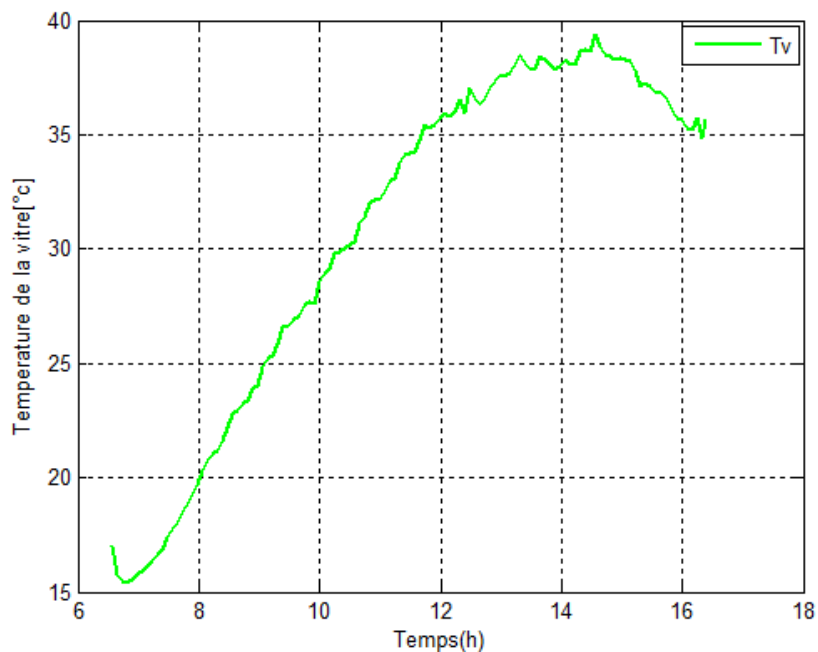


Figure III.15: La variation temporelle de la température simulée de la vitre en CF

III.9.7. La variation temporelle de la température de l'ensemble des composants du capteur solaire à air

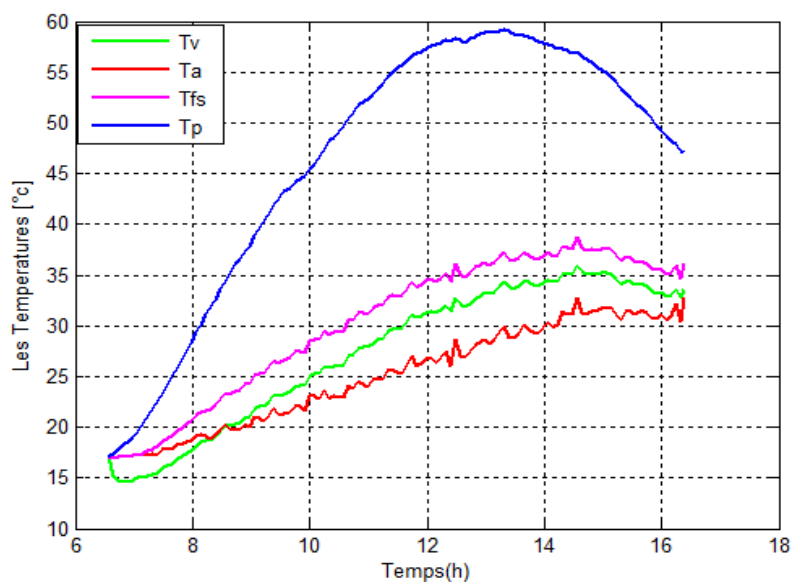


Figure III.16: La variation temporelle de la température simulée des différents composants du capteur solaire à air en CF

La figure (III.15) représente la variation horaire de la température de la vitre d'un capteur solaire, où on remarque que la température du vitrage commence de se chauffer à partir de 6 h et 56 min d'une valeur minimale environ 15°C jusqu'à la valeur maximale 44 °C dans l'intervalle [12h-15h], puis elle diminue; à cause de la diminution de la quantité de chaleur rayonnée par le soleil.

On observe sur la figure(III.16) que toutes les températures des composants du capteur solaire à air sont supérieures à la température ambiante; attendu que la plaque absorbante atteigne la plus grande valeur de la température chauffée (64 °C), et la deuxième valeur de la température pour le fluide à la sortie du capteur solaire à air ; et puis la dernière classe est pour le vitrage.

III.9.8. La variation temporelle de la chaleur utile en CF

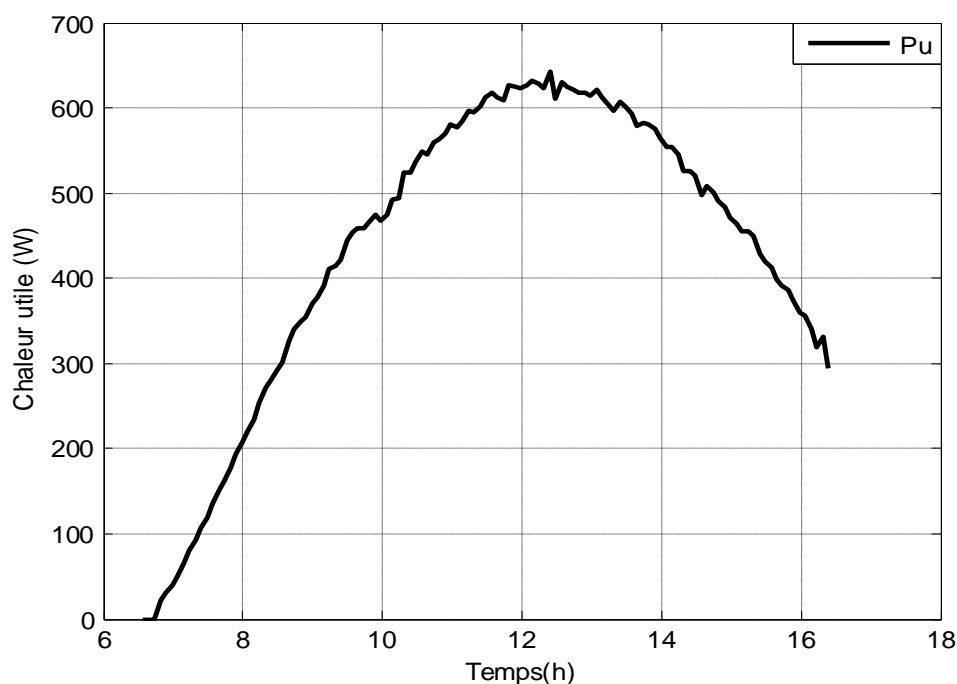


Figure III.17: La variation temporelle de la puissance utile simulée en CF

A partir de la figure (III.17), on note que la variation instantanée de la puissance utile a une forme semblable à celle du rayonnement solaire, elle touche sa valeur maximale 600 w à 12h.

III.9.9. La variation instantanée du rendement thermique du capteur solaire en CF

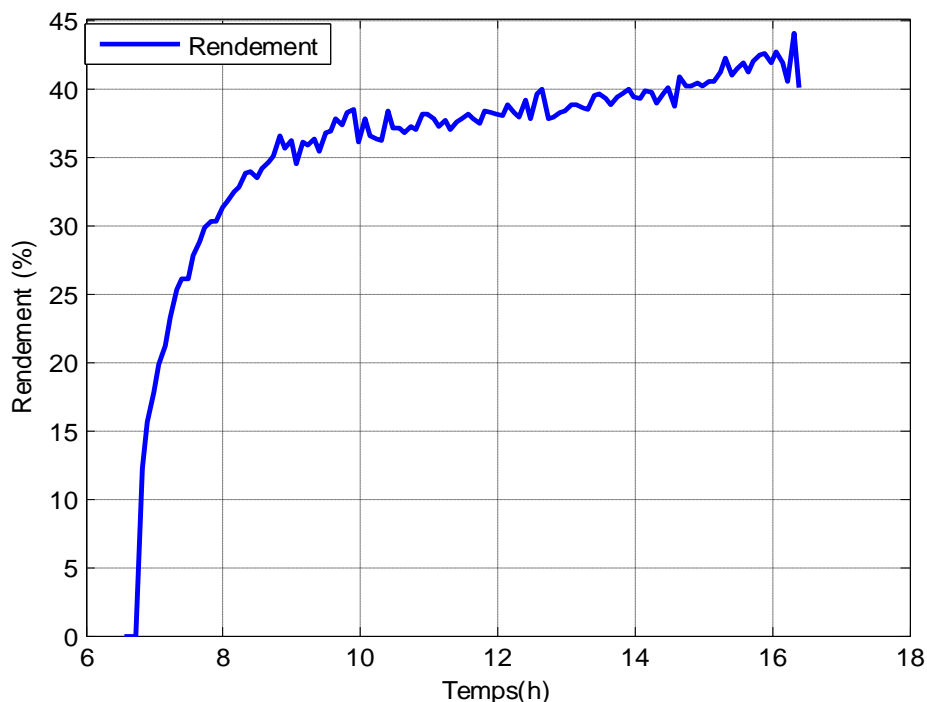


Figure III.18: La variation instantané du rendement thermique simulé du capteur en CF

On observe que le rendement commence d'augmenter à partir 6 h50 min à une valeur minimale 5% , Tandis qu'il varie rapidement pour atteindre sa valeur maximale 42 % à 16h.

III.10. Simulation numérique du capteur solaire à air avec MCP

On va simuler le capteur solaire à air avec intégration un matériau à changement de phase (paraffine wax à température de fusion 56 °C) sous forme lit en dessus de la plaque absorbante pour étudier son influence sur les performance thermiques du capteur solaire à air.

