



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

UNIVERSITÉ AFRICAINE AHMED DRAIA ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

Thèse

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Option : Physique des Matériaux.

Présentée par : Mr. MEDIANI AHMED

Intitulée

Amélioration Des Performances et Optimisation D'un Capteur Solaire

Soutenue le : 01/03/2020

Devant le Jury Composé de :

Président	Mr BOUSSAID Mohamed	MCA	Université Adrar
Promoteur	Mr. BENATIALLAH ALI	Professeur	Université Adrar
Examineur	Mr. MAOUEDJ Rachid	MRA	URERMS Adrar
Examineur	Mr. BOUCHOUICHA Kada	MRA	URERMS Adrar
Examineur	Mr. BENHAMOU Mohammed	MRA	URERMS Adrar
Examineur	Mr. HARROUZ Abdelkader	MCA	Université Adrar

Année universitaire 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَالصَّلَاةَ وَالسَّلَامَ عَلَى أَشْرَفِ الْأَنْبِيَاءِ وَالْمُرْسَلِينَ

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés à l'URERMS-Adrar, présentée par son Directeur Monsieur le Dr. SADOK Mohamed, et à l'aide du laboratoire LEESI, (Laboratoire d'Energies et Systèmes d'Informations); dirigé par son Directeur Monsieur le Dr. S. KALLOUM. Que les deux Directeurs trouvent ici mes remerciements les plus sincères.

J'adresse également mes remerciements à mon Directeur de thèse, Monsieur BENATIALLH Ali, Professeur à l'Université d'Adrar; pour sa disponibilité, son orientation et notamment ces conseils.

Je souhaite remercier également les différents membres de mon jury, le président Mr Le Dr. BOUSSAID Mohamed, maître de conférences à l'université d'Adrar, d'avoir accepté de présider ce jury, ainsi les membres examinateurs: Mr le Dr. BENHAMOU Mohammed, maître de recherche A à l'URERMS, Mr le Dr. MAOUEDJ Rachid, maître de recherche A à l'URERMS, Mr le Dr. BOUCHOUICHA Kada, maître de recherche A à l'URERMS et Mr le Dr. HARROUZ Abdelkader, maître de conférences A à l'université d'Adrar, d'avoir accepté examiner et corriger ce modeste travail.

Je souhaite remercier tous les membres de l'équipe de séchage solaire de l'URERMS pour leur aide et soutien et mes collègues: Mrs: HAZEM Ahmed, LARBI Ahmed Amine, Tahri Ahmed, BENCHERIF Lalla et MOUNGAR Houcine, qu'ils trouvent ici mes sincères reconnaissances.

Je remercie toutes personnes qui ont contribué de proche ou de loin à la réalisation de ce travail,

Je remercie enfin les membres de ma famille qui ont toujours été à mes côtés à la réalisation de ce modeste travail.

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Nomenclature	v
Introduction générale	1
Chapitre I : Caractéristiques générales du rayonnement solaire	
I.1. Introduction	4
I.2. Constitution physique du soleil	4
I.3 Les grandeurs astronomiques	5
I.3.1. Le temps solaire vrai TSV	5
I.3.2. Les coordonnées terrestres	7
I.4. Composantes du rayonnement solaire	10
I.4.1. Le rayonnement direct	11
I.4.2. Le rayonnement diffus	12
I.4.3. Le rayonnement solaire global	12
I.4.4. Le rayonnement réfléchi	13
I.5. Modèles de Calcul du rayonnement solaire	14
I.5.1. Le modèle de Liu et Jordan (1963)	15
I.5.2. Modèle de PERRIN BRICHAMBEUT	16
I.6. Station des mesures météorologiques :	17
Chapitre II : Etude Du Capteur Solaire Thermique Et Stockage De La Chaleur	
II.1. Introduction	21
II.2. Etat de l'art-Travaux Scientifiques des Capteurs Solaires Thermiques	23
II.4. Principaux Types de capteurs solaires thermiques	23
II.4.1. Le capteur plan	23
II.4.2. Le capteur à air	24
II.4.3. Le capteur à tube sous vide	24
II.4.4. Le capteur cylindro-parabolique	24
II.4.5. Le capteur parabolique	25
II.4.6. Capteurs non-vitrés(ou capteurs « moquette »)	25
II.5. Simulation numérique d'un capteur solaire à air sans et avec MCP	26

II.5.1. Principe de captation du rayonnement solaire	26
II.6. Propriétés thermo-physiques	26
II.7. Le bilan thermique globale de la paroi absorbante	27
II.7.1 Bilan thermique d'un capteur plan en régime permanent s'écrit	27
II.7.2 Rendements d'un capteur solaire :	28
II.8. Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire à air	29
II.8.1. Capteur solaire à air plan simple	29
II.8.2. Echanges thermiques par rayonnement	30
II.8.3. Echange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste	31
II.8.4. Echange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre	31
II.8.5. Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol	31
II.8.6. Echange thermique par conduction	32
II.8.7. Echanges thermiques par convection	32
II.8.8. Échange thermique par convection dû au vent	32
II.8.9. Échange thermique par convection dû au contact fluide caloporteur-capteur	33
II.9. Calcul des pertes thermiques	34
II.10. Expressions analytiques du bilan énergétique	35
II.10.1. Pour la couverture transparente	35
II.10.2. Pour le fluide caloporteur	35
II.10.4. Pour l'isolant	36
II.11 Calcul des pertes thermiques	37
II.12 Expressions analytiques du bilan énergétique	38
II.12.1 Pour la couche du verre	38
II.12.2 Pour le fluide caloporteur	39
II.12.3 Pour la plaque absorbante	40
II.12.4 Pour l'isolant	41
II.13 Capteur solaire avec ailettes	41
II.13.1 Modélisation des coefficients d'échanges thermiques	42
II.13.2 Échange thermique par rayonnement	42
II.13.3. Calcul des pertes thermiques	43
II.13.4. Expressions analytiques du bilan énergétique	44
II.13.5. Système d'équations global	46
II.14 Capteur solaire avec ailettes et MCP	46

II.15. Méthode de résolution	47
II.15.1. Modèle thermique	48
II.15.2. Algorithme de calcul	51
II.17. Résultat et discussion	52
II.17.1. Les données météorologiques	52
II.17.2. Températures des différents composants du capteur solaire en CN	53
II.18. Capteur solaire à air sans MCP en convection forcée	56
II.18.1. Simulation numérique du capteur solaire à air avec MCP	56
II.18.2. L'effet du matériau à changement de phase.	56
II.18.3. Deuxième cas : MCP (le pas de la différence de la température égal 5 °C)	60
II.18.4. L'effet du matériau à changement de phase sur le fluide sortant	61
II.19. Capteur simple en convection naturelle	62
II.20. capteur en convection forcée	66
II.21. Capteur simple et à ailette avec et sans MCP en CN	70
II.22. Conclusion	73

Chapitre III: Isotherme De Sorption Pour Les Différents Produits Alimentaires

III.1. Introduction	74
III.1.1 Dattes Takarboucht, Tegazza, Hmira et le Cœur de Palmier :	76
III.1.2 Prélèvement des dattes Takarboucht/Tegazza et le cœur de palmier :	76
III.2.1 Matériel et mode opératoire	78
III.3 Résultats Expérimentaux et Simulation :	82
III.3.1 Isotherme de désorption de dattes :	82
III.3.2 Isotherme de désorption de cœur de palmier :	84
III.4 Modélisation des Courbes :	84
III.4.1 Modélisation des Courbes par les modèles empiriques :	84
III.5 Détermination de la chaleur isostérique de sorption :	92
III.5.1 Détermination de la chaleur isostérique de sorption pour les dattes Hmira:	92
III.5.2 Détermination de la chaleur isostérique de sorption pour dattes Tegazza :	92
III.6 Conclusion :	96

Chapitre IV: Séchage solaire

IV.1. Introduction	98
IV.2. Généralités sur le séchage solaire	98
IV.2.2. Propriétés de l'air de séchage	98

IV.2.2.1. Humidité absolue	98
IV.2.2.2. Humidité relative	99
IV.2.2.3. Températures caractéristiques de l'air humide	99
IV.2.2.3.1. Température sèche «Température de bulbe sec »	99
IV.2.2.3.2. Température humide «Température de bulbe humide »	100
IV.2.2.3.3. Température de rosé (Point de rosée)	100
IV.2.4. Caractéristiques des solides humides	101
IV.2.4.2. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche) :	101
IV.2.4.3. Humidité relative (teneur en eau à base sèche) :	102
IV.3. Mesure de l'humidité	103
IV.3.1. Hygromètre à cheveux	103
IV.3.2. Thermo-hygrographe	103
IV.4. Modes de séchage	104
IV.5. Transfert de la masse	105
IV.6. Choix du procédé de séchage	105
IV.7. Processus de séchage	105
IV.8. Vitesse de séchage	106
IV.9. Cinétique du séchage	106
IV.10. Types de séchoirs solaires	107
IV.10.1. Les séchoirs solaires directs	107
IV.10.2. Les séchoirs solaires indirects	108
IV.10.3. Les séchoirs mixtes	110
IV.10.4. Les séchoirs hybrides	110
IV.10.4. Cinétique de séchage solaire de produits alimentaires : tomates et absinthe	111
IV.11. Conclusion	116
Conclusion générale	118
Références bibliographiques	121
Annexe	129
ملخص	
Résumé	
Abstract	

Liste des figures

Figures	Titres	Page
Figure I.1	L'orbite terrestre	4
Figure I.2	Variation annuelle de l'équation de la correction du temps	6
Figure I.3	Les angles zénith, azimut et altitude	7
Figure I.4	Variation annuelle de la déclinaison solaire	8
Figure I.5	Rayonnement direct sur une surface inclinée	9
Figure I.6	Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre	11
Figure I.7	Rayonnement global, diffus et direct normal pour la journée du 17/01/15	18
Figure I.8	Variation journalière de la vitesse du vent pour la journée du 17/01/15	19
Figure I.9	Température ambiante et l'humidité relative pour la journée du 17/01/15	19
Figure I.10	Rayonnement global, diffus et direct normal pour la journée du 17/07/15	19
Figure I.11	Variation journalière de la vitesse du vent pour la journée du 17/07/15	20
Figure I.12	Température ambiante et l'humidité relative pour la journée du 17/07/15	20
Figure II.1	Capteur thermique à concentration	22
Figure II.2	Capteur solaire thermique	23
Figure II.3	Capteur solaire plan	23
Figure II.4	Capteur à air	24
Figure II.5	Capteur à tube sous vide	24
Figure II.6	Système à réflecteur cylindro-parabolique	25
Figure II.7	Capteur parabolique	25
Figure II.8	Capteurs solaires sans-vitrage	25
Figure II.9	Schéma de principe du capteur solaire plan à air	26
Figure II.10	Différents échanges thermiques dans un capteur à air	30
Figure II.11	Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air.	30
Figure II.12	Évolution de l'échange thermique dans la lame d'air pour une longueur élémentaire	39
Figure II.13	schématisation des flux thermique dans un capteur solaire à ailettes	42
Figure II.14	Représentation schématique d'échanges thermiques dans le capteur avec MCP et ailettes	47
Figure II.15	Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution du système	50
Figure II.16	Rayonnement solaire de la journée 17/07/2015	52
Figure II.17	La température ambiante de la journée 17/07/2015	53
Figure II.18	La variation de température de la plaque absorbante en convection naturelle	53
Figure II.19	La température du fluide à la sortie en CN	54
Figure II.20	La variation temporelle de la température de la vitre en CN	54
Figure II.21	la variation de la puissance utile en convection naturelle	55
Figure II.22	Rendement thermique simulé du capteur en CN	55

Figure II.23	La température de la plaque sans et avec MCP	57
Figure II.24	La température du MCP et fluide sortant sans et avec MCP	59
Figure II.25	La chaleur latente à la sortie du avec et sans MCP	60
Figure II.26	La température du MCP et de la plaque de l'absorbeur sans et avec MCP	
Figure II.27	La température du fluide sortant sans et avec MCP.	61
Figure II.28	La chaleur latente à la sortie du avec et sans MCP	62
Figure II.29	Capteurs solaires à air	62
Figure II.30	La variation temporelle des températures expérimentales en CN	63
Figure II.31	La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CN	63
Figure II.32	Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CN	64
Figure II.33	Comparaison entre température du fluide sortant simulée et expérimentale en CN	65
Figure II.34	Comparaison entre la température de la plaque absorbante simulée et expérimentale en CN	65
Figure II.35	Comparaison entre la puissance utile simulée et expérimentale en CN	66
Figure II.36	Le ventilateur utilisé dans le capteur solaire(CF)	66
Figure II.37	Les températures expérimentales en convection forcée	67
Figure II.38	La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CF	67
Figure II.39	Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CF	68
Figure II.40	Comparaison entre les températures du fluide sortant théorique et expérimentale	69
Figure II.41	Comparaison entre la température de la plaque absorbante simulée et expérimentale en CF	69
Figure II.42	Comparaison entre le rendement simulé et expérimental en CF	69
Figure II.43	La variation temporelle du rayonnement solaire de la journée de 24/02/2020	70
Figure II.44	Températures des différentes composantes du capteur simple de 24/02/2020	71
Figure II.45	Les températures des différents composants du capteur solaire à air avec chicane	71
Figure II.46	Les températures de différentes composantes du capteur avec chicane et MCP	72
Figure II.47	La variation instantanée du rendement thermique des capteurs solaires à air : simple (a), aux chicane (b) et aux chicane avec MCP (c).	72
Figure III.1	Echantillon des dattes tegazza, takarboucht et cœur de palmier	76
Figure III.2	La composition physicochimique des dattes de takarboucht	77
Figure III.3	La composition physicochimique du Cœur De Palmier	78
Figure III.4	Appareillage pour la détermination des isothermes de sorption	79
Figure III.5	Schéma explicatif de détermination des isothermes de sorption	80
Figure III.6	Isotherme de désorption de Dattes Hmira: Points expérimentaux à trois températures de travail	82
Figure III.7	Isotherme de désorption de Dattes Tegazza : Points expérimentaux à trois températures de travail	83
Figure III.8	Isotherme de désorption de cœur de palmier	83
Figure III.9	Les courbes des isothermes des dattes Hmira décrites par le modèle de GAB pour les différentes températures	85

Figure III.10	Les courbes des isothermes des dattes Hmira décrites par le modèle de Peleg pour les différentes températures	85
Figure III.11	Les courbes des isothermes les dattes Hmira décrites par le modèle de BET pour les différentes températuresCN	86
Figure III.12	Les courbes des isothermes des dattes Tegazza lissées par le modèle de GAB pour les différentes températures	87
Figure III.13	Les courbes des isothermes des dattes Tegazza lissées par le modèle de Peleg pour les différentes températures	88
Figure III.14	Les courbes des isothermes les dattes Tegazza lissées par le modèle de BET pour les différentes températures absorbante en CF	88
Figure III.15	Isothermes expérimentaux d'adsorption du cœur de palmier à 40 (a), 50 (b) et 60 ° C (c) simulés par le modèle LANGMUIR	90
Figure III.16	isothermes expérimentaux d'adsorption du cœur de palmier à 40 (a), 50 (b) et 60 ° C (c) simulés par GAB modifié	91
Figure III.17	Isostères de désorption pour les dattes Hmira	92
Figure III.18	Chaleur isostérique nette de désorption de dattes Hmira en fonction de la teneur en eau d'équilibre	93
Figure III.19	Isostères de désorption pour les dattes Tegazza	94
Figure III.20	Chaleurisostériques nette de désorption de dattes Tegazza en fonction de la teneur en eau d'équilibre	94
Figure III.21	Courbes d'isostères de désorption pour le palmier entendre	95
Figure III.22	Chaleur de désorption isostérique en fonction de la teneur en eau d'équilibre du cœur de palmier	95
Figure IV.1	Volume de contrôle microscopique	101
Figure IV.2	Description du solide humide	102
Figure IV.3	Les différents types d'eau dans le matériau	102
Figure IV.4	: Hygromètre à cheveux	103
Figure IV.5	Thermo-hygrographe	103
Figure IV.6	L'allure de la vitesse de séchage en fonction du temps	107
Figure IV.7	Séchoirs solaires directs simples	108
Figure IV.8	séchoir solaire de type indirect	109
Figure IV.9	Chambre du séchoir solaire indirect	109
Figure IV.10	Séchoir solaire mixte	110
Figure IV.11	Séchoir solaire hybride.[111
Figure IV.12	Séchoirs mixte et hybride (PVT)	112
Figure IV.13	Préparation des produits à sécher	113
Figure IV.14	Système d'acquisition de données	113
Figure IV.15	Températures des composants du séchoir hybride	113

Figure IV.16	Températures des composants du séchoir mixte	114
Figure IV.17	températures et humidités du séchoir mixte	114
Figure IV.18	Températures et humidités du séchoir hybride	115
Figure IV.19	Cinétique de séchage de l'absinthe dans les deux séchoirs solaires	115
Figure IV.20	Cinétique de séchage de tomate dans le séchoir mixte	116
Figure IV.21	Cinétique de séchage de tomate dans le séchoir hybride	116

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1.	Liste des jours types par mois proposés par	5
Tableau I.2.	Valeurs typiques de l'albédo du sol	13
Tableau I.3.	Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère	17
Tableau II.1	Propriétés thermo-physiques des différents composants d'un capteur	27
Tableau II.2	propriété physique des matériaux à changement de phase	46
Tableau III.1	La composition physicochimique des dattes Takarboucht	77
Tableau III.2	La composition physicochimique du Cœur De Palmier	77
Tableau III.3	Principaux modèles mathématiques pour décrire les isothermes de sorption	81
Tableau III.4	paramètres des modèles des isothermes de désorption des dattes Hmira pour les Trois températures	84
Tableau III.5	paramètres des modèles des isothermes de désorption des dattes Tegazza pour les Trois températures	86
Tableau III.6	Résultats de l'ajustement des isothermes de sorptio	90
Tableau III.7	les valeurs d'activité d'eau pour des valeurs fixes de la teneur en eau au températures 40 et 60°C pour les dattes deHmira	92
Tableau III.8	Estimation des Paramètres de l'équation empirique (II-11) pour les dattes Hmira	93
Tableau III.9	les valeurs de l'activité d'eau pour desvaleurs fixes de la teneur en eau au températures 40 et 60°C pour dattes Tegazza	93
Tableau III.10	Estimation des Paramètre de l'équation empirique (II-11) pour dattes Tegazza	94

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	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 .°c
ε_v	Emissivité de la couche du verre	
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.c
e_i	L'épaisseur du composant i	M
h_c	Coefficient d'échange par convection	W/m ² .°c
D	plus petite dimension géométrique du problème en m	M
λ_f	Conductivité thermique du fluide	W/m.°c
ρ_f	masse volumique du fluide en	kg/m ³
L	Longueur du capteur	M
G	Rayonnement solaire global incident	w/m ²
$Q_{stockée}$	La chaleur sensible	J
M	La masse du matériau de stockage	Kg
ΔT	La différence entre température finale et initiale	°C
L_f	Chaleur latente de changement d'état du matériau	J/kg
c_{pf}	chaleur spécifique du fluide caloporteur	J/kg.°C
T_{fe}	Température du fluide entré	°C
T_{fs}	Température du fluide sortie	°C
T_{pm}	Température moyenne de la paroi absorbante	°C
λ	Conductivité thermique	w/m.k
U_v	Vitesse du vent	m/s
C_p	Chaleur spécifique	J/kg.k
L_s	Chaleur latente de fusion	J/kg
Q	Quantité de la chaleur	J
α_A	Coefficient d'absorption de l'absorbeur	%
τ_V	Coefficient de transmission de la vitre	%
h_c	Coefficient d'échange convective	W/m ² .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	°C
T_p	Température de la plaque absorbante	°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 ارتباطاً وثيقاً بالأداء الصحيح لمجمع أو لاقط الطاقة الشمسية ، وهو الجزء الأكثر أهمية ، حيث يوفر الحرارة اللازمة ، ويحول الإشعاع الشمسي المستلم إلى حرارة قابلة للاستغلال ، و لكن يظل انخفاض كفاءته و مردوبيته و انقطاعه عن العمل خلال الليل أو في غياب الشمس ، يشكلان مصدر قلق للعديد من الباحثين. من بين الحلول المقترحة: استخدام الأشكال المختلفة للزعانف ومواد تغيير الطور (MCP). قمنا بمحاكاة تشغيل المجمع الشمسي واختبرناه بشكل تجريبي ، وينتج عن المحاكاة في كلتا الحالتين: الحمل الحراري الطبيعي أو الحمل القسري ، ويظهر تحسناً بنسبة 15 % للنموذج مع الزعانف ، و 20 % للنموذج بإضافة MCP. تتيح إضافة MCP الحفاظ على درجة حرارة التشغيل عند حوالي 50 درجة مئوية وتمديد عمل النظام إلى 3 ساعات بعد غروب الشمس وأكثر من ذلك. كما تمت دراسة تجفيف المنتجات الغذائية: الطماطم و نبتة الشببة الطبية ، كتطبيق لدمج هذه النظم في مجففات بالطاقة الشمسية ، وتم تحديد التقدير التجريبي لطواهر الإمتصاص ثابتة الحرارة لأصناف التمر المحلية مثل لحميرة و تقربوشة ، بالإضافة إلى قلب النخيل: الجمار. كما تمت نمذجتها لاستخراج المعلومات الديناميكية الحرارية لهذه المنتجات خاصة بالنموذج الموافق للمواد الغذائية GAB .