➤ Les données météorologiques 23/3/2014

On a utilisé les données météorologiques de 23 mars 2014 ; Dans cette partie de notre étude, nous avons simulé d'une quantité (7 kg) de matériau à changement de phase en dessous de la plaque absorbante pour étudier son effet sur le fonctionnement du capteur solaire à air surtout dans la période nocturne.

III.10.1. L'effet du matériau à changement de phase sur les performances thermiques

On a simulé une quantité 7

kg du MCP (paraffine wax à température de fusion de 56 °C) est intégré en dessous de l'absorbeur du capteur. Dans le but d'étudier l'influence du matériau à changement de phase sur le fonctionnement du capteur solaire à air particulièrement après coucher du soleil. les résultats obtenus sont comparés en référence au cas du capteur sans MCP. Pour cela nous avons choisis de tracer les courbes des températures en fonction du temps :

- Température du MCP et la plaque sans et avec MCP .
- Température du MCP et DU fluide à la sortie sans et avec MCP.
- Chaleur latente à la sortie du capteur solaire à air.

A. Premier cas : MCP (le pas de la différence de température égal à 2 °C)

III.10.1.1. L'effet du matériau à changement de phase sur la plaque absorbante

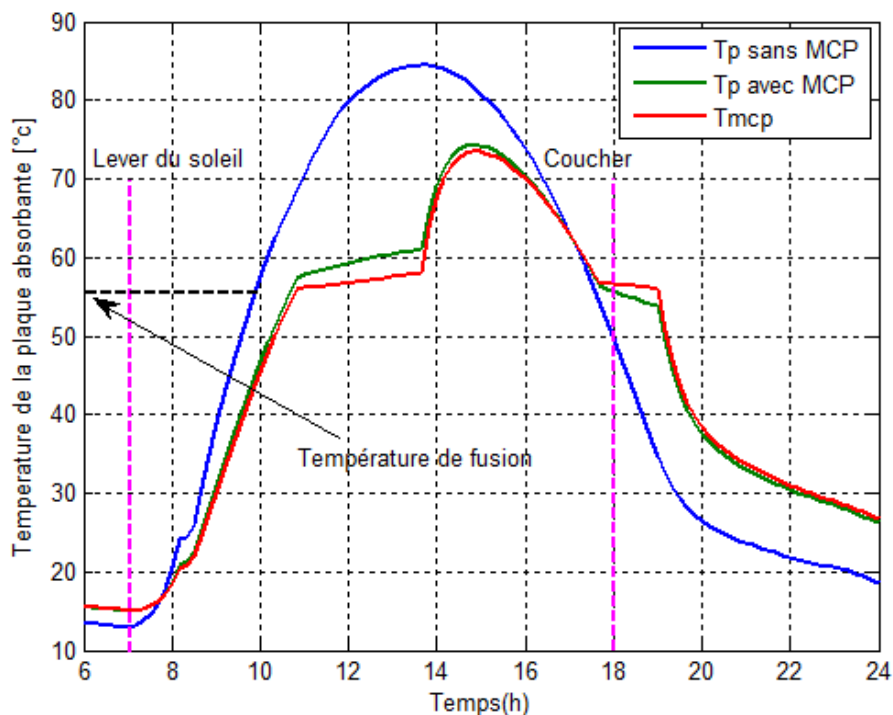


Figure III.19: La variation temporelle de température de la plaque sans et avec MCP

Figure (III.19) représente la variation temporelle de la température du matériau à changement de phase (paraffine wax) et les températures de l'absorbeur sans et avec MCP; on observe que le MCP stocke l'énergie à partir du lever du soleil jusqu'au coucher où le MCP

emmagasine l'énergie thermique pendant la journée puis la libérer pendant la nuit, attendu que le séchage gagne 7h heures supplémentaires après coucher du soleil. et on observe aussi la température de la plaque augmente dans le matin et diminue à 18h contre la température du MCP par un décalage de 10°C après le coucher du soleil durant la période [18h30-00h]. Dans cet étape toujours certain déphasage est remarquable dans le temps (emmagasinage de l'énergie) ; lorsque la température de la plaque avec MCP et du MCP atteint, la température de solidification (de fusion) on remarque aussi une palier quasi stagnation de la température en changement de phase (décharge), elle se dure 1h30, puis une diminution de température légère et retardée dans le temps par rapport à la Température de plaque sans MCP. Aussi, on observe l'efficacité du système après le coucher du soleil (18h) au lieu d'avoir une $T_p=33^{\circ}\text{C}$, on enregistre une température de $T_{mcp}=56^{\circ}\text{C}$, cela implique une différence égal à 23°C , un delta de 10°C est enregistré jusqu'à 22h ce qui est très utile pour plusieurs applications : le cas de séchage, la distillation, le chauffage

➤ **Donc on remarque que l'allure du MCP passe par cinq étapes :**

1^{er} étape [7 h15-10h30] : l'échauffement dans le début par l'augmentation de température du MCP jusqu'à sa température de la fusion 56°C ; dans cette étapes le MCP commence de changer son état du solide à liquide par la chaleur absorbée de la plaque ; On observe aussi qu'il y a un petit déphasage en chauffage de la plaque avec et sans MCP.

2^{ème} étape [10h30-13h50] : c'est la phase de fusion (stockage) où le MCP emmagasine la chaleur par son changement de phase. cette phase dure jusqu'à ce que le MCP se transforme totalement à l'état liquide à Température constante ($T_f=56^{\circ}\text{C}$).

3^{ème} étape [13h50-18h] : on remarque une palier quasi stagnation de la température en changement de phase (phase intermédiaire), elle se dure 1h30, attendu que la température du MCP liquide s'élève depuis de température de fusion jusqu'à atteindre son maximum 72.5°C à 15h ; puis elle diminue jusqu'à la température de fusion (le coucher du soleil) .

4^{ème} [18h-19h50] : la phase de décharge où le MCP liquide commence à se transformer à l'état solide (solidification) en dégageant sa chaleur sous forme de chaleur latente de solidification. Cette phase dure jusqu'à la transformation totale à l'état solide. Donc cette période constitue la durée de prolongement de fonctionnement du capteur solaire qui correspond approximativement à un gain de deux heures après le coucher du soleil. On observe l'efficacité du système après le coucher du soleil (18h) au lieu d'avoir une $T_p=33^{\circ}\text{C}$, on enregistre une température de $T_{mcp}=56^{\circ}\text{C}$ (à 19h).

5^{ème} étape [19h50-00h] : la phase de refroidissement du MCP solide à cause de perte thermique dans la nuit. De plus, on constate que la température de plaque avec MCP maintient un écart de température d'environ 10°C par rapport au cas sans MCP durant la période nocturne. on observe l'efficacité du système après le coucher du soleil (18h) au lieu d'avoir une $T_p=33^{\circ}\text{C}$, on enregistre une température de $T_{mcp}=56^{\circ}\text{C}$, cela implique une différence égal à 23°C , un delta de 10°C est enregistré jusqu'à 00h ce qui est très utile pour plusieurs applications : le cas de séchage, la distillation, le chauffage

III.10.1.2. L'effet du matériau à changement de phase sur le fluide sortant

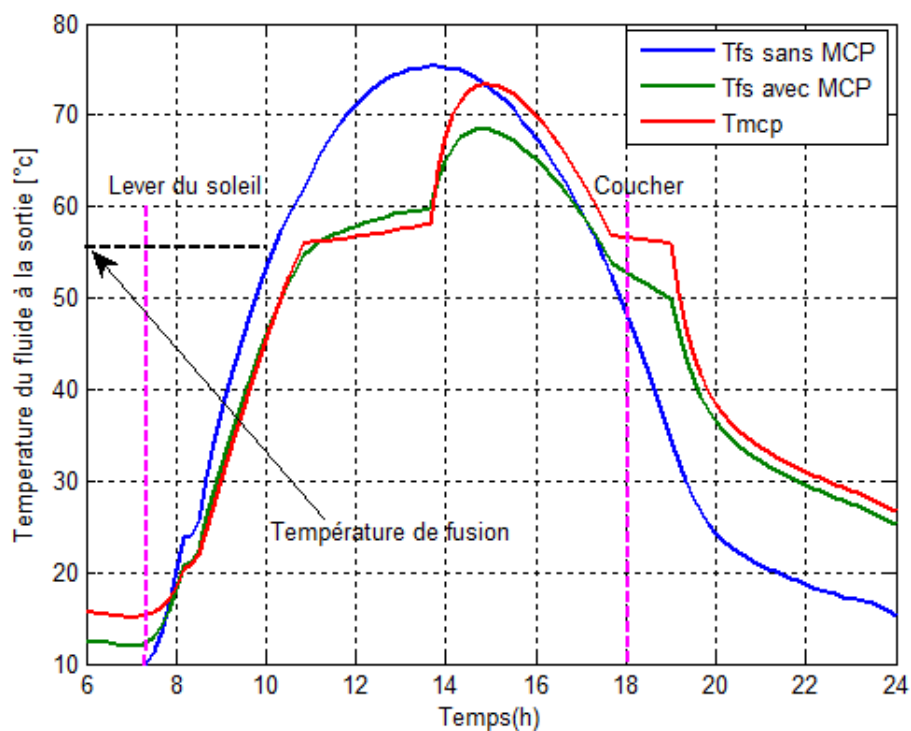


Figure III.20: La variation temporelle de la température du MCP et fluide sortant sans et avec MCP

Le figure (III.20) représente la variation temporelle de la température du matériau à changement de phase et les températures du fluide à la sortie sans et avec MCP; on observe que le MCP diminue la température du fluide à la sortie (T_{fs}) durant la journée, par contre la nuit, il permet d'augmenter la température du fluide à la sortie ; On remarque aussi que :

- premièrement la température du fluide à la sortie varie de la même manière que de la température de plaque (T_p).