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

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, restent le faible rendement et le fonctionnement de ces systèmes durant la nuit ou en absence du soleil, un souci pour plusieurs chercheurs. Parmi les solutions proposées: l'utilisation de différentes formes d'ailette et les matériaux à changement de phase. 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, montrent une amélioration de 15% pour la configuration avec ailettes, et 20% en ajoutant le MCP. L'ajout d'un MCP permet le maintien de la température de fonctionnement à environ 50°C et la prolongation de fonctionnement du système à 3h après le coucher du soleil et plus.

L'étude de séchage des produits alimentaires: la tomate et l'absinthe, comme application d'intégration de ces systèmes dans des séchoirs solaires a été évaluée, la détermination expérimentale des isothermes de sorption des variétés de dattes locales et le cœur du palmier a été faite, et modélisée afin d'arracher les informations thermodynamiques nécessaires pour le séchage et le stockage de ces produits.

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

Abstract

The operation of the solar dryer is strongly linked to the proper functioning of the solar collector, which is the most important part, providing the necessary heat, transforming the received solar radiation into heat, remain the low efficiency and the operation of these systems during the night or in the absence of the sun, a concern for several researchers. Among the solutions proposed: the use of different fin shapes and phase change materials. We simulated the operation of the solar collector and tested it experimentally, the simulation results in both cases: natural convection or forced convection, show an improvement of 15% for the configuration with fins, and 20% by adding the MCP. The addition of an MCP allows the operating temperature to be maintained at around 50 ° C and the system to be extended to 3 hours after sunset and more.

The drying study of food products: tomatoes and wormwood, as an application for integrating these systems in solar dryers was evaluated, the experimental determination of sorption isotherms of local date varieties and the heart of palm been made and modeled in order to extract the thermodynamic information for these products by using GAB model.

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

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du soleil, gratuite et renouvelable et non polluante par excellence. Ce rayonnement est constitué de photons, les composants fondamentaux du spectre solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le soleil.

L'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse et de toutes formes de vie et d'énergies sur terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou encore biomasse.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- ✓ Conversion Photovoltaïque qui transforme à l'aide des panneaux photovoltaïques le rayonnement solaire en électricité ;
- ✓ Conversion Thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur en utilisant des panneaux thermiques. Les conversions thermodynamiques font partie des conversions thermiques et se différencient d'elles par la production de l'électricité.

Alors cette énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire dans les applications suivantes:

Chauffe-eau, chauffages, cuiseurs, rafraîchissement, dessalement et séchages solaires ;

On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz (dit « fluide caloporteur ») qui la transporte vers un réservoir de stockage ou une enceinte de séchage dans notre cas.

Les obstacles ou inconvénients majeurs rencontrés dans ces installations sont:

- Le dysfonctionnement du système: absence total ou partiel du soleil (passage nuageux ou coucher du soleil).

- Le faible rendement du capteur thermique, et par conséquent du séchoir solaire.

D'autre part, l'excès de production saisonnière des produits agroalimentaires dans la région d'Adrar: comme la tomate, quelques variétés de dattes, où la nécessité de la transformation pour le stockage et le prolongement de la disponibilité des produits durant toute l'année, par exemple le cas des plantes médicinales, exigent le séchage solaire de ces produits, afin de les conserver et les stocker tout en préservant la qualité nutritive et hygiénique.

Pour répondre à ces exigences, l'objectif de cette étude est l'amélioration des performances thermiques du capteur solaire à air, en introduisant différentes configurations, à titre d'exemple: l'utilisation des chicanes ou obstacles dans la veine d'air, afin d'augmenter la surface d'échange thermique entre la plaque et le fluide caloporteur qui donne lieu à l'amélioration du rendement de système objet.

D'autre part, l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) permet d'augmenter la durée de fonctionnement durant la période nocturne, ce qui est favorable pour optimiser la température de fonctionnement du système, en absorbant et stockant la chaleur en excès pendant la journée, et la restituer après le coucher du soleil.

Plusieurs séchoirs conçus à l'URERMS – Adrar, ont été expérimentés en séchant différents produits alimentaires et quelques plantes médicinales. Les isothermes de désorption et d'adsorption des variétés dattiers (L'hmira par exemple) de la région d'Adrar et quelques plantes médicinales comme l'absinthe ont été réalisées au laboratoire avant d'entamer l'opération de séchage.

Notre contribution dans cette étude se repartie comme suit:

1^{ère} contribution : l'intégration de différentes formes de chicanes de type carré au capteur thermique

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

3^{ème} contribution : la détermination expérimentale des isothermes de sorption de différents produits étudiés, en utilisant la méthode gravimétrique des solutions salines saturées, la modélisation de ces courbes permet le calcul de la chaleur isostérique et la prédiction du temps de stockage des produits à sécher.

4^{ème} contribution : le séchage solaire des produits agroalimentaires et la détermination des courbes de cinétique de séchage et la détermination des modèles appropriés.

Ce travail a été effectué dans l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URMER) d'ADRAR, au sein de l'équipe de séchage solaire. Alors la thèse est structurée comme suit :

Le 1^{er} chapitre : est consacré à une introduction aux rayonnement et gisement solaire.

Le 2^{ème} chapitre : donne l'état de l'art sur les capteurs solaires, l'utilisation des MCP et l'application que nous avons menée, ainsi les équations mathématiques et le bilan thermique utilisé pour la simulation du capteur solaire à air, les outils utilisés, les différents capteurs solaires étudiés; les résultats obtenus et leur discussion.

Le 3^{ème} chapitre : contient les différentes méthodes de détermination des isothermes de sorption, les produits étudiés et leurs propriétés physico-chimiques, les courbes des isothermes et leur simulation.

La détermination des chaleurs isostériques et le temps de stockage font la tâche finale de ce chapitre

Le 4^{ème} chapitre : dans ce chapitre nous présentons les séchoirs solaires conçus et expérimentés, étudions la cinétique de séchage de quelques produits agroalimentaires. En fin, une conclusion générale résume les principaux résultats et les perspectives pour ce travail.

Cette thèse est dotée par des annexes contenant les appareils utilisés, les publications, les travaux antérieurs.

Chapitre CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

I

Dans cette partie, nous nous proposons de présenter les modèles de calcul du rayonnement solaire instantanés (direct, diffus et global) en un lieu quelconque et à un instant quelconque de la journée ou de l'année.

Ce calcul nécessite tout d'abord la connaissance des mouvements relatifs de la terre et du soleil, c'est la raison pour laquelle nous ferons quelques rappels élémentaires d'astronomie. Ainsi nous présentons les mesures expérimentales de ces grandeurs dans le site D'Adrar.

I.1. Introduction

L'Algérie est caractérisée par son énorme gisement solaire, en l'occurrence les régions du Sud où l'intensité radiative atteinte dépasse les 1200 w/m^2 avec une durée d'insolation peut atteindre les 14 heures par jour durant la période estivale et particulièrement. Il est primordial, du point de vue économique et écologique, d'utiliser les énergies renouvelables gratuites et non polluantes.

L'énergie solaire peut être convertie en énergie thermique ou en énergie photovoltaïque. L'étude du séchage solaire nécessite une bonne connaissance du gisement solaire. Pour cela, nous proposons d'étudier théoriquement et expérimentalement le processus de séchage solaire, afin de connaître les paramètres influençant l'opération du séchage solaire, pour améliorer son rendement.

I.2. Constitution physique du soleil

Le diamètre de soleil est d'environ $1\,391\,000 \text{ km}$, sa masse est de l'ordre de $1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$. La distance moyenne à la terre est de $149\,450\,000 \text{ km}$. Le minimum de cette distance se situe vers le solstice hivernal et le maximum durant le solstice estival [1].

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que de $\pm 1.7\%$ par rapport à la distance moyenne. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut $23^\circ 27'$.

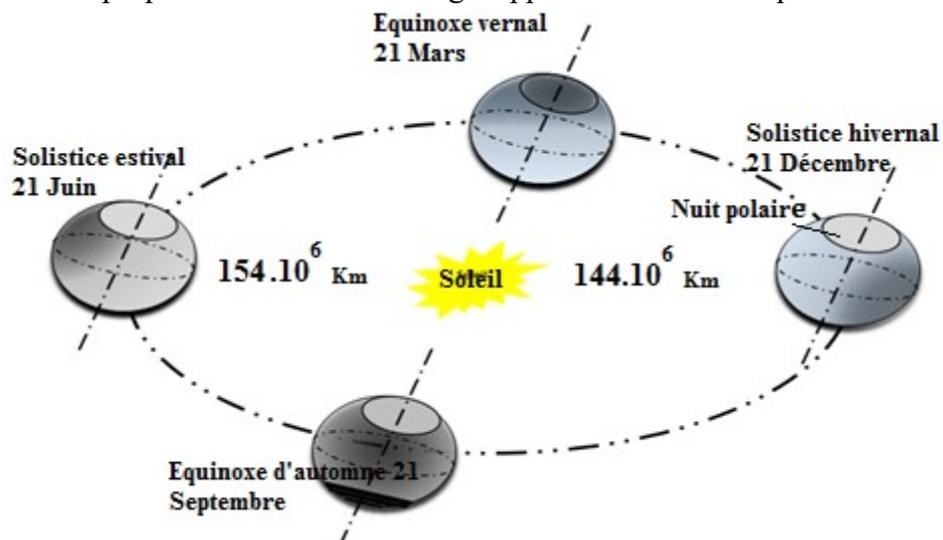
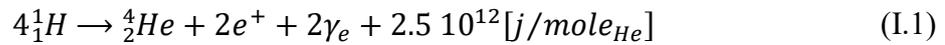


Figure N°I.1. L'orbite terrestre ($1\text{AU}=1,496 \times 10^8 \text{ KM}$)

Le soleil émet une énergie provenant d'une suite de réactions thermonucléaires qui s'écrivent :



La masse du soleil est égale à 2.10^{30} Kg et il contient 30% d'hydrogène. L'âge du soleil est estimé à 5.10^9 ans. Pendant toute sa vie il n'a dépensé que 14% de ses réserves d'énergie.

I.3. Les grandeurs astronomiques

Il est possible de déterminer les journées types mensuelles définie par une déclinaison caractéristique, et qui ont une irradiation quotidienne égale à la moyenne mensuelle. Le jour recommandé pour chaque mois avec le numéro du jour correspondant de l'année sont données dans le tableau ci-dessous [1].

Tableau N°I.1. Liste des jours types par mois proposés par [1].

Mois	Jour type	N° de jour
Janvier	17	17
Février	16	47
Mars	16	75
Avril	15	105
Mai	15	135
Juin	11	162
Juillet	17	198
Aout	16	228
Septembre	15	258
Octobre	15	288
Novembre	14	318
Décembre	10	344

I.3.1. Le temps solaire vrai TSV

Utilisé dans tous les angles solaires apparaissant dans les corrélations. C'est le temps basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil à travers le ciel, à midi solaire, le moment de passage du soleil par le méridien de l'observateur.

Pour passer du temps légal au TSV, il y a lieu d'apporter la correction suivante [1,2] :

$$TSV = TSM + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{60} = TL - 1 + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{15} \quad (I.2)$$

Avec :

ϕ : Longitude du site,

TL: Temps local du site,

TSM: Temps solaire moyen,

E : Equation de correction du temps, elle est donnée par [3] :

$$E = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma)(229.18) \quad (I.3)$$

Le premier terme entre parenthèse donne E en radian. Il faut multiplier par 229.18 pour le convertir en minutes.

$$\Gamma = 2\pi \frac{(n-1)}{365} \quad (I.4)$$

Γ : L'angle de jour ;

n : le numéro du jour de l'année (n = 1 au 1^{er} janvier)

La figure N° I.2., illustre la variation annuelle de la valeur de la correction du temps apporté par l'équation (I.3).

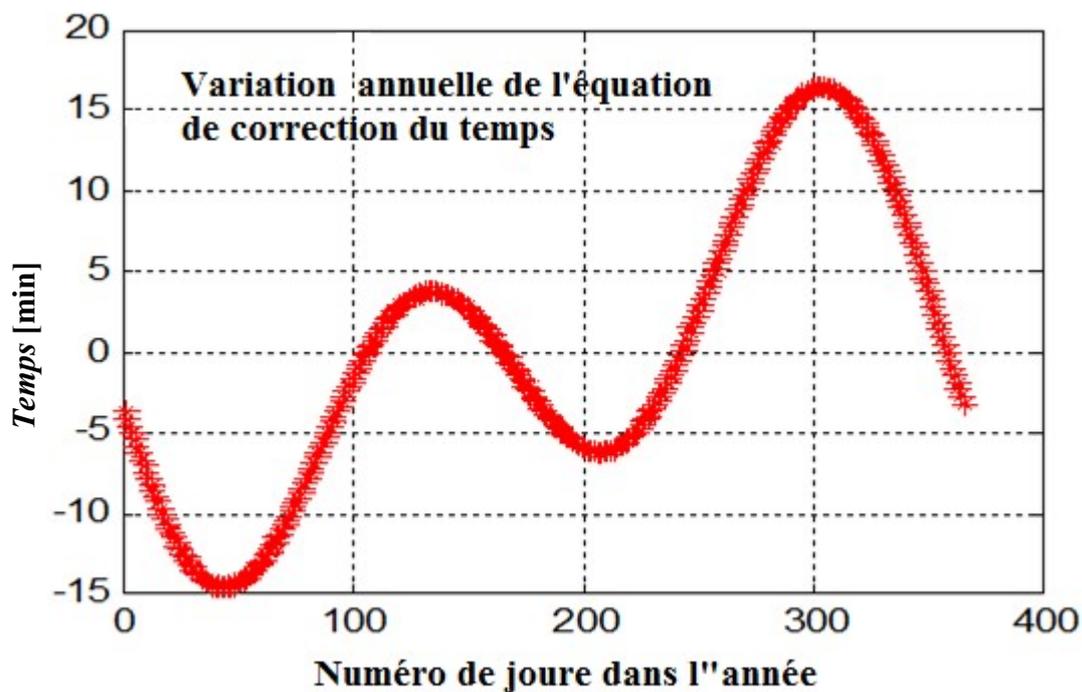


Figure N° I.2. Variation annuelle de l'équation de la correction du temps.

I.3.2. Les coordonnées terrestres

Voici la définition de certains angles astronomiques :

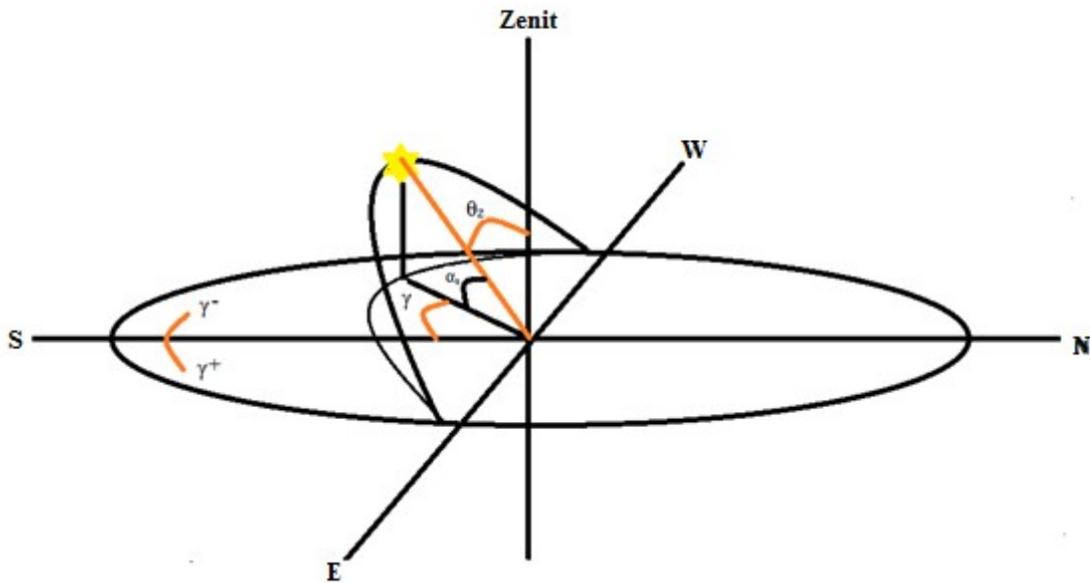


Figure N° I.3. Les angles zénith, azimut et altitude

➤ **La latitude ϕ**

C'est la localisation angulaire d'un point au nord ou au sud de l'équateur. Sa valeur est comprise entre (-90°) au Sud et $(+90^\circ)$ au Nord de l'équateur $(-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ)$.

➤ **La déclinaison δ**

C'est la position angulaire du soleil à midi solaire lorsque le soleil passe par le méridien local par rapport au plan de l'équateur. Il est positif au nord et négatif au sud. La valeur de δ est comprise entre (-23.45°) et $(+23.5^\circ)$, δ est positif au printemps et en été, négatif en automne et en hiver (Figure N°20).