-Deuxièmement la température maximale du fluide a diminué (de 75 au 69 °C).

-la durée de fonctionnement a prolongé de 18h-19h50 ; et cela confirme l'efficacité du MCP.

-Il ya un décalage dans le temps d' une heure enregistré pour les valeurs maximale de température.

III.10.1.3 L'effet du matériau à changement de phase sur l'enthalpie à la sortie

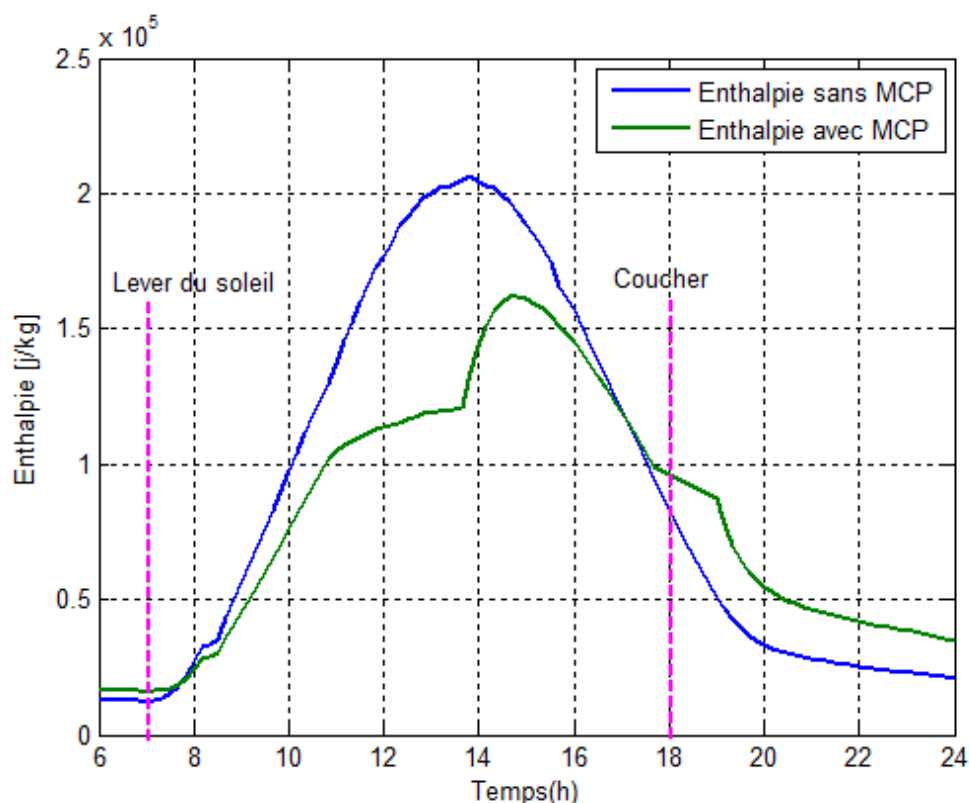


Figure III.21: La variation temporelle de la chaleur latente à la sortie du sans et avec MCP.

La figure (III.21) représente la variation temporelle d'enthalpie à la sortie du capteur solaire à air ; on remarque le MCP stocke la chaleur latente au cours la journée et la libérer dans la nuit ; après le couche du soleil [18h-00h] la chaleur latente avec MCP reste supérieure à la chaleur latente sans MCP (environ $0,4 \cdot 10^4 \text{ j/kg}$).

B. Deuxième cas : MCP (le pas de la différence de la température égal 5 °C)

B.1. L'effet du matériau à changement de phase sur la plaque absorbante

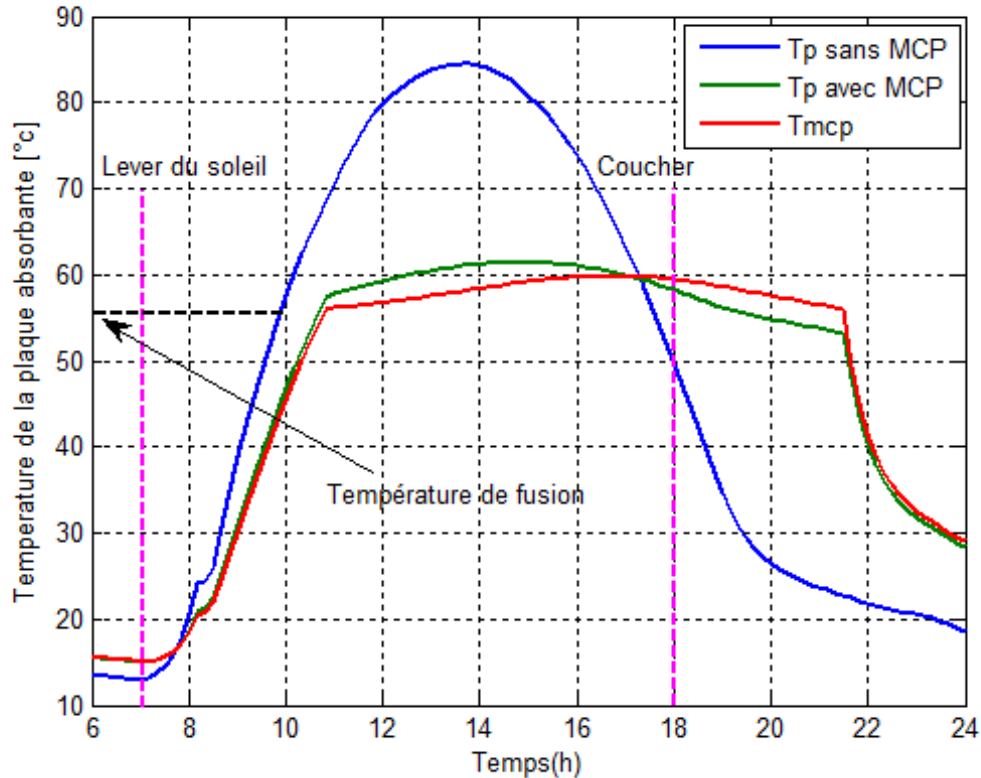


Figure III.22: La variation temporelle de la température du MCP et de la plaque de l'absorbeur sans et avec MCP

La figure (III.22) représente la variation de la température de la plaque en fonction du temps, on remarque que l'allure subit une réfraction quand la température de l'absorbeur approche à la température de la fusion du MCP. On remarque aussi qu'il y a un faible déphasage entre les courbes quand on ajoute du MCP, tel qu'il existe une différence entre l'allure de température de la plaque sans MCP et la température de la plaque avec MCP.

-A 19h, il existe un écart de température de 28 °C entre les températures de la plaque sans et avec MCP. On note l'état de fusion et solidification se fait brutalement, et cela n'existe pas en réalité.

B.2. L'effet du matériau à changement de phase sur le fluide sortant

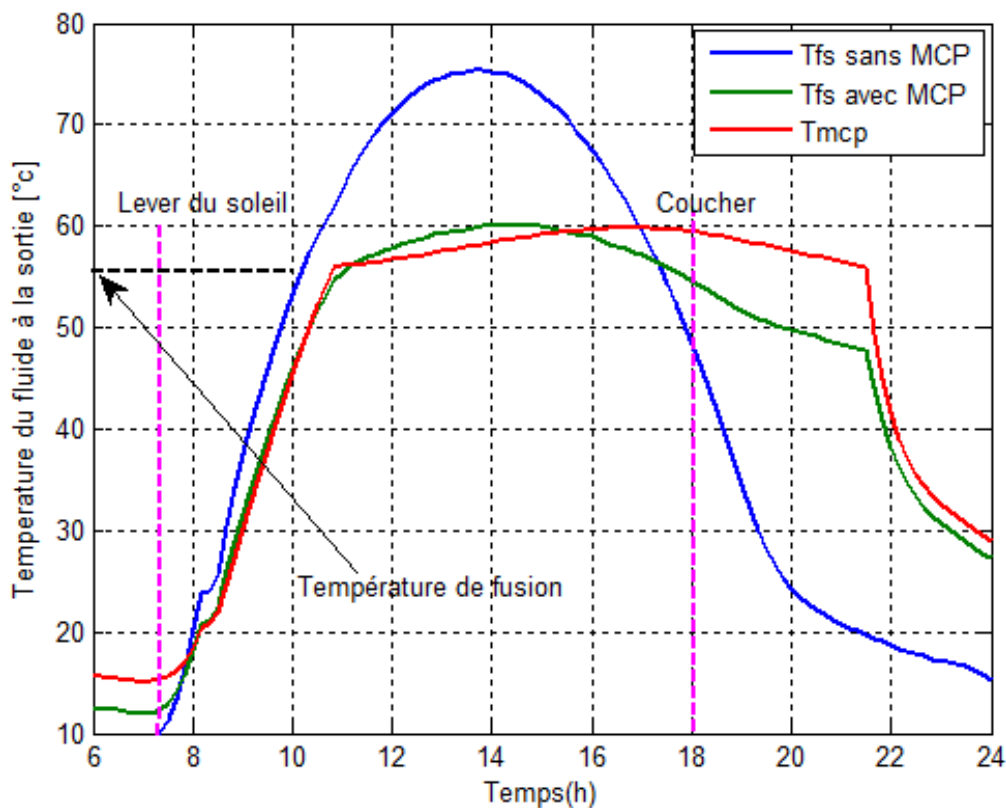


Figure III.23: La variation temporelle de la température du fluide sortant sans et avec MCP et Tmcp.