La déclinaison étant une fonction continue du temps, sa variation au cours de l'année peut être calculée par l'équation [1,2] ;

$$\delta = (0.006918 - 0.3399912 \cos \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.00907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (I.5)$$

n : le numéro du jour de l'année.

Cette équation donne l'angle solaire avec une précision de 0.0006 rad.

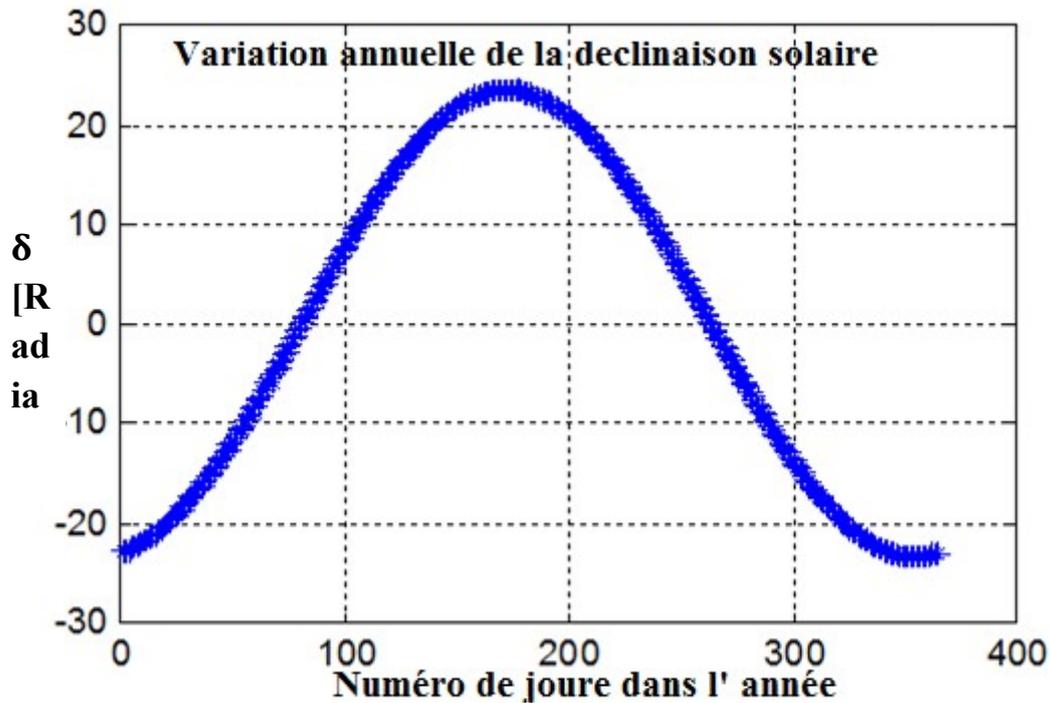


Figure N° I.4. Variation annuelle de la déclinaison solaire.

➤ **L'inclinaison β de la surface**

C'est l'angle que fait le plan de la surface en question avec l'horizontale. ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$)

➤ **L'azimut de la surface γ**

C'est l'angle décrit par la déviation de la projection de la normale à la surface sur un plan horizontal par rapport au méridien local. $\gamma = 0$ au Sud, négatif à l'Est et positif à l'Ouest. ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$)

➤ **L'angle horaire ω**

C'est le déplacement angulaire du soleil à l'Est ou à l'Ouest du méridien local, dû à la rotation de la terre autour de son propre axe, à raison de 15° par heure. Négatif avant midi et positif après-midi.

$$\omega = 15(T_{sv} - 12) \quad (I.6)$$

D'autres angles supplémentaires sont définis pour déterminer la position du soleil dans le ciel :

➤ **L'angle du zénith θ_z**

L'angle entre la verticale et la ligne du soleil est donc l'angle d'incidence d'un rayonnement direct sur une surface horizontale.

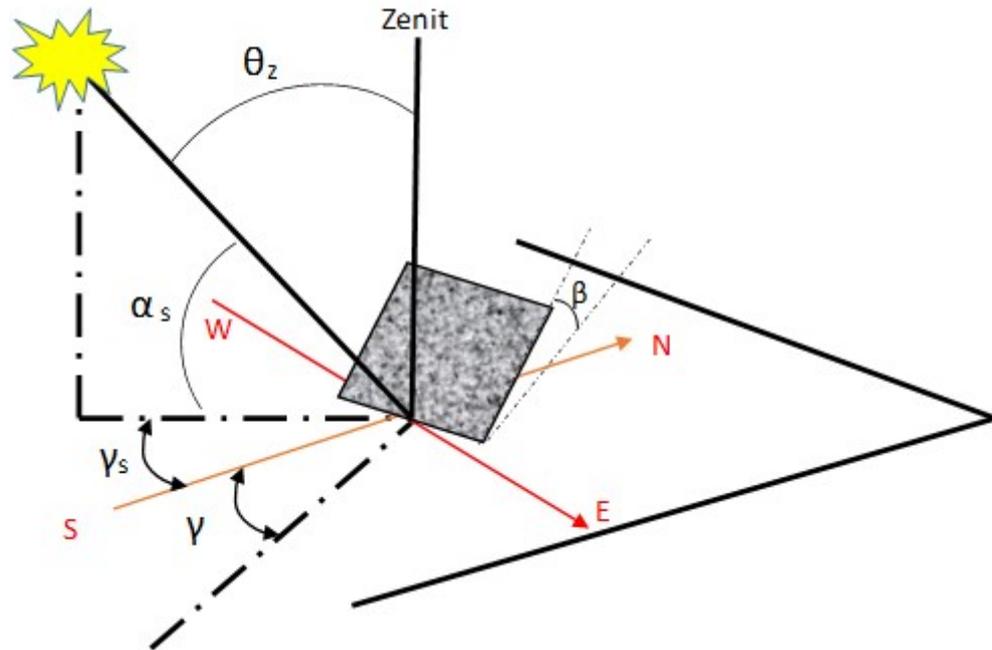


Figure N° I.5. Rayonnement direct sur une surface inclinée.

➤ **La hauteur du soleil α_s**

La hauteur du soleil est décrite par l'angle entre l'horizontale et la ligne du soleil, c'est à dire l'angle complémentaire de l'angle du zénith.

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \omega \cos \phi \cos \delta \quad (\text{I.7})$$

➤ **L'azimut solaire γ_s**

C'est le déplacement angulaire, à partir du sud, de la projection du rayonnement direct sur le plan horizontal. Négatif vers l'Est et positif vers l'Ouest.

La figure (I.5) illustre ces différents angles[1,2].

➤ **Angle d'incidence θ du rayonnement direct sur une surface**

C'est l'angle que fait la direction du rayonnement solaire direct sur une surface avec la normale à cette surface. Il existe une relation qui lie les différents angles à l'angle d'incidence du rayonnement direct θ sur une surface[1,2].

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{I.8})$$

et

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (\text{I.9})$$

Minimiser la valeur de cet angle revient à maximiser le flux du rayonnement direct sur une surface.

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (\text{I.10})$$

Les surfaces avec une inclinaison β par rapport à l'horizontale peuvent être assimilées à une surface horizontale à une latitude artificielle de $(\phi - \beta)$. L'équation (I.7) conduit dans ce cas à :

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (\text{I.11})$$

Il existe un facteur géométrique R_b qui intervient pour évaluer le rapport entre un rayonnement direct sur un plan incliné et un rayonnement direct sur un plan horizontal (Figure N°I.5) :

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (\text{I.12})$$

I.4. Composantes du rayonnement solaire

Les radiations solaires arrivent au sommet de l'atmosphère sous forme d'ondes électromagnétiques. Elles se subdivisent, premièrement, en deux parties (Figure N°I.6) :

- La première est directement réfléchiée vers l'espace avant de pénétrer dans l'atmosphère.
- La deuxième partie s'enfonce dans l'atmosphère, subit des réfractions et des diffractions pour être à son tour soit, renvoyée vers l'espace soit, vers la terre.

En outre, dans l'atmosphère, la vapeur d'eau et de multiples gaz absorbent certaines radiations selon leurs longueurs d'ondes. Par exemple, la vapeur d'eau est le premier responsable de l'absorption des rayons infrarouge. Les radiations absorbées par les composantes de l'atmosphère sont ensuite émises dans toutes les directions. Il en résulte que parmi les radiations solaires arrivant finalement à la terre, quelques-unes sont fournies par les nuages et les autres composantes de l'atmosphère. En arrivant au sol, une fraction est réfléchiée directement vers le ciel, l'autre est reçue par la terre.

Nous pouvons regrouper les rayonnements solaires parvenant au sol en trois composantes principales qui sont [1,2]:

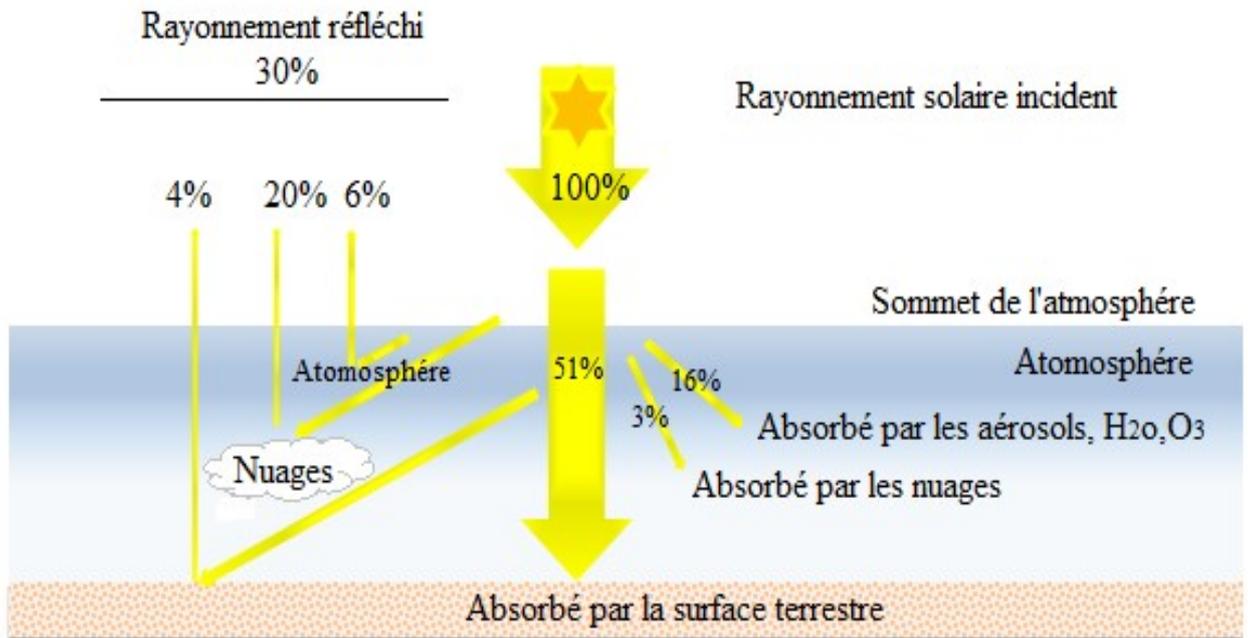


Figure N° I.6. Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre. [1,2]

I.4.1. Le rayonnement direct

C'est le rayonnement parvenant directement du disque solaire et reçu sur un plan normal. Il est mesuré au moyen d'un pyréliomètre que l'on installe de façon que sa surface réceptrice soit orientée perpendiculairement aux rayons solaires, sur un support à la hauteur d'un mètre et demi du sol. Son axe de rotation doit être parallèle à celui de la terre.

Nous pouvons également estimer la valeur du rayonnement solaire direct par calcul en utilisant la formule suivante [1,2]:

$$I = I_0 \sin(\alpha_s) \quad (\text{I.13})$$

Où I est calculé par la formule suivante :

$$I = I_s \cdot a_*^m \quad (\text{I.14})$$

Avec :

$$m = 1 / \sin(\alpha_s).$$

a : coefficient de transmission.

α_s : Hauteur du soleil.

I_s : l'éclairement énergétique au niveau du sol sous un ciel clair à incidence normale, qui se déduit de la constante solaire I_s .

La constante solaire dépend surtout de la distance terre soleil et de l'angle d'incidence. C'est pour cela que la quantité d'énergie reçue du soleil à la limite supérieure de l'atmosphère est égale à $I_s \sin(\alpha_s)$. Elle est estimée à 1350 W/m².

1.4.2. Le rayonnement diffus

C'est le rayonnement parvenant de toute la voûte céleste à l'exception du disque solaire. Il s'agit du rayonnement de l'atmosphère dont la longueur d'ondes varie de 0.3 à 5 microns, diffusé par les aérosols, les gouttelettes et la vapeur d'eau vers le sol, reçu sur une surface horizontale. Le mécanisme de la diffusion est dû au changement d'indice optique du milieu traversé par les rayons solaires.

1.4.3. Le rayonnement solaire global

C'est le rayonnement solaire parvenant de la voûte céleste et du disque solaire sous un angle solide θ reçu sur un plan horizontal. Il est mesuré à l'aide d'un radiomètre (pyranomètre).

Le rayonnement solaire global, parvenant au sol sur une surface horizontale, est la somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus. Il est désigné par la lettre G, nous obtenons la formule suivante [1,2] :

$$G = I_s \sin(\alpha_s) + D \quad (\text{I.15})$$

Le rayonnement solaire global est mesuré avec le même instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire diffus en mettant la thermopile du pyranomètre en position ouverte vers le ciel et le soleil.

Le rayonnement solaire global peut être estimé à partir des formules semi empiriques.

Par exemples, celle d'ANGSTRÖM :

$$G = G_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (\text{I.16})$$

où

G_0 : La somme quotidienne du rayonnement solaire extra-terrestre reçu sur une surface horizontale.

n : durée d'insolation effective, mesurée à l'aide d'un héliographe.

N : durée d'insolation théorique, c'est-à-dire la durée du jour astronomique.

a et b doivent être déterminés expérimentalement ; ils varient d'un lieu à un autre et d'un intervalle de temps à un autre, d'après ANGSTRÖM avec $a = 0.235$ et $b = 0.78$. [2]

1.4.4. Le rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi est la composante de l'éclairement par la surface terrestre, cette composante est prise en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée, elle dépend essentiellement du type de surface.

La fraction d'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente est appelée Albédo. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Il dépend fortement de la nature du sol et l'état de la surface. L'albédo total du système Terre/Atmosphère vaut environ 0.3 ce qui signifie que 30% du rayonnement solaire est réfléchi et 70% est absorbé.

L'albédo des forêts est proche de 0.15, celui des surfaces désertiques vaut environ 0.35, tandis que celui des surfaces englacées s'élève à 0.6. On peut citer quelques valeurs moyennes typiques pour différentes sortes de sols ou d'états de surface [5].

Tableau N° 1.2. Valeurs typiques de l'albédo du sol [5].

Nature du sol	Valeur	Valeur moyenne
Sable sec	0,1 à 0,4	0,25
Désert	0,2 à 0,4	0,3
Prairies, herbages	0,2 à 0,3	0,25
Forêt	0,1 à 0,2	0,15
Neige fraîche	0,7 à 0,8	0,8
Neige fondante	0,5 à 0,7	0,6
Habitat très dense	0,1 à 0,2	0,15

Par ailleurs, pour un même type de sol, la valeur de l'albédo varie avec la longueur d'onde. Elle peut être plus grande que la valeur moyenne de l'albédo.

Par exemple, l'albédo de la neige avoisine 1 pour les petites longueurs d'onde tandis qu'elle est égale à 0 pour les grandes. Il est donc nécessaire de prendre en compte la distribution spectrale de l'albédo du sol.

Nous pouvons mesurer le rayonnement réfléchi à l'aide d'un Pyranomètre de façon que son organe sensible soit orienté vers le sol ou vers la surface émettrice. A défaut de cet instrument, nous employons la formule, basée sur le principe que tout corps à une température supérieure à 0° Kelvin émet de l'énergie rayonnante :

$$E = \varepsilon \delta T^4 \quad (\text{I.17})$$

Dans laquelle E représente l'énergie émise, ε le coefficient d'émissivité, δ la constante de STEFAN BOLTZMANN ; $\delta = 5.6697.108 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ et T la température absolue.

L'énergie solaire varie en fonction de :

- La latitude du lieu.
- L'orientation et l'inclinaison du plan de collecte.
- La saison (maxima en été, minima en hiver).
- La situation atmosphérique (ciel clair ou couvert).
- La hauteur du soleil sur l'horizon (maxima à midi solaire).

I.5. Modèles de Calcul du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire global reçu sur une surface inclinée peut être écrit comme suit [1];

$$I = I_b R_b + I_{d-iso} F_{c-s} + I_{d-cs} R_b + I_{d-hz} F_{c-hz} + I_{g\rho_g} F_{c-g} \quad (\text{I.18})$$

Avec :

I : le rayonnement global incident sur une surface inclinée,

I_b : rayonnement direct incident sur une surface horizontale

I_{d-iso} : rayonnement solaire diffus reçu uniformément de la voûte céleste, incident sur une surface inclinée,

I_{d-cs} : rayonnement solaire diffus reçu de la circonférence du soleil, incident sur une surface inclinée,

I_{d-hz} : rayonnement solaire diffus reçu de la bande d'horizon, incident sur une surface inclinée,

I_g : le rayonnement global incident sur une surface horizontale.