La figure (III.23) représente la variation temporelle de la température du fluide sortant sans et avec MCP et Tmcp, On observe sur la figure que les phase de charge (fusion) et décharge se font brutalement sans passage de l'état intermédiaire partielle (liquide +solide), et cela n'existe pas en réalité. Donc Les figures (III.22 et 23) représentent la charge et la décharge d'un corps pur observé pendant le changement d'état (à température constante). Le changement de phase est isotherme dans le cas d'un corps pur.

B.3. L'effet du matériau à changement de phase sur l'enthalpie à la sortie

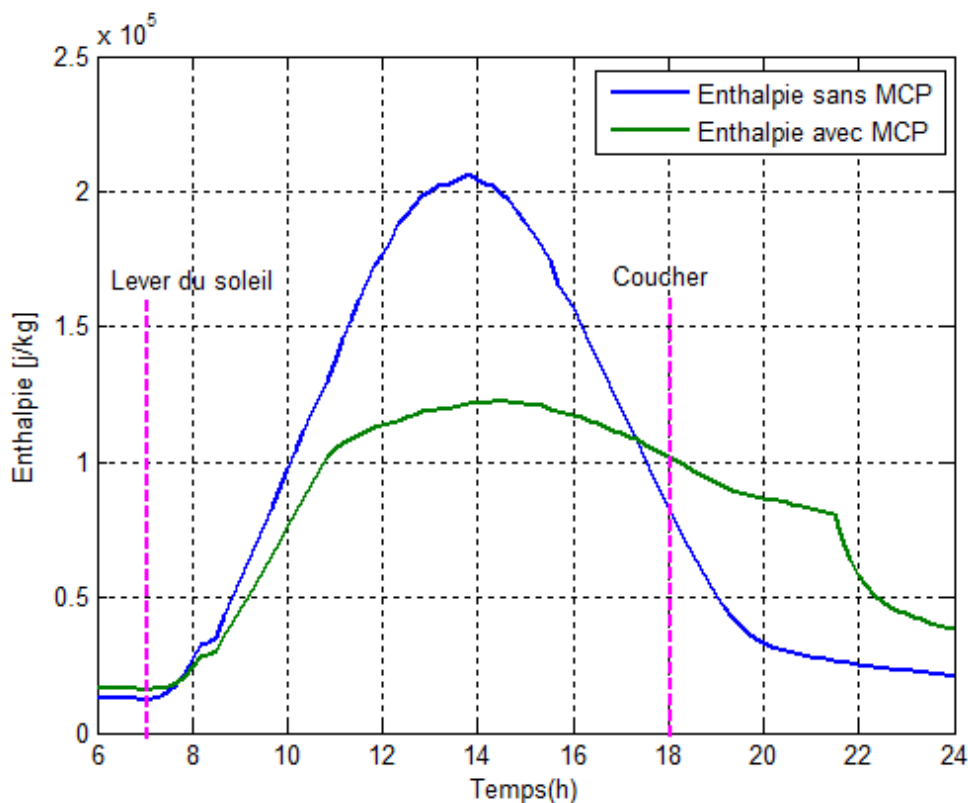


Figure III.24: La variation temporelle de la chaleur latente à la sortie du sans et avec MCP

La figure (III.24) représente la variation temporelle de l'enthalpie à la sortie du capteur solaire à air ; on remarque le MCP diminue la quantité de chaleur latente au cours la journée et l'augmenter dans la nuit ; après le couche du soleil [18h-00h] la chaleur latente avec MCP reste supérieure à la chaleur latente sans MCP.

III.11.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait deux études numériques sans un matériau à changement de phase en convection naturelles et en convection forcée. Puis deuxièmement avec un matériau à changement de phase (paraffine wax à T_f 56 °C) mis sous la plaque absorbante , les résultats obtenues son comparés avec les résultats sans MCP.

Chapitre IV: Résultats expérimentaux et discussions

IV. Résultats expérimentaux et discussions

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre de l'étude expérimentale en convection naturelle et en convection forcée et L'utilisation des outils de mesures (l'acquisition, les thermocouples, l'anémomètre et le pyranomètre) pendant l'expérimentation sur le capteur solaire à air, attendu que en premier lieu, les résultats seront présentés sous forme graphes, comparés et discutés, en un deuxième lieu la validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux du capteur solaire à air étudié dans les deux cas en convection naturelle et en convection forcée.

IV.2. Etude expérimentale du capteur solaire en convection naturelle

IV.2.1. Présentation de banc d'essai du capteur solaire à air étudié sans MCP

L'expérience1: on a branché les thermocouples des différents composants du capteur solaire à air avec l'acquisition pour mesurer les températures du fluide entrant et sortant et la température de la plaque et la vitreet aussi le pyranomètre dans le but de mesurer le rayonnement solaire incident ;ce qui illustré dans les photos suivants :



Figure IV.1: Capteur solaire à air étudié sans MCP.

IV.4. Les instruments de mesure expérimentale



Figure IV.2. L'acquisition des données



Figure IV.3:Le Pyranomètre mesurant le rayonnement solaire



Figure IV.4: l'anémomètre mesurant la vitesse du vent et la température ambiante

IV.3. Les résultats expérimentaux des températures en convection naturelle

➤ Les températures expérimentales du capteur solaire à air en CN

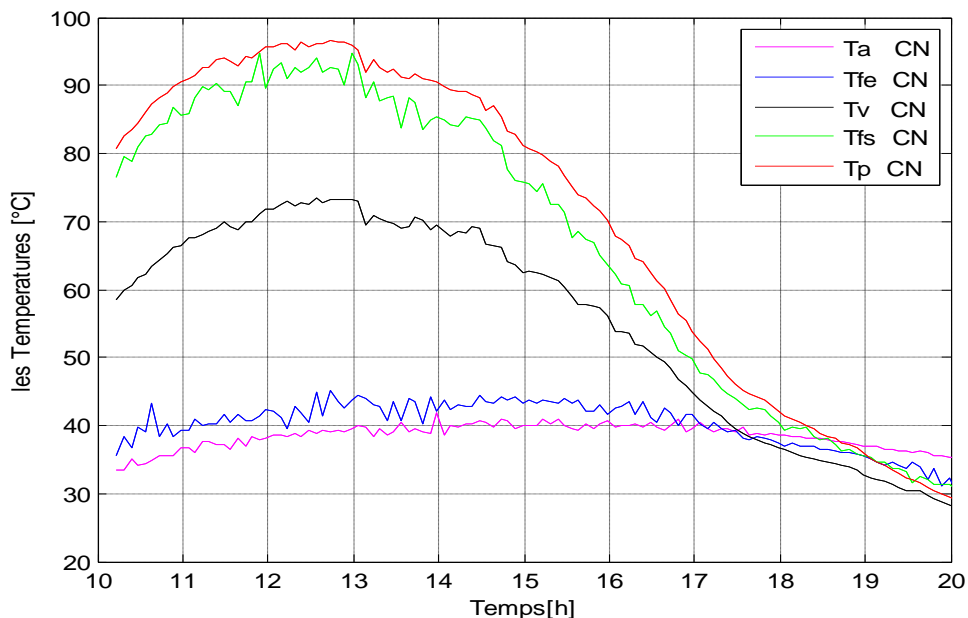


Figure IV.5: la variation temporelle des températures expérimentales en CN

➤ Rendement expérimental en convection naturelle

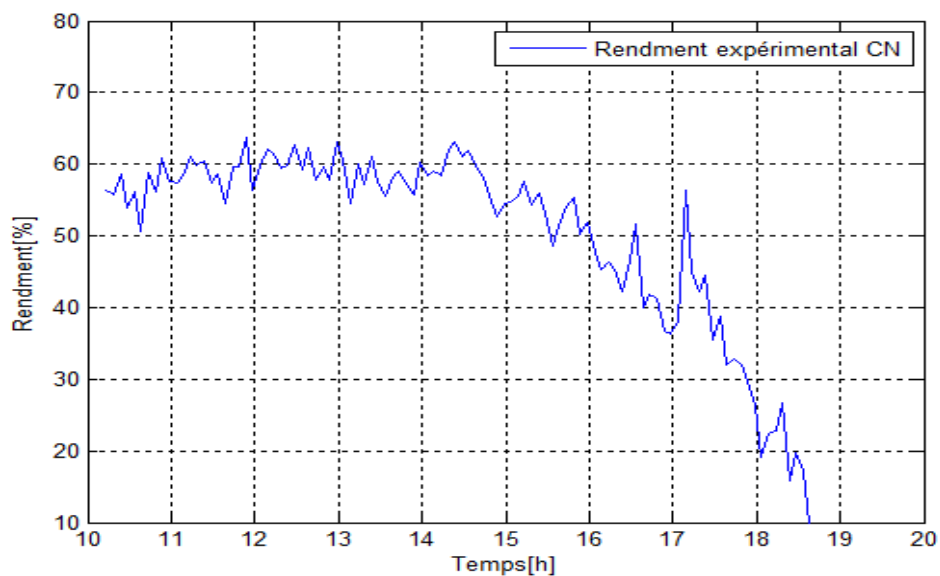


Figure IV.6: La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CN

On observe que le rendement commence à varier au cours de la journée pour atteindre la valeur maximale environ 60 % dans l'intervalle [12h-14h30min].