1.5.1. Le modèle de Liu et Jordan (1963)

Dans ce modèle, le rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée est supposé être composé de trois éléments : le rayonnement solaire direct, le rayonnement solaire diffus isotropique (celui qui arrive uniformément de la voûte céleste indépendamment de sa direction) et enfin le rayonnement solaire diffus réfléchi par le sol. Le troisième et le quatrième terme de l'équation (18) sont considérés nuls. Ainsi, le rayonnement global incident direct sur une surface inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale est calculé par l'équation suivante[1,2]:

$$I_{\beta} = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (I.19)$$

Avec :

$I_{b\beta}$: Éclairement solaire direct incident sur une surface inclinée ;

$$I_{d\beta} = I_{bh} R_b,$$

I_{bh} : Éclairement solaire direct incident sur une surface horizontale ;

$$I_{bh} = 1367 \cdot f \cdot \tau_b \cos(\theta),$$

f : La correction de la distance terre-soleil ;

$$f = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(n - 2)\right), \tau_b = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\sin(h)}}$$

$$a_0 = a_0^* r_0, \quad a_1 = a_1^* r_1, \quad k = k^* r_k$$

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2, \quad a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2,$$

$$k^* = 0.2711 + 0.00858(2.5 - A)^2$$

$$A = 0.264[km], r_0 = 1.03, r_1 = 1.01, r_k = 1$$

$I_{d\beta}$: Éclairement diffus incident sur un plan incliné,

$$I_{d\beta} = I_{dh} F_{C-S},$$

I_{dh} : Éclairement diffus incident sur un plan horizontal ;

$$I_{dh} = 1367 f \tau_d \cos(\theta)$$

$$\text{Avec } \tau_d = 0.271 - 0.294 \tau_b$$

F_{C-S} : Facteur de vue de la surface du collecteur vers le ciel ;

$$F_{C-S} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$I_{r\beta}$: Éclairement solaire réfléchi par le sol incident sur un plan incliné ;

$$I_{r\beta} = I_{gh} \rho F_{C-g},$$

I_{rl} : Éclairement solaire réfléchi par le sol incident sur un plan horizontal ;

$$I_{gh} = I_{bh} + I_{dh}$$

F_{C-g} : Facteur de vue de la surface du collecteur vers le sol ;

$$F_{C-g} = \frac{1 - \cos\beta}{2}.$$

1.5.2. Modèle de PERRIN BRICHAMBEUT

Dans ce modèle, le rayonnement solaire global reçu sur une surface inclinée d'un angle β par rapport au plan horizontal est donné par la formule [4] ;

$$I_g = I_{b\beta} + I_{d\beta} \quad (\text{I.20})$$

Avec:

$I_{b\beta}$: Éclairement direct incident sur un plan incliné ;

$$I_{b\beta} = A \cos(\theta) e^{\frac{-1}{B \sin((h)+2)}} \quad (\text{I.21})$$

$I_{d\beta}$: Éclairement diffus incident sur un plan incliné ;

$$I_{d\beta} = \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_h + \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \rho_g G_h \quad (I.22)$$

D_h : Éclairement diffus reçu par une surface horizontale :

$$D_h = A_1 (\sin(h))^{0.4}, \quad (I.23)$$

G_h : Éclairement global reçu par une surface horizontale :

$$G_h = A_2 (\sin(h)) B_1, \quad (I.24)$$

ρ_g : étant l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol) ; $\rho_g = \begin{cases} 0.9 \text{ à } 0.8 & \text{Neige} \\ 0.8 \text{ à } 0.4 & \text{Sol clair} \\ 0.4 \text{ à } 0.2 & \text{Verdure} \end{cases}$

A, A1, A2, B, B1 sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère. [4]

Tableau N° I.3. Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère

État de l'atmosphère	A	A ₁	A ₂	B	B ₁
Ciel bleu foncé	1300	87	1150	6	1.25
Ciel bleu clair	1230	125	1080	4	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	187	990	2.5	1.25

I.6. Station des mesures météorologiques :

Les données illustrées ont été enregistrées par la station (NEAL), qui est installée sur le toit de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URERMS) Adrar. La ville d'Adrar est localisée dans le Sud-Ouest de l'Algérie, d'une superficie totale d'environ 427300 km². Son climat désertique aride caractérisé par des températures très élevées dépassant les 45 ° C et un rayonnement solaire intense avec un maximum de 1200 W / m² durant la période estivale, mesuré sur une surface horizontale pendant la longue et la courte période, figure N°I.7 et I.10. Il n'y a pratiquement aucune précipitation toute l'année à Adrar. En outre, les vents sont très fréquents tout au long de l'année, voir figure N°I.8 et I.11, dont la vitesse du vent peut toucher les 10 m/s, et a une moyenne de 4 m/s.

L'humidité relative touche les 40 ou les 50 dans les périodes hivernales, et ne dépasse pas les 15% durant les périodes estivales, comme le montrent les figures N°.I.9 et I.12.

Ses coordonnées géographiques sont : la Latitude Nord $27^{\circ} 53'$, la Longitude Est $0^{\circ} 18'$ et l'Altitude 264 m au-dessus du niveau de la mer.

Les données météorologiques mesurées sont présentées ci-dessous en graphes, les courbes de la variation de la température ambiante, la vitesse du vent et l'intensité du rayonnement solaire incident GHI, DHI et DNI, qui signifient respectivement le rayonnement global horizontal, le rayonnement diffus horizontal et le rayonnement direct normal.

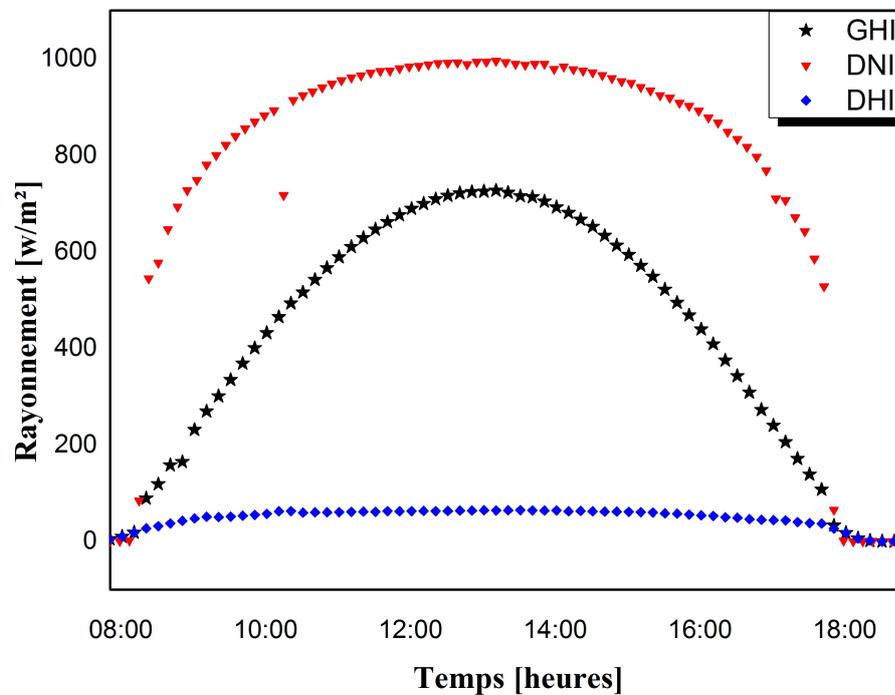


Figure N° I.7. Rayonnement global, diffus et direct normal pour la journée du 17/01/15

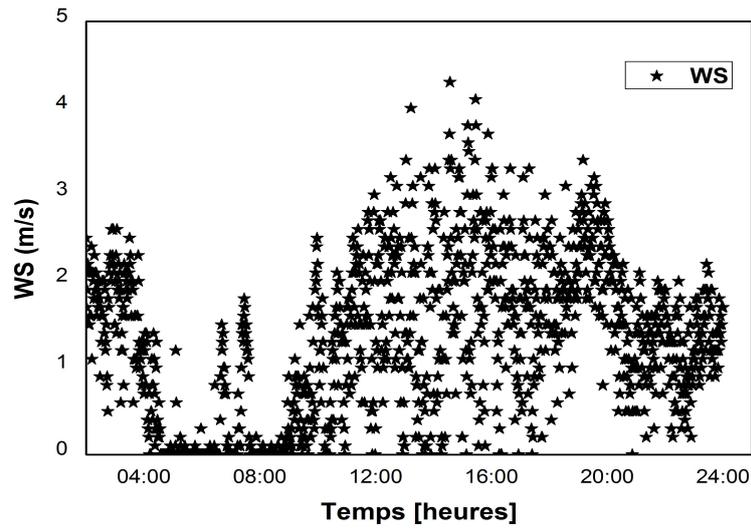


Figure N° I.8. Variation journalière de la vitesse du vent pour la journée du 17/01/15

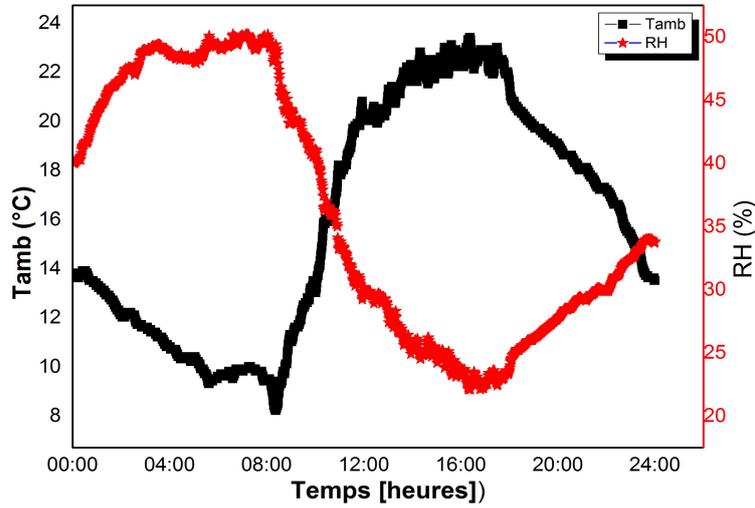


Figure N° I.9. Température ambiante et l'humidité relative pour la journée du 17/01/15.

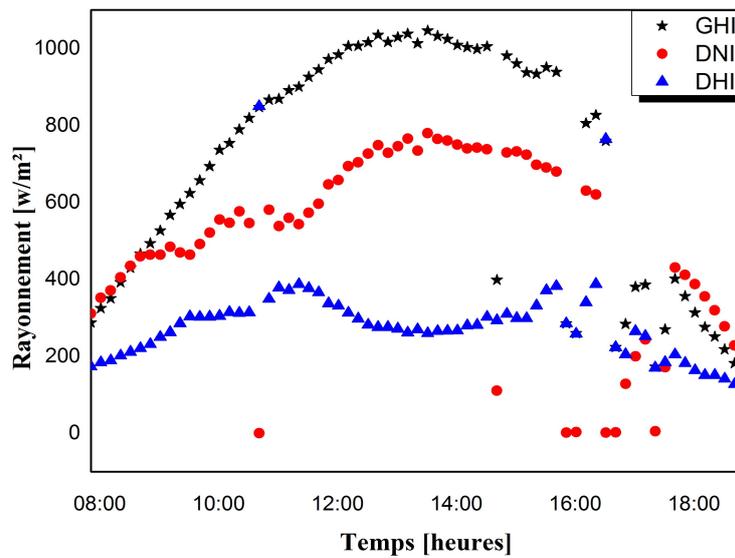


Figure N° I.10. Rayonnement global, diffus et direct normal pour la journée du 17/07/15

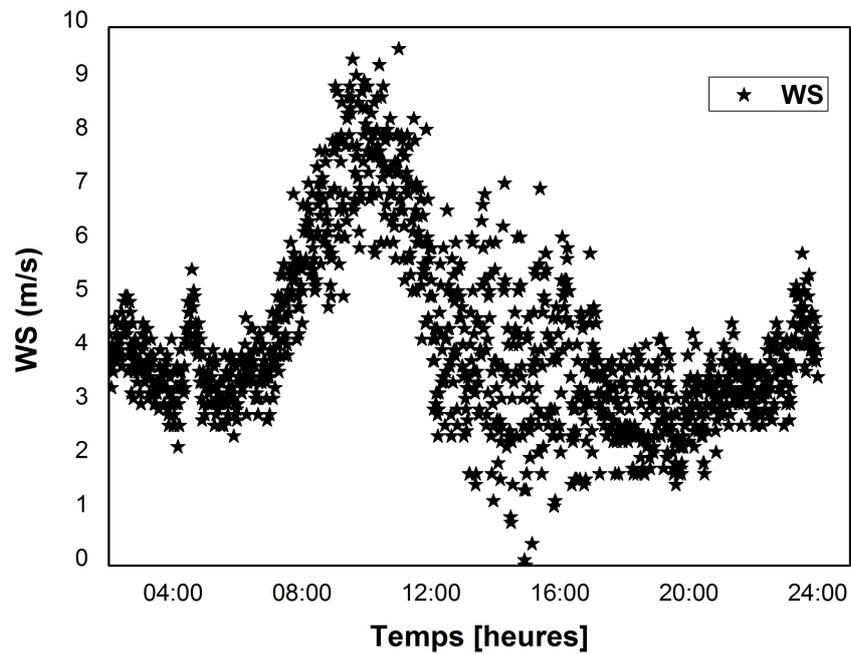


Figure N° I.11. Variation journalière de la vitesse du vent pour la journée du 17/07/15

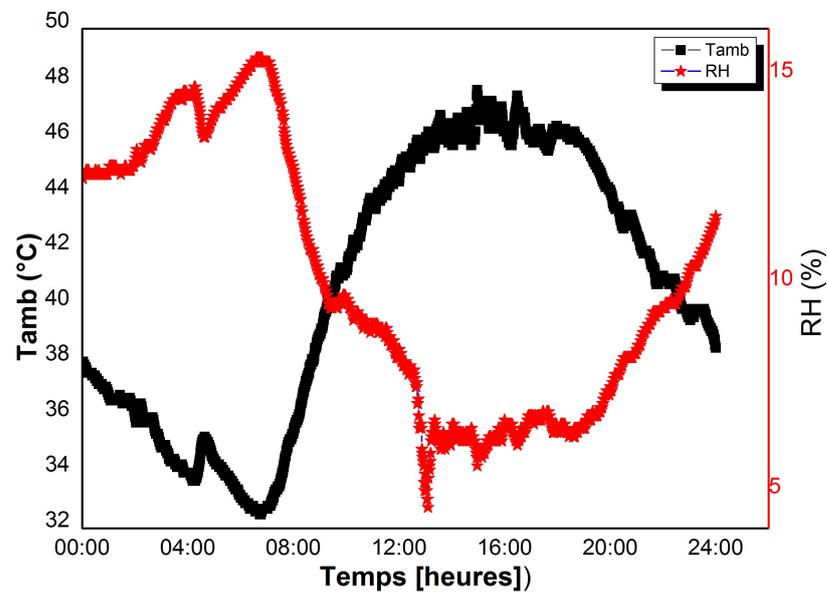


Figure N° I.12. Température ambiante et l'humidité relative pour la journée du 17/07/15

**Chapitre ETUDE DU CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE ET DU STOCKAGE
DE LA CHALEUR**

II

Ce chapitre, est consacré à l'étude numérique et expérimentale des capteurs thermiques à air, en convection naturelle ou forcée, sans et avec un matériau à changement de phase (PCM), après avoir donné l'état de l'art, les différents types et le principe de fonctionnement.

II.1. Introduction

Ce chapitre donne l'état de l'art sur le développement des capteurs solaires, la modélisation (les équations mathématiques) et simulation numérique d'un capteur solaire à air simple, avec des obstacles, avec et sans matériau à changement de phase en convection naturelle ou en convection forcée, en un deuxième lieu la simulation du stockage thermique par chaleur latente en utilisant un MCP sera présentée ; attendu qu'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 de graphes et discutés.

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 ».[6]

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 décortique 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. [6]

Parmi les travaux scientifiques portant sur la caractérisation et l'étude des performances des capteurs solaires, nous pouvons citer en chronologique les travaux suivants:

En 1942 : la théorie des capteurs, établis par HOTTEL et WOERTZ, Depuis, d'autres études ont été faites notamment celle portant sur la modélisation relative à différentes configurations de capteurs solaire thermique. [6]

En 1976 : les premières études thermodynamiques

En 1974 : KLEIN.S, J.A.DUFFIE et W.A.BECKMAN, ont publié une étude sur l'effet de la capacité thermique, sur la modélisation des performances d'un capteur solaire souvent négligée et ce afin de simplifier les calculs. [6]

En 1981 : LUNDE .P.J contribue à la détermination de l'expression du facteur de transfert de chaleur pour différentes températures du capteur solaire.

En 1986 : MERZOUK.M, 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 KASBADJI .N, au CNR de Padoue en Italie, qui porte sur l'étude théorique et expérimentale de trois capteurs solaires en régime permanent. [7]

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.

En 1993 : ZUGARI. M. R et J. J. VILLIERME améliorent les performances thermiques d'un capteur solaire par l'intégration d'une structure à lamelles sur l'absorbeur.

En 1994 : AVEZOV.R, N. A. KAKHAROV et K.B.KHODDZHIEV améliorent les performances thermiques d'un capteur solaire par diminution de la température de l'absorbeur en utilisant un dispositif démontable plaque-tube. En parallèle, de nouveaux types de capteurs solaires sont réalisés en Tunisie.

En 1999 : ABDI ET K .H. KACI de l'université de Blida ont établi une étude portant sur nouveau prototype de capteurs solaire à contact direct eau-plaque absorbante. L'objectif principal de ce travail était d'étudier l'effet de la forme de la plaque absorbante (convexe et concave) sur le rendement du capteur.

En 2001 : LAFRI. D 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. [7]

En 2014: Vincent Qinglong invente une nouvelle génération de capteur plan à concentration. [8]



Figure N°.II.1 Capteur thermique à concentration.

II.3. Les Capteurs Solaires Thermiques :

Le rôle d'un capteur solaire thermique (Figure N°.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 N°.II.2. Capteur solaire thermique [8]

II.4. 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...on peut citer [9]:

II.4.1. Le capteur plan :

C'est un dispositif sans concentration, il est recouvert d'une vitre sur la face avant et isolée sur les faces latérales et arrière (Figure N°. II.3).

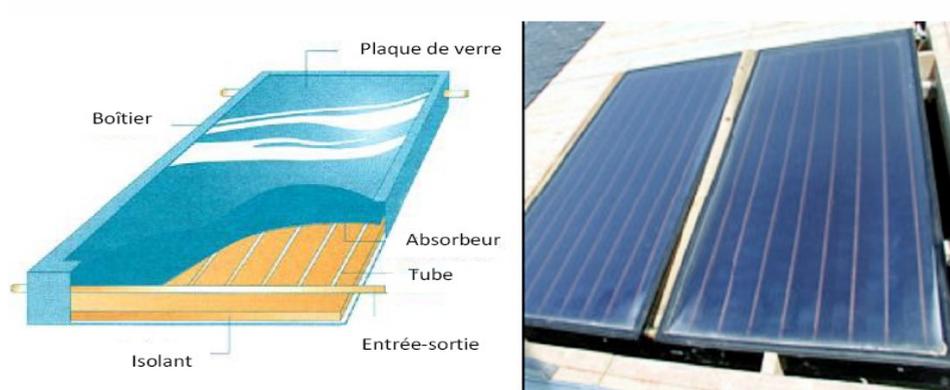


Figure N°. II.3 : Capteur solaire plan [9]

II.4.2. Le capteur à air :

Un capteur à air (Figure N°.II.4) 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. [9]

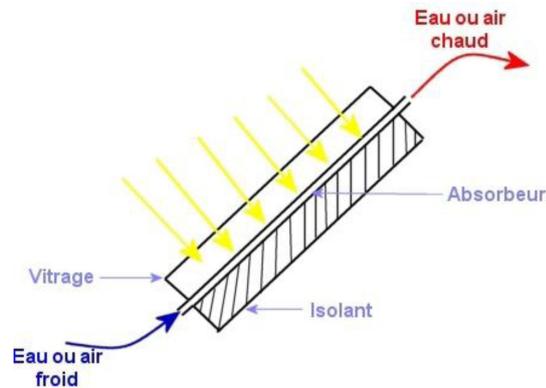


Figure N°. II.4 : Capteur à air. [8]

II.4.3. Le capteur à tube sous vide

Un capteur solaire "sous vide" (Figure N°. II.5) est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Ces capteurs peuvent atteindre des températures élevées. [9]



Figure N°.II.5 : Capteur à tube sous vide. [9]

II.4.4. Le capteur cylindro-parabolique :

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (Figure N°. II.6). [9]



Figure N°. II.6 : Système à réflecteur cylindro-parabolique. [2]

II.4.5. Le capteur parabolique :

Il utilise un réflecteur en forme de parabole de révolution. [2]



Figure N°. II.7 : Capteur parabolique

II.4.6. Capteurs non-vitrés(ou capteurs « moquette »)

Ces capteurs métalliques (Figure N°. II.8) 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. [9]



Figure N°. II.8 : Capteurs solaires sans-vitrage. [9]

II.5. Simulation numérique d'un capteur solaire à air sans et avec MCP

On va étudier 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).