La figure (IV.5) représente l'allure de l'évolution instantanée des températures mesurées expérimentalement des différents composants du capteur solaire à air en convection naturelle ; On note que la plaque absorbante prend la valeur maximale de la température (95 °C à midi); et la température du vitrage et du fluide à la sortie varient simultanément; pendant que les valeurs des températures du fluide entrant du capteur solaire à air et les valeurs de la température ambiante sont presque semblables et elles prennent la plus petite valeur.

IV.4. Validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux en CN

On va faire une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus de la journée 29/4/2018 en convection naturelle et résultats numériques des performances thermiques (les températures et le rendement thermique) pour le même intervalle de temps ; L'ensemble de ces valeurs simulées et mesurées expérimentalement sont présentées sur les figures suivantes.

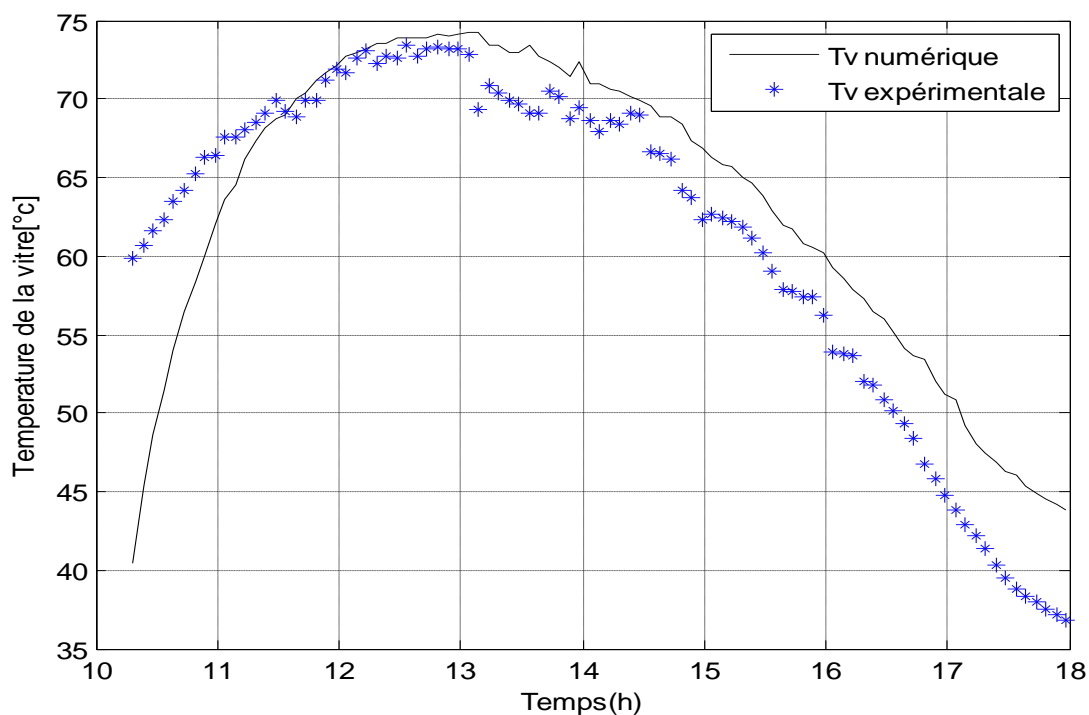


Figure IV.7: Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CN

La figure (IV.7) représente la comparaison entre la températures de la vitre simulée et expérimentale ; on observe un petit écart entre la température du vitrage numérique et expérimentale à leur valeur maximal 74 °C dans l'intervalle à 13h, puis elle diminue.

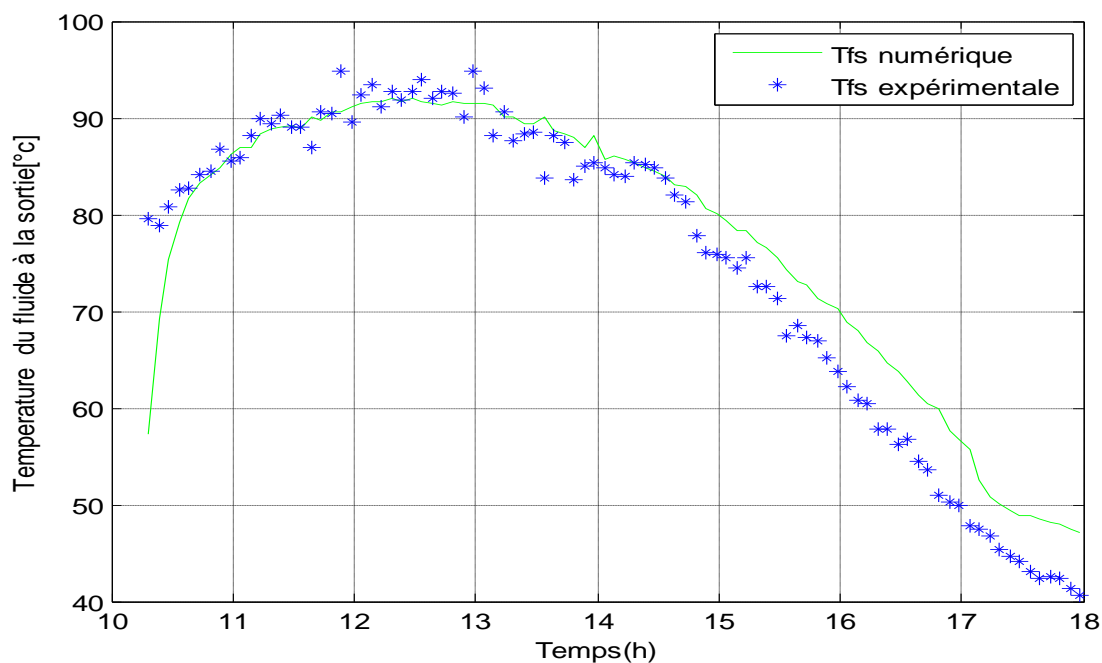


Figure IV.8: Comparaison entre température du fluide sortant simulée et expérimentale en CN

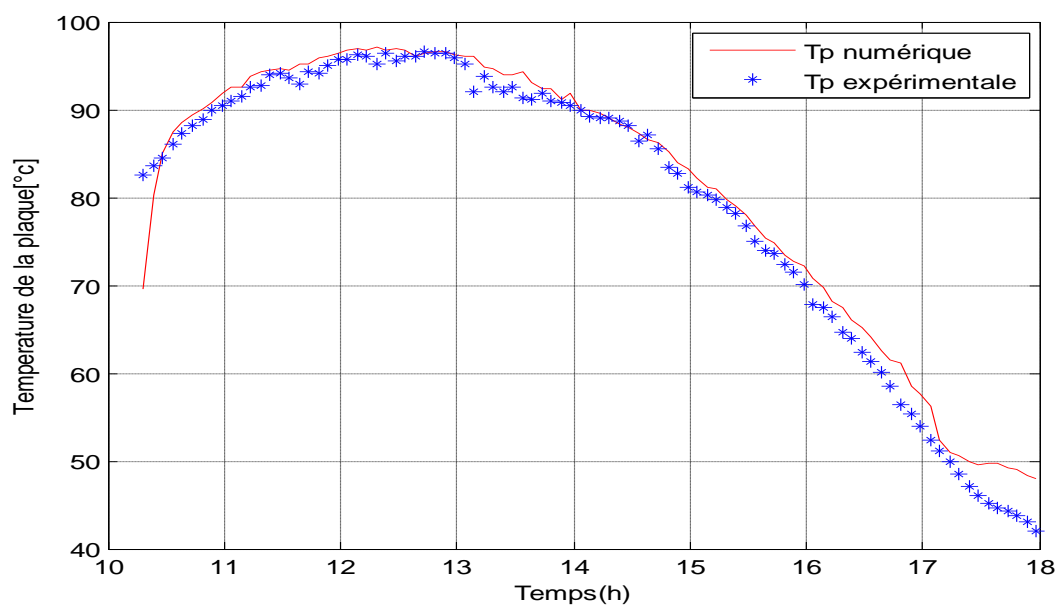


Figure IV.9: Comparaison entre la température de la plaque absorbante simulée et expérimentale en CN

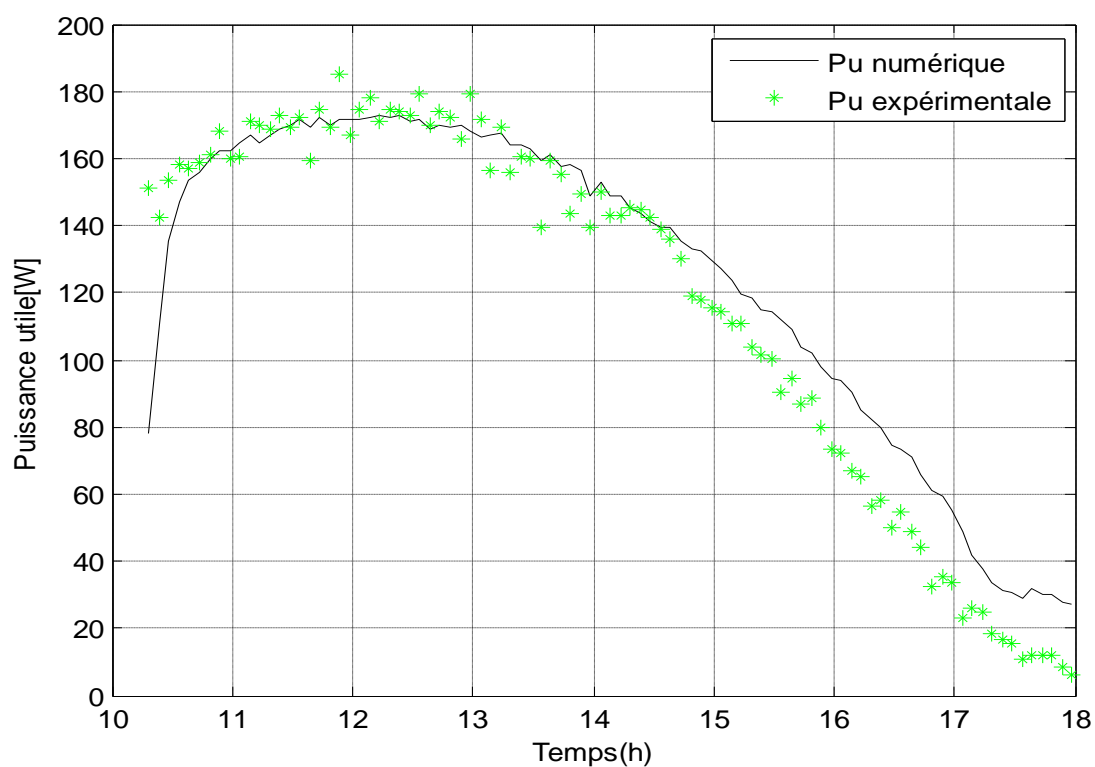


Figure IV.10: Comparaison entre la puissance utile simulée et expérimentale en CN

IV.5. Résultats expérimentaux et discussions en convection forcée

L'expérience 2: même expérience 1 sauf que on utilise le ventilateur avec une vitesse moyenne 0.82 m/s.



Figure IV.11: Le ventilateur utilisé dans capteur solaire(CF)

IV.5.1. Les résultats expérimentaux des températures en convection forcée

➤ Les températures expérimentales du capteur solaire à air

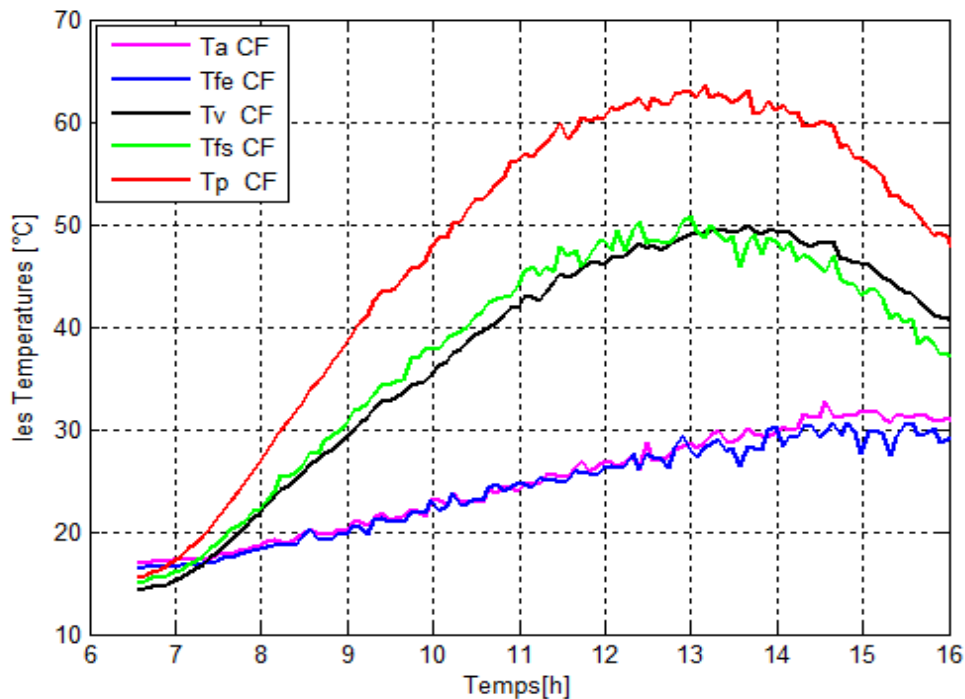


Figure IV.12: la variation temporelle des températures expérimentales en convection forcée

➤ Rendement expérimentale en convection forcée

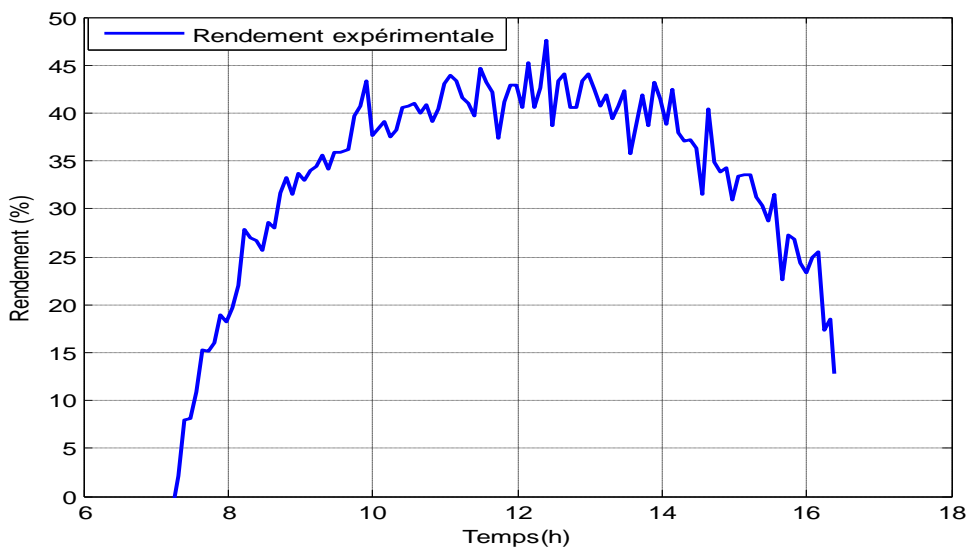


Figure IV.13: La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CF

On observe que sur la figure (IV.13) le rendement commence d'augmenter à partir 6 h50 min, Tandis qu'il varie rapidement pour atteindre sa valeur maximale 45% à midi.

La figure (IV.12) représente l'allure de l'évolution instantané des températures mesurées expérimentalement des différents composants du capteur solaire à air en convection forcée ; On note que la plaque absorbante prend la valeur maximale de la température (62 °C à midi); et la température du vitrage et du fluide à la sortie varient simultanément; pendant que les valeurs des températures du fluide entrant du capteur solaire à air et les valeurs de la température ambiante sont presque semblables et elles prennent la plus petite valeur.

IV.5.2. Validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux en CF

On va faire une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus de la journée 2/5/2018 et résultats numériques des performances thermiques (les températures et le rendement thermique ...) pour le même intervalles du temps ; L'ensemble de ces valeurs simulées et mesurées expérimentalement sont présentées sur les figures suivantes.

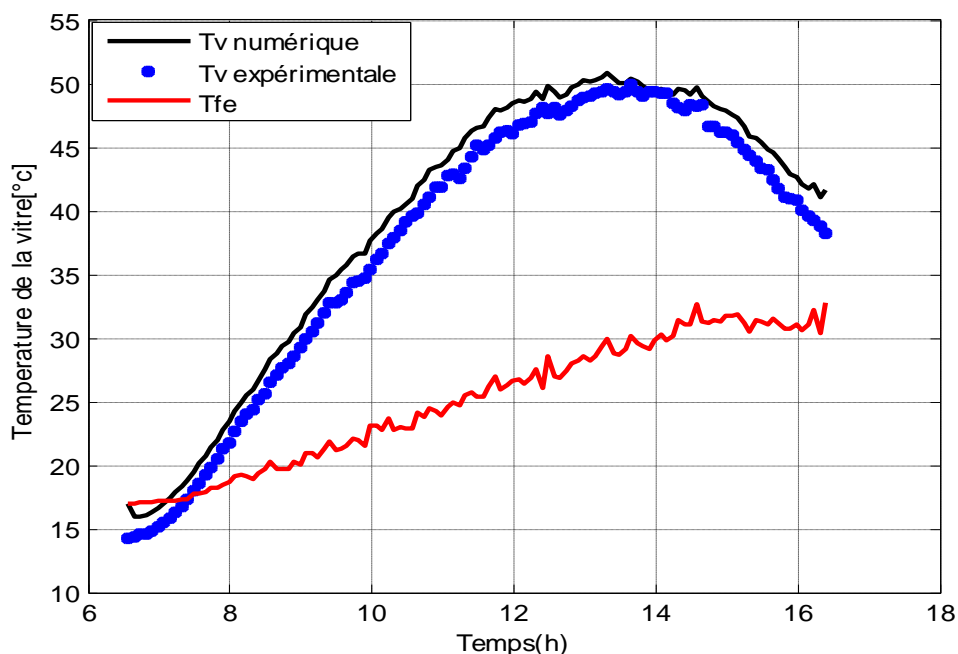


Figure IV.14: Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CF

La figure (IV.14) représente la comparaison entre la températures de la vitre simulée et expérimentale et la température du fluide à la sortie (la température ambiante comme référence); on observe un petit écart entre la température du vitrage numérique et

expérimentale à leur valeur maximal 50 °C dans l'intervalle [12h-14h], puis elle diminue après ce temps.