II.5.1. 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 (effet de serre). 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.[10] le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur La figure N°. (II.9)

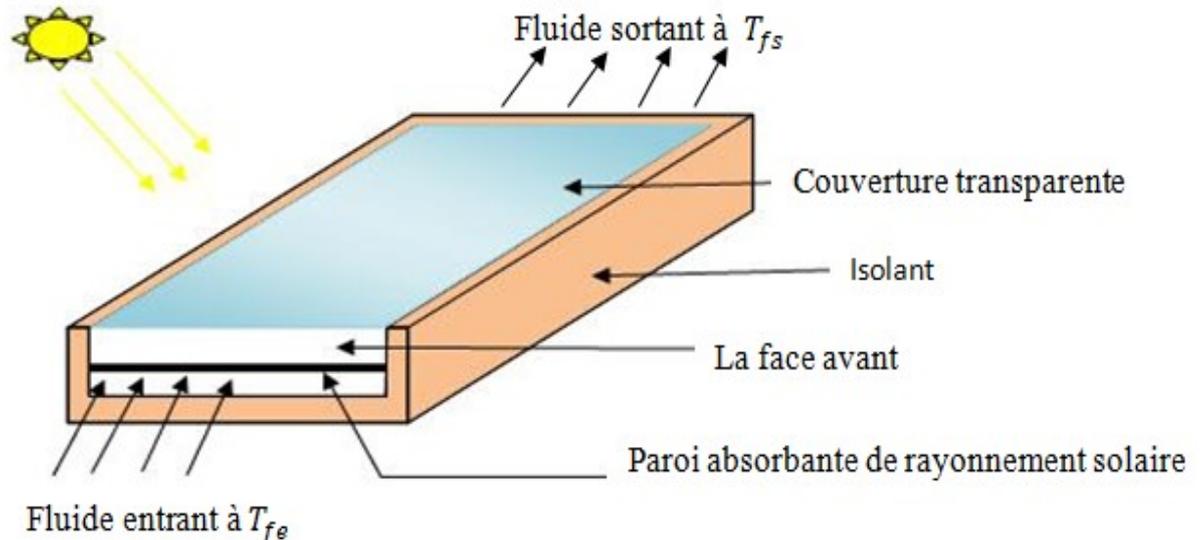


Figure N°. II.9 : Schéma de principe du capteur solaire plan à air [5]

II.6. 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 N°II.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

II.7. Le bilan thermique globale de la paroi absorbante

II.7.1 Bilan thermique d'un capteur plan en régime permanent s'écrit [12] :

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

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

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 :

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

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

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

➤ Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme

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

📌 Remarque :

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

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

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.

II.7.2 Rendements d'un capteur solaire :

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

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

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

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

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

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

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

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 [13] :

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

$$\text{soit } \varphi_a = \varphi_u + \varphi_p \quad (\text{II.11})$$

On définit alors les rendements global η , interne η_i et optique η_0 moyens du capteur sur la période considérée par :

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

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

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

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). [14]

II.8. 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 réaliste, 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 à la face de capteur.
- Les gradients transversaux de température dans l'absorbeur sont négligés (la conductivité thermique de l'absorbeur est supposée très grande). [9]
- Les variations de volume dues au changement de phase sont négligeables. [15]
- Les propriétés physiques sont les mêmes dans les deux phases pour le MCP. [15]
- L'effet d'ombre des ailettes est supposé négligeable.

II.8.1. 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 indiqué sur La figure N°. (II.10) [10].

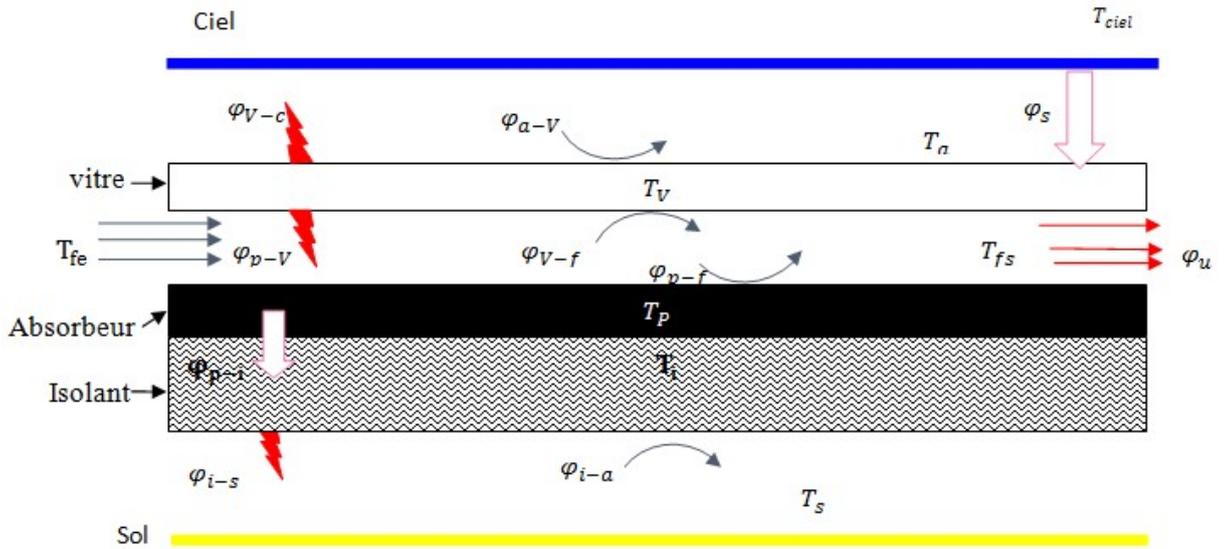


Figure N°. II.10: Différents échanges thermiques dans un capteur à air. [19]

Le schéma électrique équivalent est représenté ci-dessous

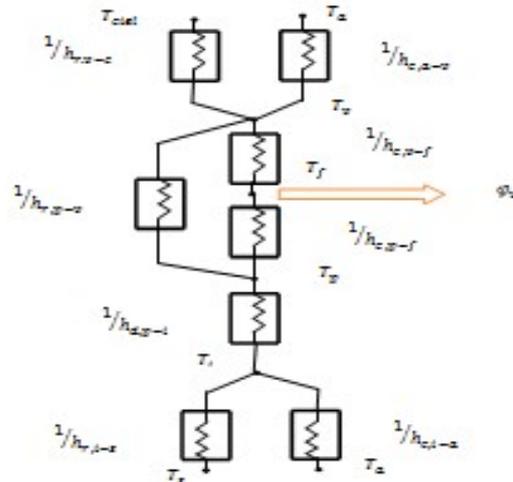


Figure N°. II.11 : Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air.

[15]

II.8.2. Echanges thermiques par rayonnement

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

- la face extérieure de la couverture vitrée et le ciel.
- la face intérieure de la couverture vitrée et la face extérieure de l'absorbeur.
- l'isolant et le sol. [10]

II.8.3. 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] :

$$h_{r,c-v} = \sigma \cdot \varepsilon_V \cdot \frac{(T_V + T_{ciel}) - (T_V^2 - T_{ciel}^2)(T_V - T_{ciel})}{(T_V - T_a)} \quad (\text{II.15})$$

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

$$h_{r,c-v} = \sigma \cdot \varepsilon_V \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (T_V + T_{ciel}) (T_V^2 + T_{ciel}^2) \quad (\text{II.16})$$

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

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

➤ Une autre relation utilisée par SARHADDI et al [11] :

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

II.8.4. 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] :

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

II.8.5. 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] :

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

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

$$T_s = T_a + 2 \quad (\text{II.21})$$

II.8.6. 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 plaque absorbante.
- Au niveau du matériau à changement de phase.

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

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

II.8.7. 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.

II.8.8. Échange thermique par convection dû au vent

Le coefficient de transfert par convection dû au vent est décrit par la relation de HOTTEL et WOERTZ suivante [10] :

$$h_c = 5,67 + 3,86.V_V \quad (\text{II.21})$$

V_V : La vitesse du vent.

Ou par la relation établie par WATMUFFET et al [10] :

$$h_c = 2,8 + 3.V_V \quad (\text{II.22})$$

Pour un capteur solaire incliné avec un angle β , une autre relation est établie par STULTZ et WEN défini par [11] :

$$h_c = 1,27. [(T_v - T_a). \cos \beta]^{1/3} + 2,658.V_V \quad (\text{II.23})$$

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

II.8.9. Échange thermique par convection dû au contact fluide caloporteur-capteur

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 conduite...

Le coefficient d'échange thermique par convection est déterminé à l'aide de la relation suivante donnant le nombre de **NUSSELT** :

$$N_u = \frac{h_c \cdot D_H}{K_f} \quad (\text{II.24})$$

h_c : Coefficient d'échange par convection,

D_H : Le diamètre hydraulique,

K_f : La conductivité thermique du fluide caloporteur.

Cette relation illustre bien que l'échange thermique par convection dépend fortement des caractéristiques géométriques du canal d'écoulement qui se traduit par le terme D_H . Cette grandeur sera évaluée pour différentes configurations similaires et servira par la suite au calcul du rendement thermique pour chaque configuration. Pour pouvoir accéder à la valeur du nombre de NUSSELT, il est nécessaire de déterminer la nature de l'écoulement du fluide caloporteur et d'utiliser les corrélations appropriées existant entre les nombres adimensionnels caractéristiques de cet écoulement [10].

❖ Les corrélations suivantes ont été rapportées par **DUFFIE et BACKMAN [10]** :

❖ Écoulement laminaire: $R_e < 2100$

$$\text{➤ } G_Z < 100 \Rightarrow N_u = \frac{3,66 + 0,085 \cdot G_Z}{(1 + 0,047 \cdot G_Z^2)^{1/4}}$$

$$\text{➤ } G_Z > 100 \Rightarrow N_u = 0,116 \cdot G_Z^{1/3} + 0,87 \cdot G_Z \cdot (1 + 0,045 \cdot G_Z^{1/3})^{-1/4}$$

❖ Écoulement transitoire : $2100 < R_e < 10^4$

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

(II.25)

❖ Écoulement turbulent : $R_e > 10^4$

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

Où :

$R_e = \frac{\rho_f \cdot D_H}{\mu_f} \cdot V_f$, $P_r = \frac{\mu_f}{K_f} \cdot C_p$, $G_z = \frac{R_e \cdot P_r \cdot D_H}{L}$ sont respectivement le nombre de REYNOLDS , nombre de PRANDTL et le nombre de GRAETZ.

ρ_f : Masse volumique du fluide (K_g/m^3),

μ_f : Viscosité dynamique du fluide ($K_g/m \cdot s$),

C_p : Capacité calorifique massique du fluide à pression constante en ($J/K_g \cdot K$),

L : Dimension caractéristique de l'écoulement (longueur du capteur) (m).

D'autres corrélations plus simples utilisées dans la littérature [10] :

$$\left. \begin{aligned} \star 100 < R_e < 2100 &\Rightarrow N_u = 0,344 \cdot R_e^{0,35} \\ \star 2100 < R_e < 2850 &\Rightarrow N_u = 168 \cdot 10^{-9} \cdot R_e^{2,25} \\ \star 2850 < R_e < 5650 &\Rightarrow N_u = 2,55 \cdot 10^{-3} \cdot R_e^{1,04} \\ \star 5650 < R_e < 10^5 &\Rightarrow N_u = 19,8 \cdot 10^{-3} \cdot R_e^{0,8} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.26})$$

II.9. 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]

$$\varphi_p = \varphi_{p,av} + \varphi_{p,ar} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

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

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

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 :

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

II.10. Expressions analytiques du bilan énergétique

II.10.1. Pour la couverture transparente.

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

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

Avec :

$$\varphi_s = E \cdot S$$

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

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

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

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

Finalemnt cette équation devient :

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

II.10.2. Pour le fluide caloporteur

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

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

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 :

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

II.10.3. Pour la plaque absorbante

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

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

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

➤ Le bilan énergétique dans cette couche devient :

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

II.10.4. Pour l'isolant

➤ Le bilan énergétique dans cette couche est :

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

Avec :

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

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

$h_{c,i-a}$: 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**

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

➤ **Système d'équation global**

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

$$(S1) \left\{ \begin{array}{l} \frac{M_v \cdot C_v}{S} \cdot \frac{dT_v}{dt} = [\alpha_v \cdot G + (h_{c,v-a} \cdot (T_a - T_v) + h_{c,v-f} \cdot (T_f - T_v) + h_{r,v-p} \cdot (T_p - T_v) + h_{r,v-c} \cdot (T_c - T_v))] \\ \frac{M_f \cdot C_f}{S} \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot (T_p - T_f) \\ \frac{M_p \cdot C_p}{S} \cdot \frac{dT_p}{dt} = [\alpha_p \cdot \tau_v \cdot G + (h_{d,p-i} \cdot (T_i - T_p) + h_{c,p-f} \cdot (T_f - T_p) + h_{r,v-p} \cdot (T_v - T_p))] \\ \frac{M_i \cdot C_i}{S} \cdot \frac{dT_i}{dt} = [(h_{d,p-i} \cdot (T_p - T_i) + h_{ar,i-a} \cdot (T_a - T_i))] \end{array} \right.$$

II.11 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 surfaces avant et arrière du module.

$$\varphi_p = \varphi_{p,av} + \varphi_{p,ar} \quad (\text{III.27})$$

Où :

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

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

Les deux coefficients U_{av} et U_{ar} sont les coefficients de perte thermique sur la surface avant et sur la surface arrière du capteur respectivement.

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

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

Avec : $U_{av} + U_{ar}$ est le coefficient global de pertes thermiques U_L

Finalement la puissance perdue sera donnée par :

$$\varphi_p = S \cdot U_L \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{II.28})$$

II.12 Expressions analytiques du bilan énergétique

II.12.1 Pour la couche du verre

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

$$M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v \cdot \varphi_s + \varphi_{v-a} + \varphi_{v-f} + \varphi_{v-p} + \varphi_{v-c} \quad (\text{II.29})$$

Où :

α_v : L'absorptivité du verre,

$$\varphi_s = G \cdot S$$

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

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

$$\varphi_{v-p} = h_{r,v-p} \cdot S \cdot (T_p - T_v)$$

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

S : La surface du module (m^2)

G : Rayonnement solaire global incident.

$h_{c,v-a}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre le vitrage et l'ambiance
($w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$h_{c,v-f}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre le vitrage et fluide caloporteur ($w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$h_{r,v-p}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage et l'absorbeur ($\text{w.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

$h_{r,v-c}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage et le ciel ($\text{w.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

Finalement cette équation devient :

$$M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = S[\alpha_v \cdot G + (h_{c,v-a} \cdot (T_a - T_v) + h_{c,v-f} \cdot (T_f - T_v) + h_{r,v-p} \cdot (T_p - T_v) + h_{r,v-c} \cdot (T_c - T_v)) \quad (\text{II.30})$$

II.12.2 Pour le fluide caloporteur

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

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = \varphi_{v-f} + \varphi_{f-p} \quad (\text{II.31})$$

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 énergétique dans cette couche devient :

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad (\text{II.32})$$

A. L'évolution de la température de fluide caloporteur le long de la conduite

À partir de l'équation du bilan énergétique dans la lame d'air suivante :

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad (\text{II.32})$$

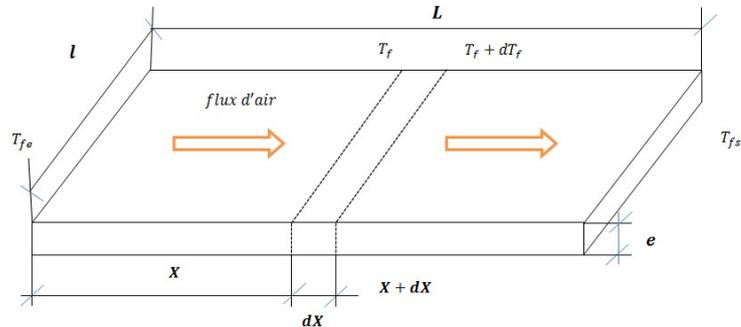


Figure N°. II.12 : Évolution de l'échange thermique dans la lame d'air pour une longueur élémentaire

Et avec une petite distance de longueur dans la lame d'air cette équation devient :

$$\rho \cdot l \cdot e \cdot dX \cdot C_{Pf} \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-p} \cdot l \cdot dX \cdot (T_p - T_f) + h_{c,f-v} \cdot l \cdot dX \cdot (T_v - T_f) \quad (\text{II.33})$$

Cette équation se réduit à :

$$h_{c,f-p} \cdot l \cdot dX \cdot (T_p - T_f) + h_{c,f-v} \cdot l \cdot dX \cdot (T_v - T_f) + \dot{m}_f \cdot C_{Pf} \cdot dT_f = 0 \quad (\text{II.34})$$

Si on considère que la température dans chaque couche est constante sur le long de la conduite sauf dans le fluide caloporteur, cette équation devient :

$$\frac{dT_f}{dX} = T_f \cdot \frac{l(h_{c,f-p} + h_{c,f-v})}{\dot{m} \cdot C_p} + \frac{l(T_p h_{c,f-p} + T_v h_{c,f-v})}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (\text{II.35})$$

Cette équation est une équation différentielle de premier ordre de forme :

$$\frac{dT_f}{dX} = T_f \cdot a + b \Rightarrow T_f(x) = (T_f(0) + \frac{b}{a}) e^{a \cdot x - \frac{b}{a}}$$

Donc la solution de notre équation est :

$$T_f(x) = \left(T_{f,e} - \frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_v \cdot h_{c,f-v})}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \right) \cdot e^{\frac{-l(h_{c,f-p} + h_{c,f-v})x}{\dot{m} \cdot C_p}} + \frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_v \cdot h_{c,f-v})}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \quad (\text{II.36})$$

Donc la température de sortie du fluide caloporteur est trouvée lorsque $x=L$

$$T_{f,s} = \left(T_{f,e} - \frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_v \cdot h_{c,f-v})}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \right) \cdot e^{\frac{-l(h_{c,f-p} + h_{c,f-v})L}{\dot{m} \cdot C_p}} + \frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_v \cdot h_{c,f-v})}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \quad (\text{II.37})$$

Et la température moyenne du fluide s'écrit :

$$T_{f,moy} = \frac{1}{L} \int_0^L T_f(x) dx \quad (\text{II.38})$$

Finalement :

$$T_{f,moy} = \left(\frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_v \cdot h_{c,f-v}) - T_{f,e}}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \right) \cdot \left(e^{\frac{-l(h_{c,f-p} + h_{c,f-v})L}{\dot{m} \cdot C_p}} - 1 \right) + \frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_v \cdot h_{c,f-v})}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \quad (\text{II.39})$$

II.12.3 Pour la plaque absorbante

$$M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p \cdot \tau_v \cdot \varphi_s + \varphi_{p-i} + \varphi_{p-f} + \varphi_{v-p} \quad (\text{II.40})$$

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

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

Le bilan énergétique dans cette couche devient :

$$M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = S[\alpha_p \cdot \tau_v \cdot G + (h_{d,p-i}(T_i - T_p) + h_{c,p-f} \cdot (T_f - T_p) + h_{r,v-p} \cdot (T_v - T_p))] \quad (\text{II.41})$$

II.12.4 Pour l'isolant

Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit

$$M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = \varphi_{p-i} + \varphi_{i-a} + \varphi_{i-s} \quad (\text{II.42})$$

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

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

$h_{c,i-a}$: 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.

Finalement cette équation devient :

$$M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = S[(h_{d,p-i}(T_p - T_i) + h_{c,i-a}(T_a - T_i) + h_{r,i-s}(T_s - T_i))] \quad (\text{II.43})$$

II.13 Capteur solaire avec ailettes

Les échanges thermiques entre différents éléments dans un capteur peuvent être schématisés comme indiqué sur La figure N°. **II.13** ci-dessous :

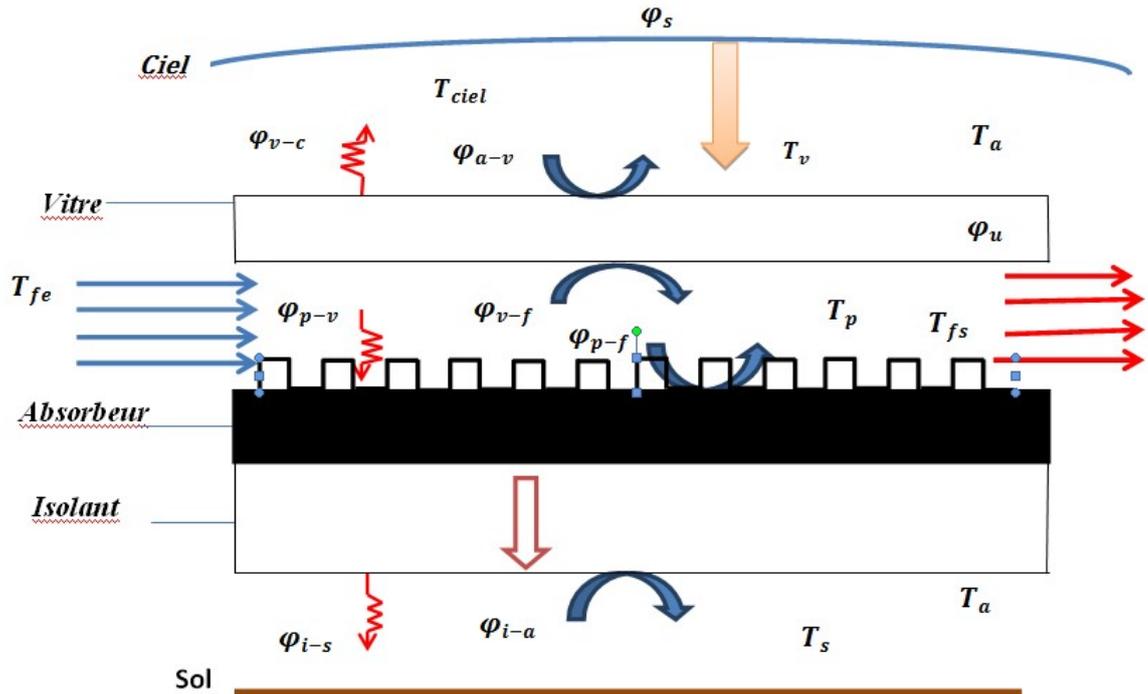


Figure N°. II.13. schématisation des flux thermique dans un capteur solaire à ailettes

φ_{p-i} : Puissance échangée en transfert thermique par rayonnement entre l'absorbteur et l'isolant.

φ_{f-i} : Puissance échangée en transfert thermique par convection entre le fluide caloporteur et l'isolant.

$\varphi_{p-f1}, \varphi_{p-f2}$: Les puissances échangées en transfert thermique par convection entre l'absorbteur et le fluide caloporteur.

II.13.1 Modélisation des coefficients d'échanges thermiques

Le schéma suivant représente l'analogie électrique des transferts thermiques dans le capteur solaire double passe. Les échanges thermiques au niveau du capteur s'effectuent selon les trois modes connus d'échange de chaleur : conduction, convection et rayonnement.

$1/h_r, 1/h_c$ sont respectivement, les résistances thermiques par rayonnement et convection entre les différents composants du système.

II.13.2 Échange thermique par rayonnement

Pour le capteur solaire double passe l'échange thermique par rayonnement existe entre:

- ✓ La face extérieure du vitrage et le ciel.
- ✓ la face intérieure du vitrage et La face extérieure de la plaque absorbante.
- ✓ la face intérieure de la plaque absorbante et La face extérieure de l'isolant.
- ✓ La face intérieure de l'isolant et le sol.

Dont à l'exception de l'échange entre l'absorbeur et l'isolant que sera détaillé dans la suite, les autres échanges sont déjà vus dans l'étude du capteur simple.

Échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolant :

Pour l'échange radiatif entre La face extérieure de l'isolant et la face intérieure de la couche de l'absorbeur, le coefficient d'échange est déterminé par la relation suivante :

$$h_{r,p-i} = \sigma \cdot \frac{(T_p + T_i) \cdot (T_p^2 + T_i^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_i} - 1} \quad (\text{II.43})$$

Avec :

ε_p et ε_i sont respectivement les émissivités de la couche de l'absorbeur et de l'isolant.

II.13.3. Calcul des pertes thermiques

Le flux solaire reçu sur le module du capteur solaire double passe ne se convertit pas totalement en énergie thermique utile. Une partie de ce rayonnement est perdue sous forme de chaleur et rayonnement, au niveau des surfaces avant et arrière du module.

$$\varphi_p = \varphi_{p,av} + \varphi_{p,ar} \quad (\text{II.44})$$

Où :

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

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

Les deux coefficients U_{av} et U_{ar} sont les coefficients de perte thermique sur la surface avant et sur la surface arrière du capteur respectivement.

$$U_{av} = \left[\frac{1}{h_{c,a-v} + h_{r,v-c}} + \frac{1}{h_{r,p-v}} + \frac{2}{h_{c,p-f1}} \right]^{-1}$$

$$U_{ar} = \left[\frac{1}{h_{r,p-i}} + \frac{2}{h_{c,p-f2}} + \frac{1}{h_{c,a-i} + h_{r,i-c}} \right]^{-1}$$

Finalement la puissance perdue sera donnée par :

$$\varphi_p = S \cdot U_L \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{II.45})$$

II.13.4. Expressions analytiques du bilan énergétique

Pour la couche de verre ;

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

$$M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v \cdot \varphi_s + \varphi_{v-a} + \varphi_{v-f1} + \varphi_{v-p} + \varphi_{v-c} \quad (\text{II.46})$$

Où :

α_v : L'absorptivité du verre,

$$\varphi_s = G \cdot S$$

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

$$\varphi_{v-f} = h_{c,v-f1} \cdot S \cdot (T_{f1} - T_v)$$

$$\varphi_{v-p} = h_{r,v-p} \cdot S \cdot (T_p - T_v)$$

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

S : La surface du module (m^2)

$h_{c,v-a}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre le vitrage et l'ambiance ($w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$h_{c,v-f1}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre le vitrage et fluide caloporteur ($w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$h_{r,v-p}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage et l'absorbeur ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$h_{r,v-c}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage et le ciel ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

Finalement cette équation devient :

$$M_v C_v \frac{dT_v}{dt} = S[\alpha_v \cdot G + (h_{c,v-a}(T_a - T_v) + h_{c,v-f1}(T_{f1} - T_v) + h_{r,v-p}(T_p - T_v) + h_{r,v-c}(T_c - T_v))] \quad (II.47)$$

Pour le fluide caloporteur :

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

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = \varphi_{v-f} + \varphi_{f-p} \quad (II.51)$$

$h_{c,f-v}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide caloporteur et la vitre.

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

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad (II.52)$$

La température du fluide caloporteur en sortie du capteur :

$$T_{f,s} = \left(T_{f,e} - \frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_i \cdot h_{c,f-v})}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \right) \cdot e^{\frac{-l(h_{c,f-p} + h_{c,f-v})}{m \cdot C_p}} + \frac{(T_p \cdot h_{c,f-p} + T_i \cdot h_{c,f-v})}{h_{c,f-p} + h_{c,f-v}} \quad (II.53)$$

Pour la plaque absorbante :

$$M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p \cdot \tau_v \cdot \varphi_s + \varphi_{p-v} + \varphi_{p-f} + \varphi_{r,v-p} \quad (II.54)$$

$h_{c,p-v}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et la vitre.

Le bilan énergétique dans cette couche devient :

$$M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = (S_p + S_{fin} \cdot \eta_{fin})[\alpha_p \cdot \tau_v \cdot G - (h_{c,p-v}(T_p - T_v) + h_{c,p-f}(T_f - T_p) + h_{r,p-v}(T_v - T_p))] \quad (II.55)$$

Pour l'isolant :

Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit

$$M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = \varphi_{p-i} + \varphi_{ar} \quad (\text{II.56})$$

$$M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = S [(h_{c,p-i} (T_p - T_i) + h_{ar} (T_a - T_i))] \quad (\text{II.57})$$

II.13.5. Système d'équations global

D'après les équations (II.47), (II.49), (II.52), (II.55), (II.57) on peut regrouper le système d'équations (S2) suivant :

$$(S2) \begin{cases} M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = S \cdot [\alpha_v \cdot G + (h_{c,v-a} (T_a - T_v) + h_{c,v-f1} (T_{f1} - T_v) + h_{r,v-p} (T_p - T_v) + h_{r,v-c} (T_c - T_v))] \\ M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \\ M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = (S_p + S_{fin} \cdot \eta_{fin}) [\alpha_p \cdot \tau_v \cdot G - (h_{c,p-v} (T_p - T_v) + h_{c,p-f} (T_f - T_p) + h_{r,p-v} (T_v - T_p))] \\ M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = S \cdot [(h_{c,p-i} (T_p - T_i) + h_{ar} (T_a - T_i))] \end{cases}$$

II.14 Capteur solaire avec ailettes et MCP

Les propriétés physiques des matériaux à changement de phase illustré dans le tableau ci-dessous

Tableau II.2 propriété physique des matériaux à changement de phase					
Paraffine c18	Cp _{sol/liq} [j/kg°C]	Conductivité $\lambda_{pcm(sol/liq)}$ [w/m²]	Densité sol/liq [kg/m³]	Température de fusion T _m	Chaleur latente [kj/kg]
Paraffine 52-54	1900/2240	0.376/0.148	814/774	42	242
Paraffine wax	2195/2950	0.232/0.15	900/814	52	188

Les échanges thermiques entre différentes éléments dans un capteur peuvent être schématisés comme indiqué sur La figure N°. II.14 ci-dessous :

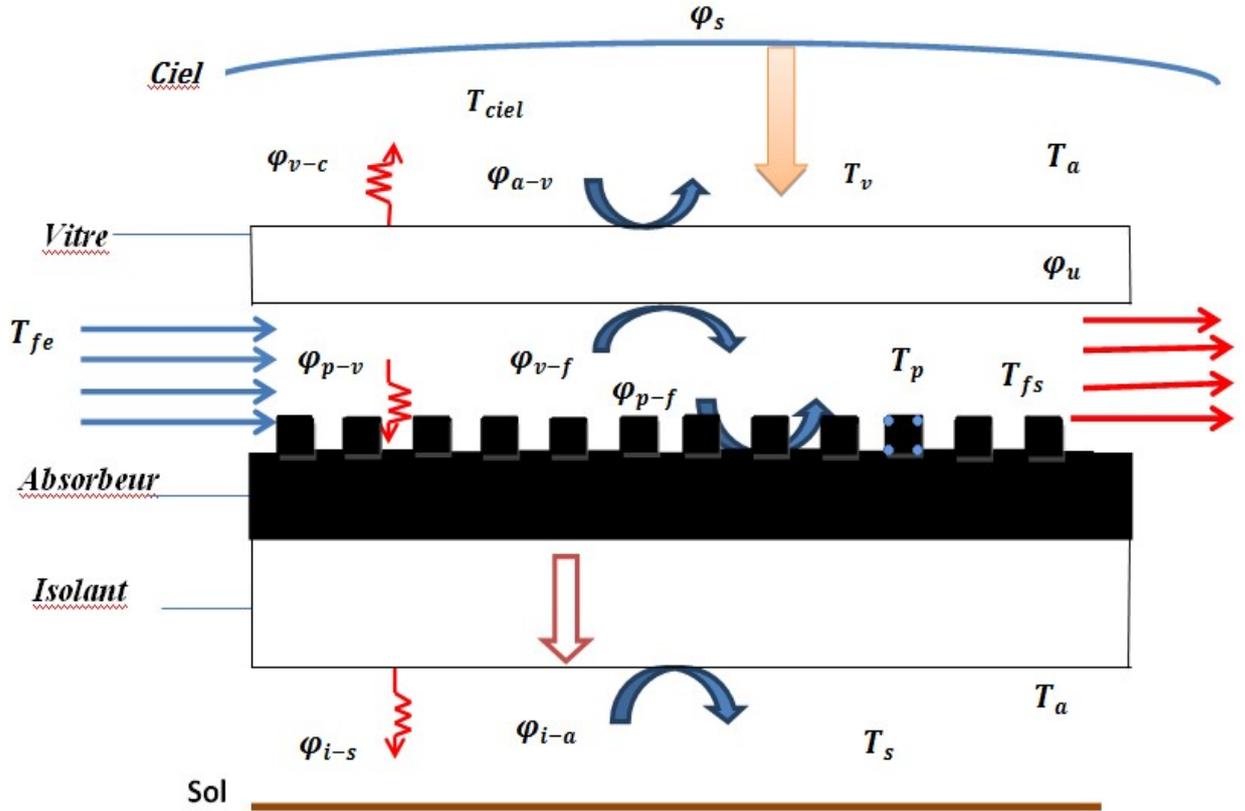


Figure N°. II.14 Représentation schématique d'échanges thermiques dans le capteur avec MCP et ailettes

$$(S3) \left\{ \begin{array}{l} M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = S \cdot [\alpha_v \cdot G + (h_{c,v-a} \cdot (T_a - T_v) + h_{c,v-f1} \cdot (T_{f1} - T_v) + h_{r,v-p} \cdot (T_p - T_v) + h_{r,v-c} \cdot (T_c - T_v))] \\ M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \\ M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = (S_p + S_{fin} \cdot \eta_{fin}) [\alpha_p \cdot \tau_v \cdot G - (h_{c,p-v} \cdot (T_p - T_v) + h_{c,p-f} \cdot (T_f - T_p) + h_{r,p-v} \cdot (T_v - T_p))] \\ M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = S \cdot [(h_{c,p-i} \cdot (T_p - T_i) + h_{ar} \cdot (T_a - T_i))] \\ M_{pc} \cdot \frac{dT_{pcm}}{dt} = S_{pcm} \cdot \frac{\lambda_{pcm}}{e_{pcm}} \cdot (T_p - T_{pcm}) \end{array} \right.$$

$$M_{pc} = M_{pcm} \cdot C_{s,pcm} \text{ si } T_{pcm} < T_m$$

$$M_{pc} = M_{pcm} \cdot \frac{L_{pcm}}{\delta T} \text{ si } T_m \leq T_{pcm} \leq T_m + \delta T$$

$$M_{pc} = M_{pcm} \cdot C_{l,pcm} \text{ si } T_{pcm} > T_m + \delta T$$

II.15. Méthode de résolution

MATLAB (« matrix laboratory ») est un langage de programmation est un environnement de développement ; Développé par la société « The MathWorks »,

MATLAB permet la manipulation de matrice, affiche des courbes et des données, met en œuvre des algorithmes, crée des interfaces utilisateurs et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java et Fortran. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des toolbox (« boîte à outils »).

II.15.1. Modèle thermique

En utilisant l'une des méthodes numériques directes ou itératives, on peut trouver les paramètres thermiques et la température de chaque couche des deux capteurs solaires plans simples et doubles passe.

Prenant les hypothèses précédentes le système d'équations (**S1**), qui montre l'échange thermique dans chaque couche du capteur plan simple devient :

$$(S1) \begin{cases} M_v \cdot C_v \cdot \frac{\Delta T_v}{\Delta t} = [\alpha_v \cdot G + (h_{c,v-a} \cdot (T_a - T_v) + h_{c,v-f} \cdot (T_f - T_v) + h_{r,v-p} \cdot (T_p - T_v) + h_{r,v-c} \cdot (T_c - T_v))] \\ M_f \cdot C_f \cdot \frac{\Delta T_f}{\Delta t} = h_{c,f-v} \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot (T_p - T_f) \\ M_p \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T_p}{\Delta t} = [\alpha_p \cdot \tau_v \cdot G + (h_{d,p-i} \cdot (T_i - T_p) + h_{c,p-f} \cdot (T_f - T_p) + h_{r,v-p} \cdot (T_v - T_p))] \\ M_i \cdot C_i \cdot \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = [h_{d,p-i} \cdot (T_p - T_i) + h_{ar,i-a} \cdot (T_a - T_i)] \end{cases}$$

Prenant une méthode itérative de Jacobi, la température dans chaque couche s'exprime en fonction de températures de couches adjacentes, le système d'équations devient :

$$\begin{cases} T_v^{t+\Delta t} = AT_f^{t+\Delta t} + BT_p^{t+\Delta t} + S'_1 \cdot T_v^t + S_1 \\ T_f^{t+\Delta t} = CT_v^{t+\Delta t} + DT_p^{t+\Delta t} + S'_2 \cdot T_f^t + S_2 \\ T_p^{t+\Delta t} = ET_v^{t+\Delta t} + FT_f^{t+\Delta t} + HT_i^{t+\Delta t} + S'_3 \cdot T_p^t + S_3 \\ T_i^{t+\Delta t} = IT_p^{t+\Delta t} + S'_4 \cdot T_i^t + S_4 \end{cases}$$

Ce système d'équations est non linéaire, parce que les coefficients du système dépendent aussi de la température.