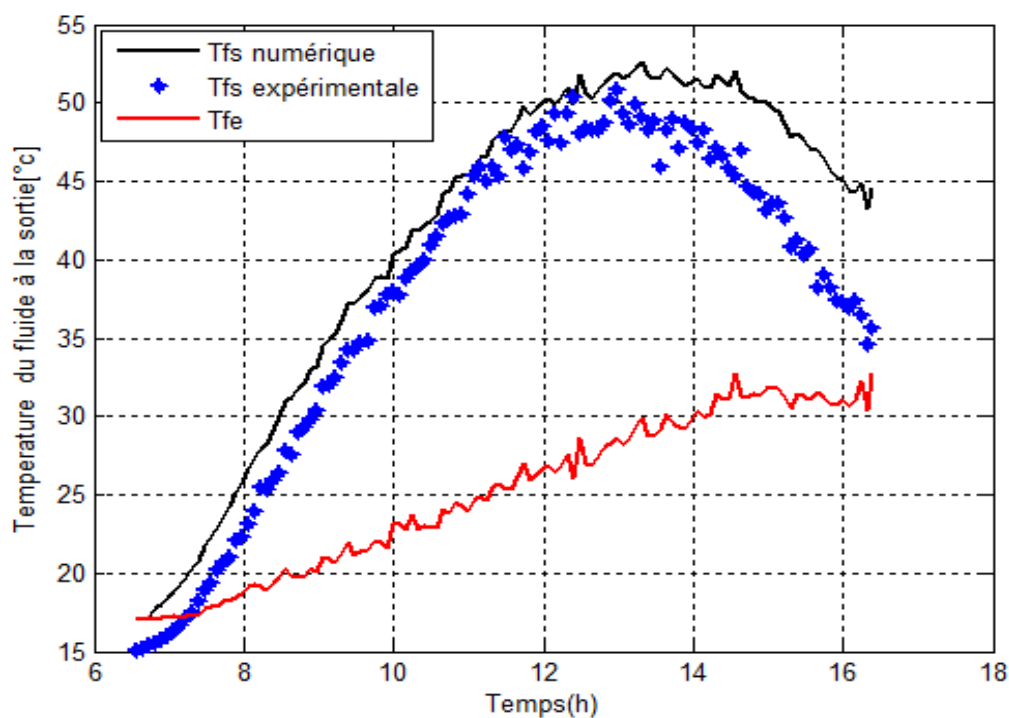


Figure III.15: Comparaison entre la température du fluide sortant simulée et expérimentale en CF

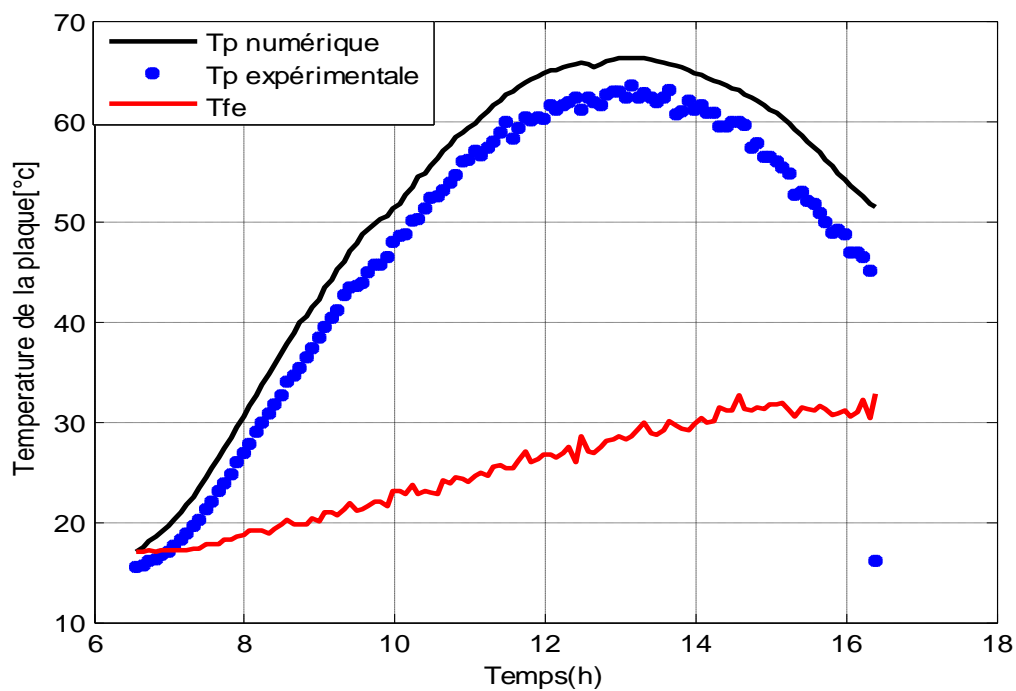


Figure III.16: Comparaison entre la température de la plaque absorbante simulée et expérimentale en CF

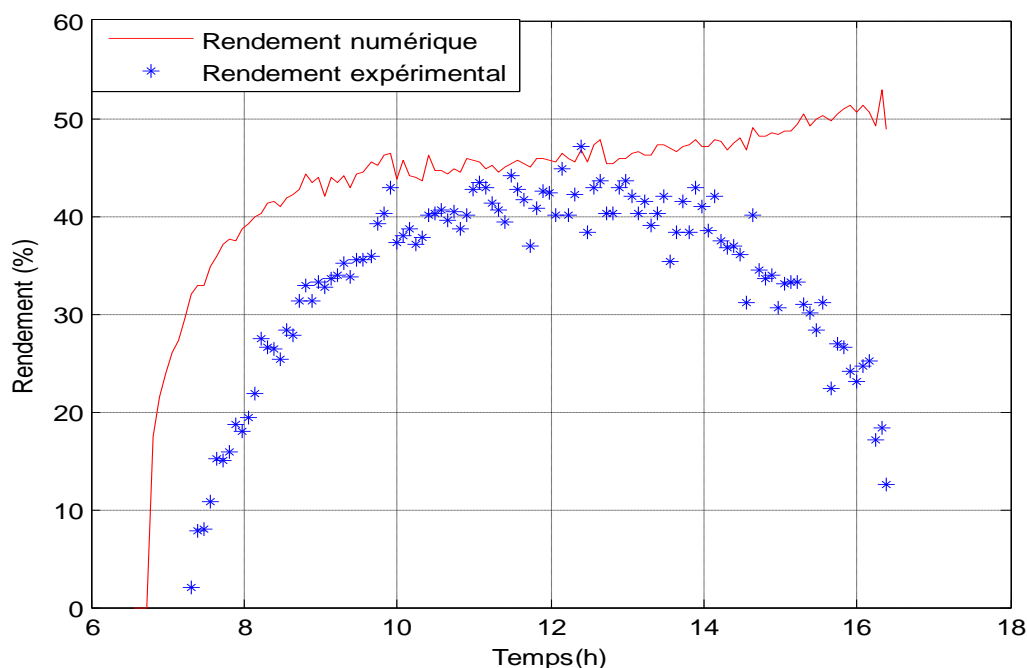


Figure IV.17 : Comparaison entre le rendement simulé et expérimental en CF

On peut dire que les valeurs numériques et expérimentales sont en bonne analogie (cohérence) avec un faible écart entre les deux; Cet écart observé à cause de la différence des conditions climatiques comme (fluctuation : du rayonnement solaire, de la vitesse du vent, la température ambiante dans une journée) et aussi à cause de l'estimation des propriétés des différents composants du capteur solaire à air (conductivité et coefficient d'absorption de la plaque absorbante).

IV.6. Conclusion

Au sein de l'unité de recherche et énergies renouvelables en Adrar, nous avons étudié du capteur solaire à air, fonctionnant à convection naturelle puis en convection forcée, les températures obtenues par ce capteur solaire à air étudié étaient suffisantes (acceptables) pour le séchage de plusieurs produits (fruits et légumes). attendu que la comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats simulés ont montrés la validation de notre modèle de simulation.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif de notre mémoire concerne l'étude de la contribution à l'amélioration de fonctionnement d'un capteur solaire plan à air destiné aux applications du séchage solaire, particulièrement dans les périodes nocturnes. Les expériences ont porté sur la simulation numérique et expérimental du capteur solaire sans et avec intégration d'un matériau à changement de phase dans le but de stocker l'énergie thermique disponible en excès pendant le jour (paraffine wax à $T_f=56^\circ\text{C}$) par chaleur latente. La simulation du capteur solaire sans et avec un MCP dans le sens de montrer l'effets du l'absence et la présence du stockage de l'énergie thermique sur le fonctionnement de capteur solaire à air puis sur les produits agro-alimentaires séchés particulièrement dans la nuit.

Les résultats obtenus dans cette étude, dans le cas d'absence du MCP, montrent que le modèle de simulation proposé présente une grande concordance avec l'expérimental, à savoir : la température de plaque, du fluide à la sortie du capteur, le vitrage et la chaleur utile. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration du MCP ont montré que le MCP prolonge la durée de fonctionnement du capteur solaire à air : d'une durée allant jusqu'à 3h et demi et une température de fonctionnement d'environ 56°C , qui est très favorable pour le séchage solaire; en plus ont montré une nette amélioration sur les performances thermiques de notre système, notamment l'abaissement de la température de fonctionnement de 75°C à 55°C pendant la journée, et l'augmentation de cette dernière de 35°C environ à 55°C après le coucher du soleil.