Finalement la forme itérative du système se réduit sous l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} T_v^{t+\Delta t} \\ T_f^{t+\Delta t} \\ T_p^{t+\Delta t} \\ T_i^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & A & B & 0 \\ C & 0 & D & 0 \\ E & F & 0 & H \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_v \\ T_f \\ T_p \\ T_i \end{bmatrix}^{t+\Delta t,i} + \begin{bmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \\ S'_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_v \\ T_f \\ T_p \\ T_i \end{bmatrix}^t + \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}$$

Prenant les hypothèses précédentes le système d'équations (**S2**), qui montre l'échange thermique dans chaque couche du capteur à ailettes devient :

$$(S2) \begin{cases} M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = S \cdot [\alpha_v \cdot G + (h_{c,v-a} \cdot (T_a - T_v) + h_{c,v-f1} \cdot (T_{f1} - T_v) + h_{r,v-p} \cdot (T_p - T_v) + h_{r,v-c} \cdot (T_c - T_v))] \\ M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{c,f-v} \cdot S \cdot (T_v - T_f) + h_{c,f-p} \cdot S \cdot (T_p - T_f) \\ M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = (S_p + S_{fin} \cdot \eta_{fin}) [\alpha_p \cdot \tau_v \cdot G - (h_{c,p-v} \cdot (T_p - T_v) + h_{c,p-f} \cdot (T_f - T_p) + h_{r,p-v} \cdot (T_v - T_p))] \\ M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = S \cdot [h_{c,p-i} \cdot (T_p - T_i) + h_{ar} \cdot (T_a - T_i)] \end{cases}$$

Prenant une méthode itérative de Jacobi, la température dans chaque couche s'exprime en fonction des températures de couches adjacentes, le système d'équations devient :

$$\begin{cases} T_v^{t+\Delta t} = AT_f^{t+\Delta t} + BT_p^{t+\Delta t} + S'_1 \cdot T_v^t + S_1 \\ T_f^{t+\Delta t} = CT_v^{t+\Delta t} + DT_p^{t+\Delta t} + S'_2 \cdot T_f^t + S_2 \\ T_p^{t+\Delta t} = ET_v^{t+\Delta t} + IT_f^{t+\Delta t} + KT_i^{t+\Delta t} + S'_3 \cdot T_p^t + S_3 \\ T_i^{t+\Delta t} = NT_p^{t+\Delta t} + S'_4 \cdot T_i^t + S_4 \end{cases}$$

Finalement la forme itérative du système se réduit sous l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} T_v^{t+\Delta t} \\ T_f^{t+\Delta t} \\ T_p^{t+\Delta t} \\ T_i^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & A & B & 0 \\ C & 0 & D & 0 \\ E & I & 0 & K \\ 0 & 0 & N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_v \\ T_f \\ T_p \\ T_i \end{bmatrix}^{t+\Delta t, i} + \begin{bmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \\ S'_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_v \\ T_f \\ T_p \\ T_i \end{bmatrix}^t + \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}$$

Le problème est résolu en utilisant le programme de calcul MATLAB.

Les différentes étapes de l'algorithme de calcul développé dans le programme de simulation des caractéristiques thermiques de module sont présentées dans La figure N°.

II.15

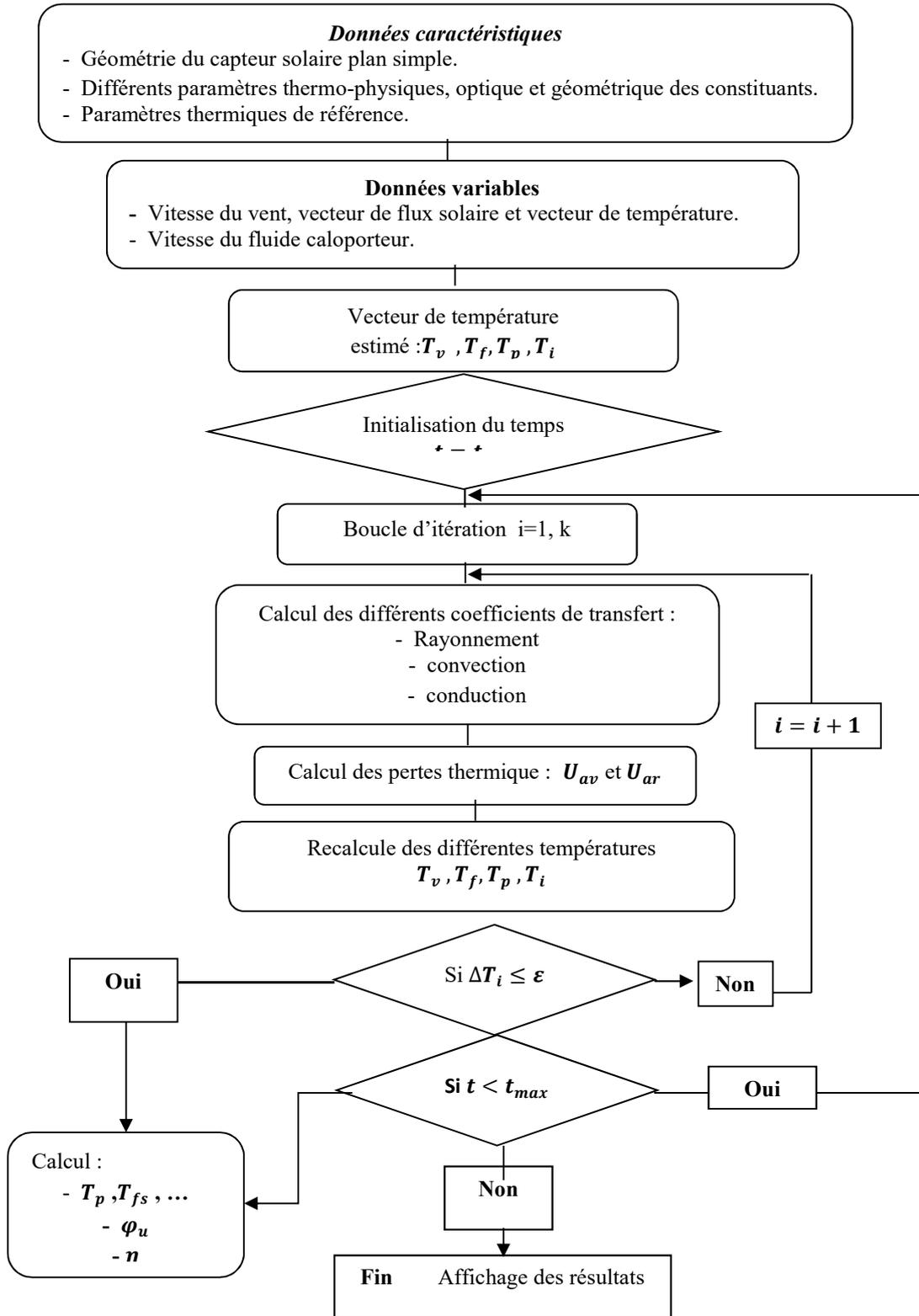


Figure N°. II.15 : Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution du système

II.15.2. Algorithme de calcul

Nous avons établi un programme, basé sur l'enchaînement de calcul précédent, dont l'algorithme est résumé comme suit:

- **Etape 1/ Lecture de données**
 - Lecture de données climatiques, à partir d'un fichier de données, qui contient l'ensoleillement global et la température ambiante ;
 - Lecture de différents paramètres géométriques, physiques et thermo-physique du système.
- **Etape 2 / Calcul des systèmes algébriques**
 - Toutes les données qui ne dépendent pas de la température sont évaluées ;
 - Initialisation des températures moyennes des différents éléments du capteur ;
- **Etape 3/ Résolutions**
 - Appel du sous-programme qui génère les coefficients des systèmes d'équations (S).
 - Appel du sous-programme de résolution du système d'équations (S) par la méthode Jacobi, en déterminant les différentes températures;
 - Cette étape nécessite l'introduction d'une procédure itérative.
- **Etape 4/ Calcul des différents caractéristiques**
 - Dans cette étape, les différents paramètres et caractéristiques du capteur sont évaluées, telles que la puissance thermique et les rendements ...
- **Etape 6/ Affichage des résultats**

Dans cette dernière étape, les résultats attendus sont visualisés par l'intermédiaire de tracés de courbes ou de tableaux de valeurs. Les grandeurs visualisées sont notamment :

- Les températures T_v , T_{fs} , T_p , T_i ;
- Les puissances utiles et perdue...,
- Le rendement thermique.

II.17. Résultat et discussion

On va présenter les résultats de simulation la variation temporelle de la température et le rendement du capteur solaire à air sans intégration de matériau à changement de phase.

II.17.1. Les données météorologiques

Les données expérimentales relevées du capteur solaire à air étudié en convection naturelle de la journée 17/07/2015, conçu et réalisé dans l'URER-MS, Adrar.

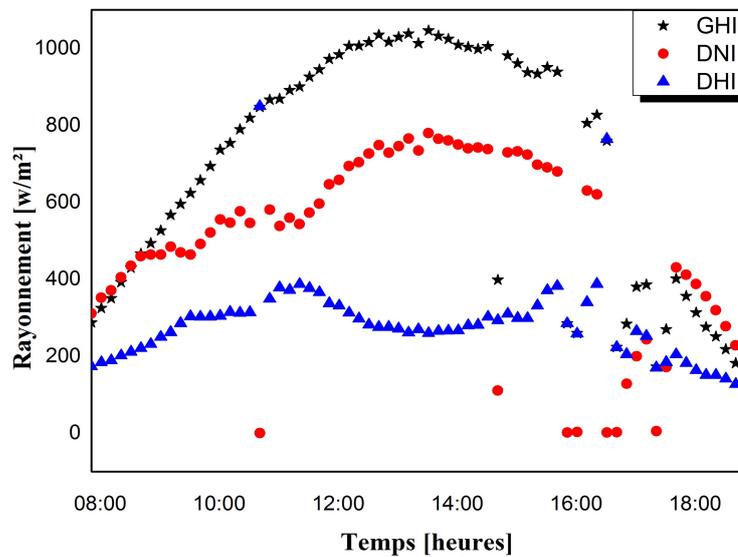


Figure N°. II.16. Rayonnement solaire de la journée 17/07/2015

La figure N°. (II.16) représente la variation de l'éclairement solaire en fonction du temps de la journée 17/07/2015 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 950w/m^2 qui correspond à 12h3; puis diminue.

La figure N°. (II.17) représente la variation de la température ambiante en fonction du temps de la journée 17/07/2015 dans le site de l'étude.

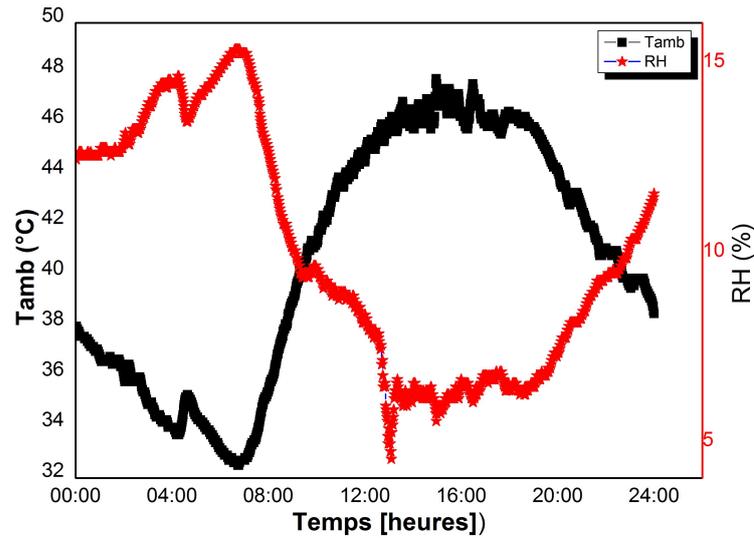


Figure N°. II.17: La température ambiante de la journée 17/07/2015

Après l'allure qui représente la variation de la température ambiante en fonction du temps, attendu qu'elle prend sa valeur maximale 48 °C à l'intervalle du temps à [14h-17h].

II.17.2. Températures des différents composants du capteur solaire en CN :

La variation temporelle de la température de la plaque absorbante en CN

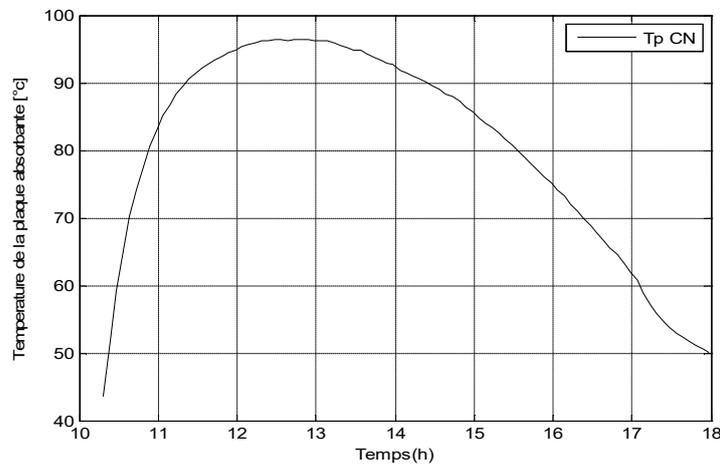


Figure N°. II.18 : La variation de température de la plaque absorbante en convection naturelle

La figure N°. (II.18) 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.

La variation temporelle de la température du fluide sortant du capteur en CN

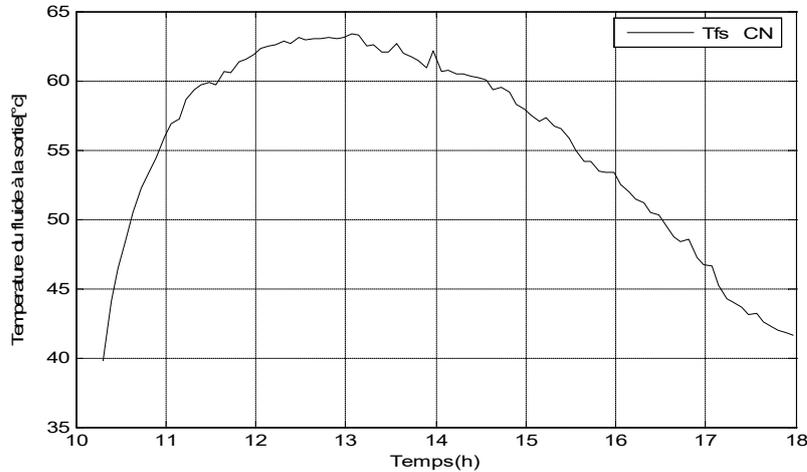


Figure.N°. II.19: La température du fluide à la sortie en CN

La figure N°. (II.19) 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.

La variation temporelle de la température de la vitre en CN

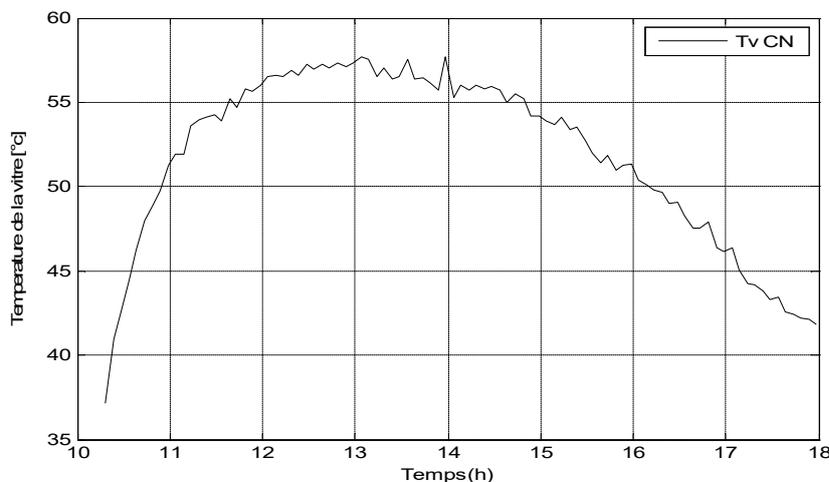


Figure N°. II.20: La variation temporelle de la température de la vitre en CN

La variation temporelle de la chaleur utile en CN

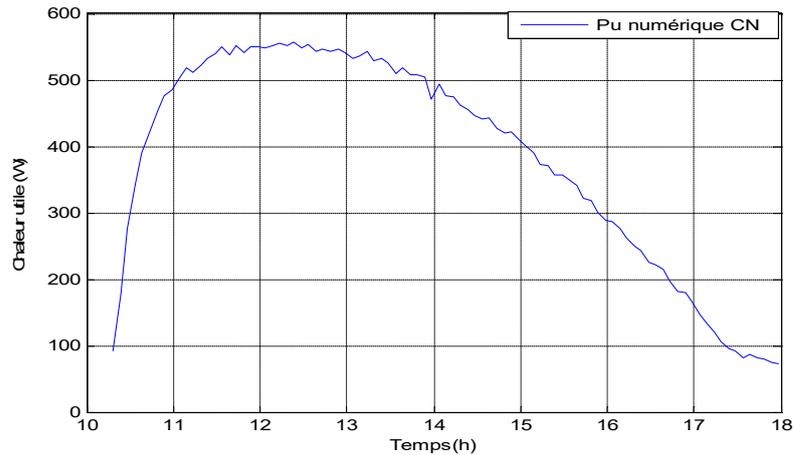


Figure N° II.21: la variation de la puissance utile en convection naturelle

La figure N°. (II.20) 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 N°. (II.21), 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.

La variation instantanée du rendement thermique du capteur solaire en CN

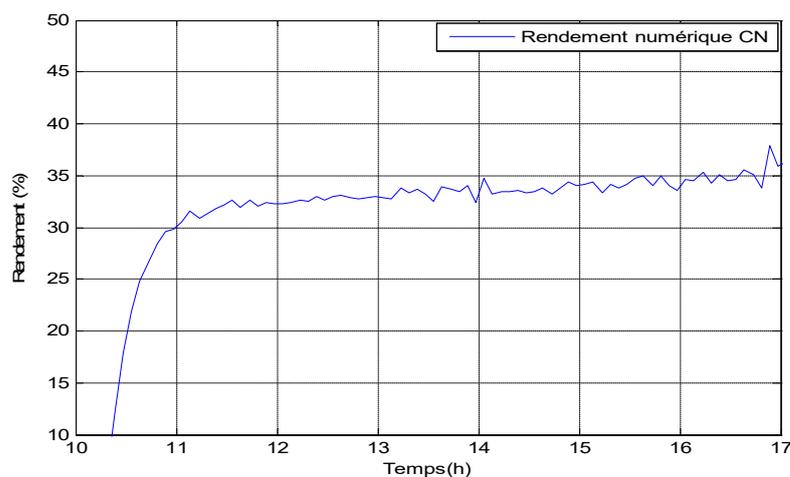


Figure N° II.22: Rendement thermique simulé du capteur en CN

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.

II.18. Capteur solaire à air sans MCP en convection forcée

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

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

II.18.1. 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 performances 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 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.

II.18.2. L'effet du matériau à changement de phase.

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)

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

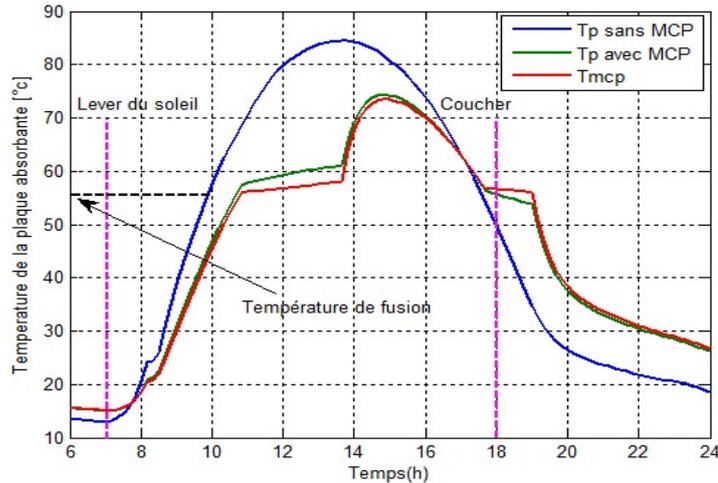


Figure N°. II.23: La température de la plaque sans et avec MCP

Figure N°. (II.23) 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 libère 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 un palier quasi-stagnation de la température en changement de phase (décharge), d'une durée de 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 égale à 23°C c.à.d. une augmentation de 50%, 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 fusion 56°C ; dans cette étape 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 ($T_f = 56\text{ C}$).