Donc on peut résumer que l'utilisation d'un MCP à une température de fusion convenable au séchage des produits alimentaires permet d'obtenir une température de fonctionnement très adéquate pendant le jour, de récupérer la chaleur emmagasinée sous forme de chaleur latente (fusion et solidification) et l'utiliser en période nocturne et d'avoir aussi une température de fonctionnement très favorable et stable durant la nuit.

Nous avons pu retenir quelques points en suggestions et perspectives :

- La réalisation expérimentale du système étudié dans le cas: de présence du MCP
- L'intégration du capteur solaire à air étudié dans un système de séchage pour le tester et valoriser les résultats obtenus : l'effet sur les produits séchés.
- Le test du système à différentes périodes de l'années.

- L'utilisation des chicanes peut engendrer des améliorations remarquable sur le capteur (le rendement thermique).
- L'utilisation des différentes épaisseur du même matériau à changement de phase et puis plusieurs à changement de phase de natures différentes.
- Etude expérimentale du matériau à changement de phase en dessous et en dessus de la plaque absorbante puis les comparer.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Houhou Hatem , « Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire De Certains Produits Agro-alimentaires », Mémoire De Magister En Génie Mécanique , Université De Biskra, p 9-35-39.
- [2] F. Khaldia, Z. Boussaid , « Détermination expérimentale et modélisation des isothermes de sorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) à différentes températures »,mémoire master académique, 2017 université Ahmed draia Adrar p.14.
- [3] A. Boulemtafes , D. Semmar, « Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect »,Rev énergies renouvelables,(1999)97-100.
- [4] <https://www.google.dz/search>.
- [5] A.Degla.R.Sioud, « séchage solaire des dattes deglet-nour : simulation numérique », mémoire master académique, domaines sciences thermiques, 6/6/2015, p.3-16.
- [6] Boumediene Touati, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha virida*) »,Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen , doctorat,11/2008.
- [7] A.Ouahab, M.Elkouzani , « Etude Théorique et Expérimentale de deux types de Capteurs Solaires thermiques plans sur Site d'Adrar »,master en physique Energétique, 06/2015, Université d'Adrar .
- [8] Djabouabdellah Abdelmadjid, « Etude et mesure des données solaires d'un Gisement solaire dans une zone isolée », Université d'Adrar Ahmed draia, 2014/2015.
- [9] Amraoui Mohammed Amine, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité »,mémoire de magister en génie mécanique, 2011/2012, p.45-46-64-70.
- [10] Ben hamza Abderrahmane, « Simulation Numérique d'un capteur solaire plan utilisant des Matériaux à changement de phase », Université KASDI Merbah d' Ouargla, Belkhir ,Soutenu Publiquement , 31/05/2016,p. 5-21.
- [11] Younsi sidi ali, « Etude bidimensionnelle d'un capteur solaire à tube sous vide avec un échangeur en épingle » , Mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali Chleff, 2011, p. 14-18.
- [12] Bourgueba djaoued, BEKKOUCHE Ismail, « Simulation Numérique du stockage de l'énergie par Chaleur Latente »,Université Abou Baker Belkaid-Tlemcen, 2013-2014, p. 27-27-29-30.

[13] M.Mogharbi,D.Halassa, « Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air »,Université Kasdi Merbah de ouargla,faculté des sciences technologie et sciences de la matière,Mémoire Master,2010/2011.

[14] Z.Belkacem, « Etude comparative de différentes configurations de capteur solaire plan à air »,Université d'Adrar, Faculté des sciences et de la technologie, Mémoire Master,2013/2014,p.33-59.

[15] « Aide-mémoire du thermicien », Edition 1997,le livre existe dans la bibliothèque de l'unité de recherche et énergies renouvelables en Adrar.

[16] « Amélioration du confort d'été sur des batiments à ossature légère par des matériaux à changement de phase », <http://www.jnlog.com/pdf/ibpsa2007.pdf>), J. Noël, S.lepers.J.virgone.

[17] <https://www.google.com/search>, la date 31/5/2018,l'heure 18h32.

[18] <http://www.gampt.de/content/cms/index.phy>.

[19] <https://www.google.com/search>.

[20] <http://www.youtube.com>

[22] <https://www.google.dz/>

Annexes

1. Les données météorologiques de la journée 1 mai 2018

1.1. Rayonnement solaire :

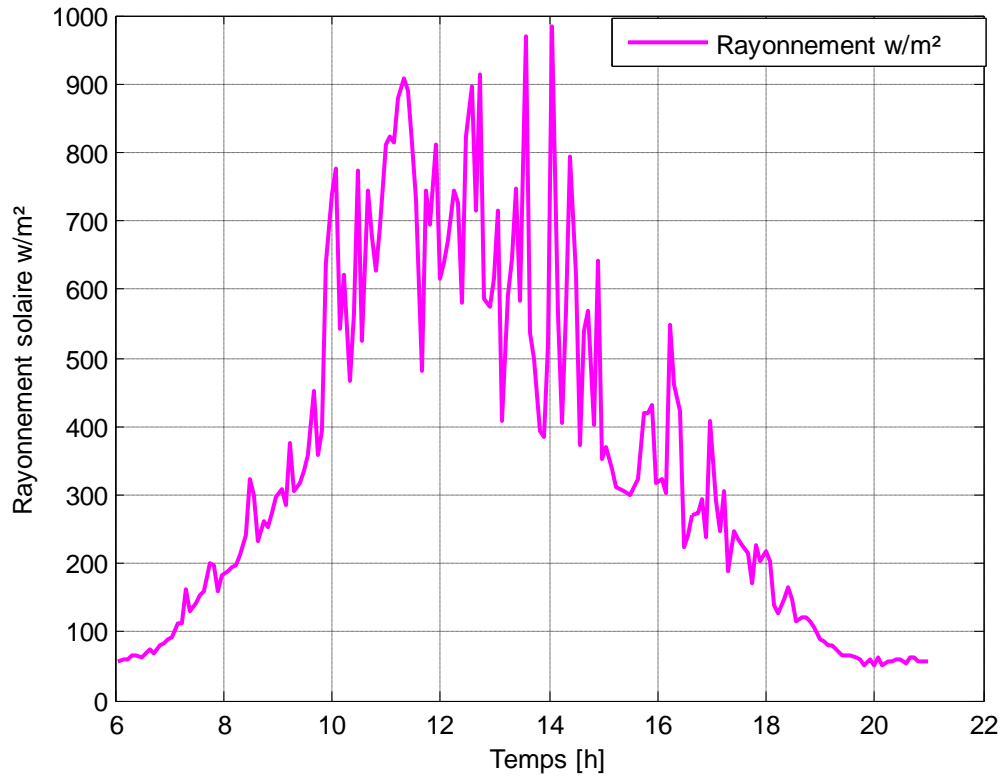


Figure1: La variation temporelle du rayonnement solaire de la journée 1/5/2018

La figure(1) représente la variation du rayonnement solaire en fonction du temps ,on observe que le rayonnement solaire dans cette journée est très perturbé.

1.2. Température ambiante :

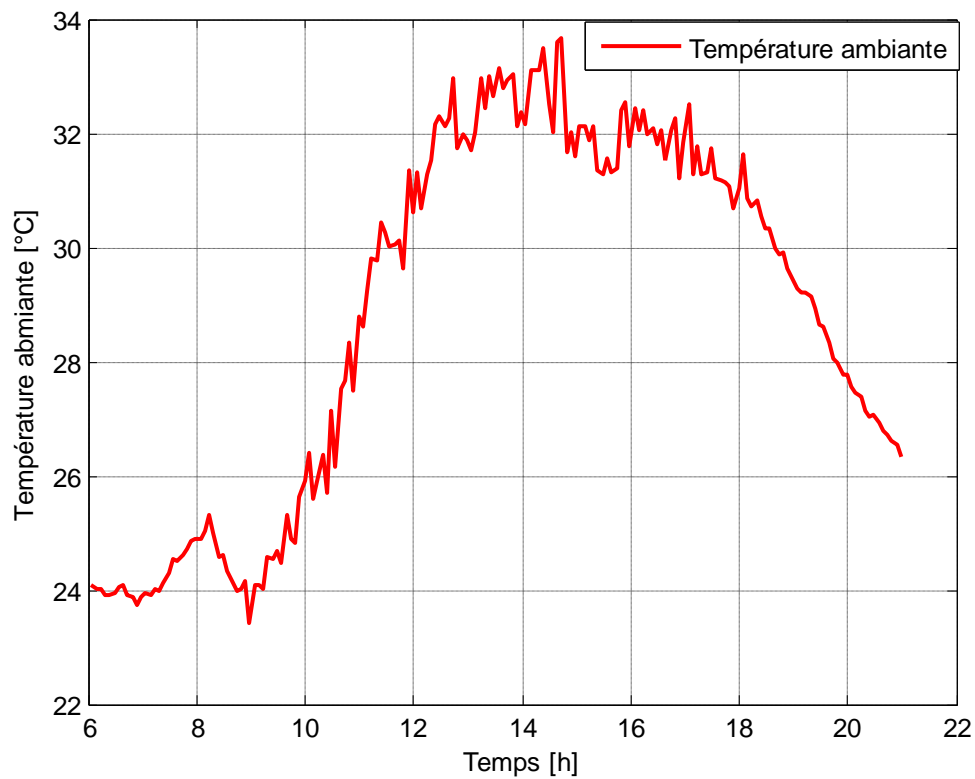


Figure2: La variation temporelle de température ambiante de la journée 1/5/2018

La figure (2) représente la variation de la température ambiante en fonction du temps ,on observe que la température ambiante dans cette journée est très perturbée.

Annexes