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 $T_p = 33\text{ °C}$, on enregistre une température de $T_{mcp} = 56\text{ °C}$ (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 $T_p = 33\text{ °C}$, on enregistre une température de $T_{mcp} = 56\text{ °C}$, 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

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

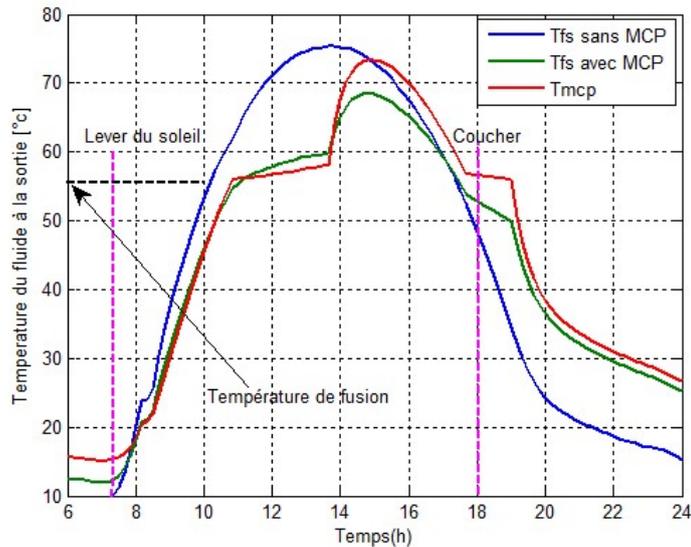


Figure N°. II.24: La température du MCP et fluide sortant sans et avec MCP

Le Figure N°. (II.24) 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 (Tfs) 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 (Tp).
- Deuxièmement la température maximale du fluide a diminué (de 75 au 69 °C).
- la durée de fonctionnement est prolongée de 18h à 19h50 à 50°C et jusqu'à minuit avec un écart de plus 10°C.
- on remarque un décalage dans le temps d'une heure enregistré pour les valeurs maximales de température.

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

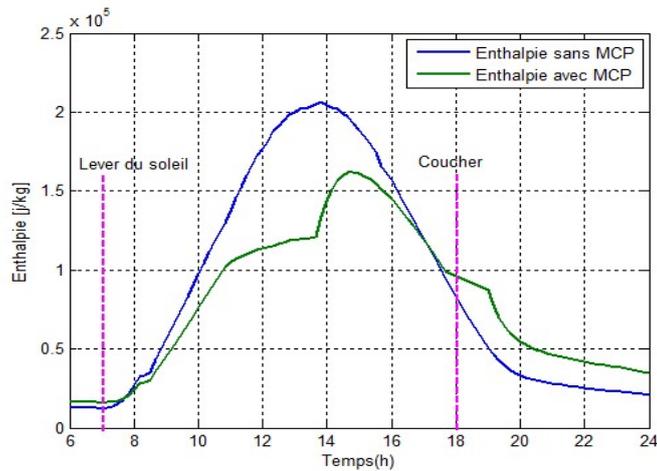


Figure N°. II.25: La chaleur latente à la sortie du avec et sans MCP.

La figure N°. (II.25) 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 coucher du soleil [18h-00h] la chaleur latente avec MCP reste supérieure à la chaleur latente sans MCP (environ $0,4 \cdot 10^4$ j/kg).

II.18.3. Deuxième cas : MCP (le pas de la différence de la température égal 5 °C)

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

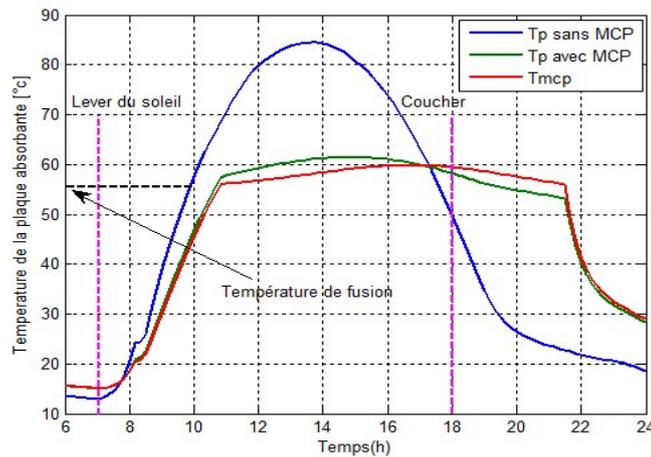


Figure N°. II.26: La température du MCP et de la plaque de l'absorbeur sans et avec MCP

La figure N°. (II.26) 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 ya un faible déphasage entre les courbes quand on ajoute du MCP, tel que existe une différence entre l'allure de température de la plaque sans MCP et la température de la plaque avec MCP.

-A19h, 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.

II.18.4. L'effet du matériau à changement de phase sur le fluide sortant

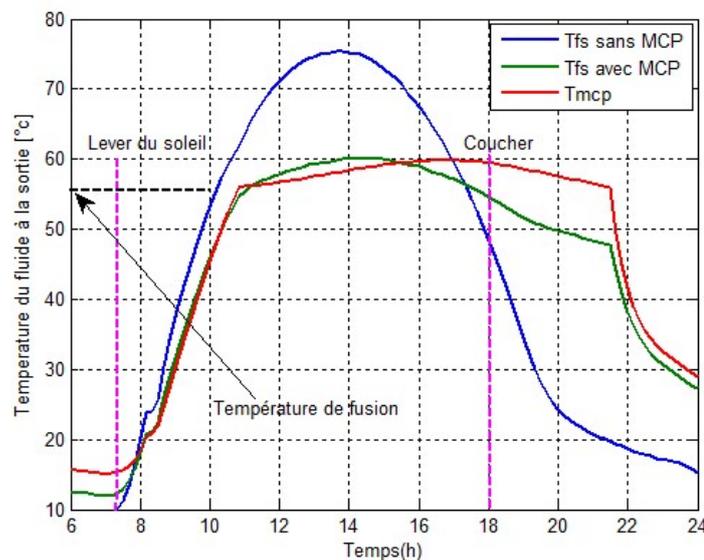


Figure N°. II.27: La température du fluide sortant sans et avec MCP.

La figure N°. (II.27) représente la variation temporelle de la température du fluide sortant sans et avec MCP et Tmcp, On observe que les phases 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 Figure N°. (II.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.

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

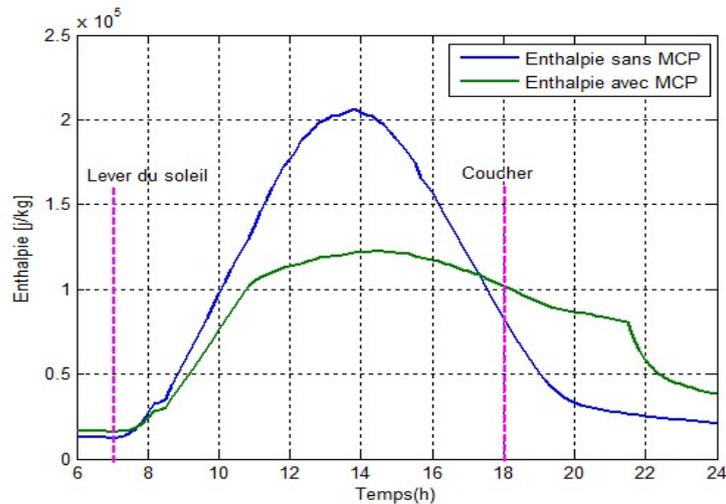


Figure N°. II.28: La chaleur latente à la sortie du avec et sans MCP

La figure N°. (II.28) représente la variation temporelle de l'enthalpie à la sortie du capteur solaire à air ; on remarque que le MCP diminue la quantité de chaleur latente au cours la journée et l'augmenter dans la nuit ; après le coucher du soleil [18h-00h] la chaleur latente avec MCP reste supérieure à la chaleur latente sans MCP.

II.19. Capteur simple en convection naturelle

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, la température de la plaque et de la vitre, aussi le pyranomètre est installé dans le but de mesurer le rayonnement solaire incident ; ce qui est illustré dans les photos suivantes :



Figure N°. II.29: Capteurs solaires à air

➤ **Les températures expérimentales du capteur solaire à air en CN**

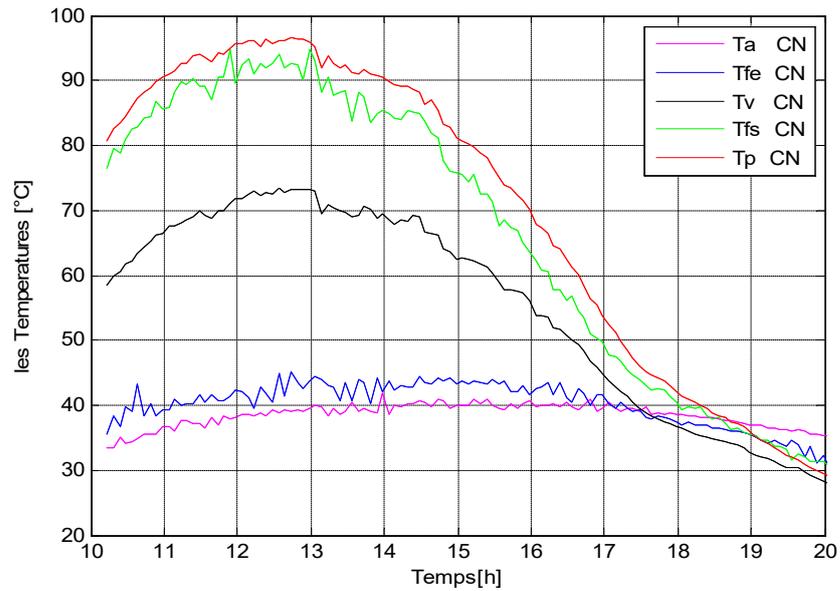


Figure N°.II.30: La variation temporelle des températures expérimentales en CN

➤ **Rendement**

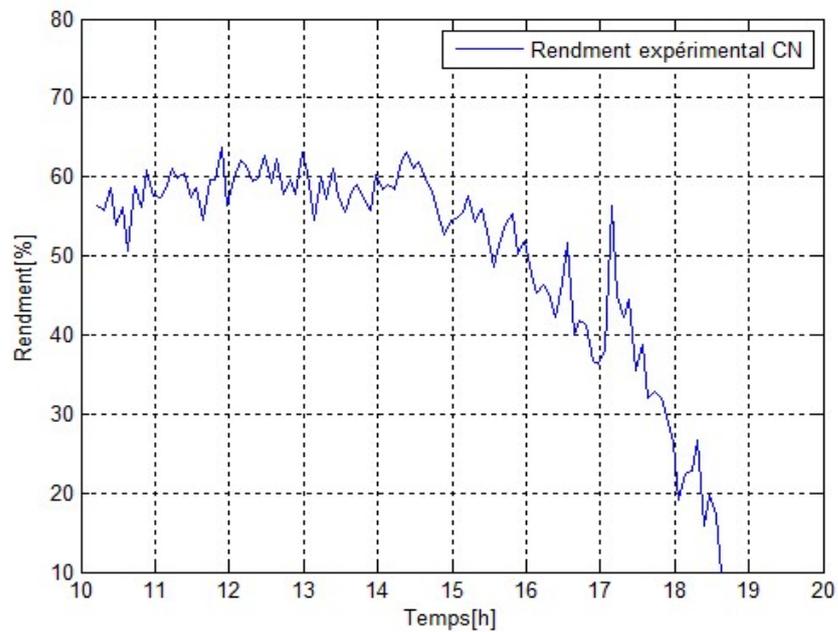


Figure N°. II.31: La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CN

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

La figure N°. (II.30) représente l'allure de l'évolution instantané 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.

➤ Comparaison des résultats

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 intervalles du temps ; L'ensemble de ces valeurs simulées et mesurées expérimentalement sont présentées graphiquement ci-dessous.

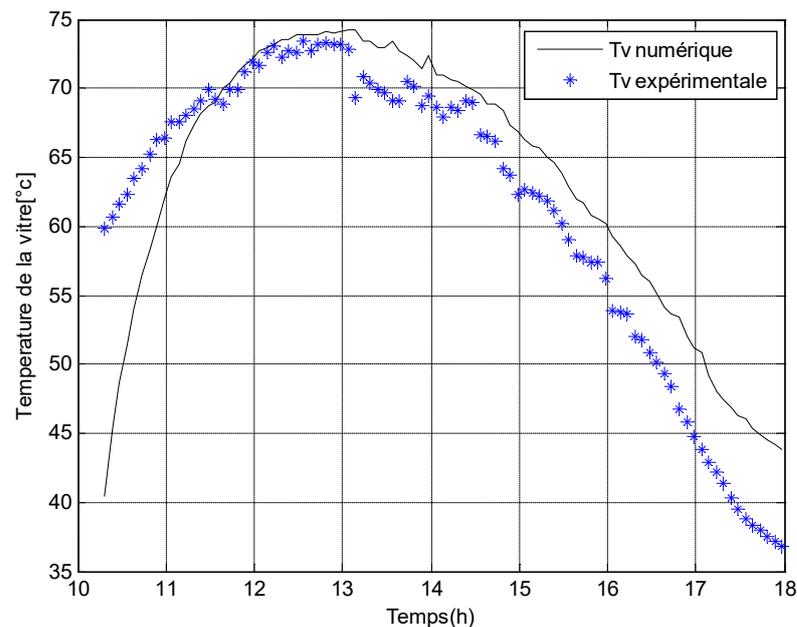


Figure N°. II.32: Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CN

La figure N°. (II.32) représente les 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.

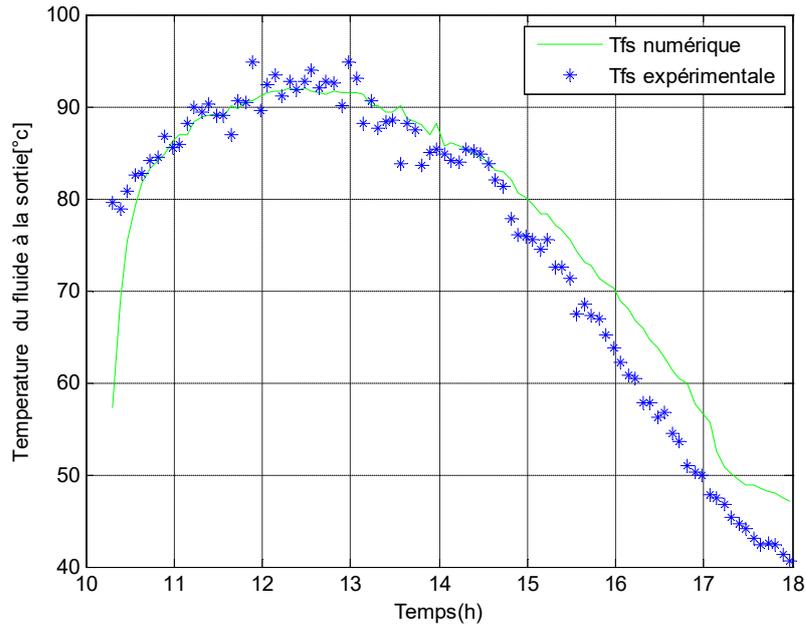


Figure N°. II.33: Comparaison entre température du fluide sortant simulée et expérimentale en CN

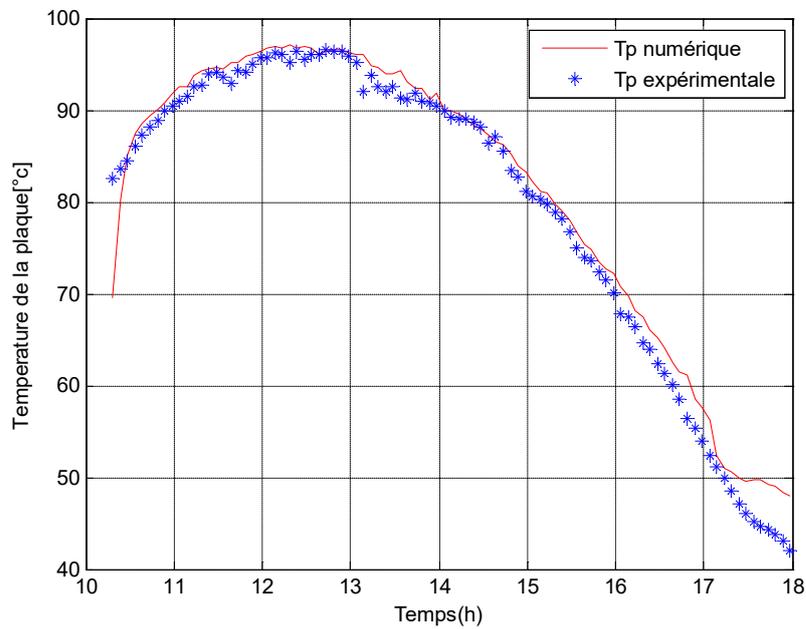


Figure N°. II.34: Comparaison entre la température de la plaque absorbante simulée et expérimentale en CN

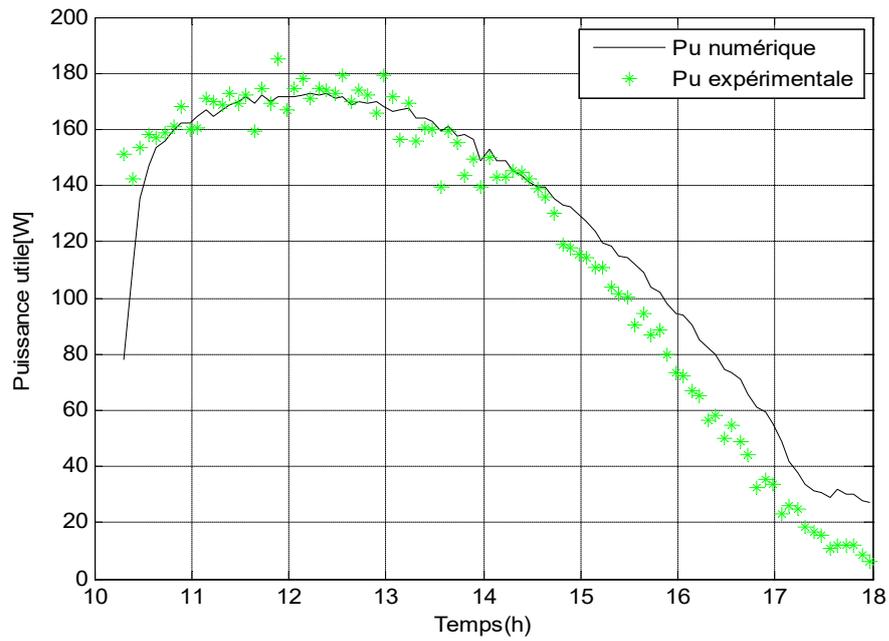


Figure N°. II.35: Comparaison entre la puissance utile simulée et expérimentale en CN

II.20. capteur en convection forcée

L'expérience 2: la même expérience précédente, sauf qu'on utilise un ventilateur avec une vitesse moyenne 0.82 m/s pour assurer la convection forcée.



Figure N°.II.36. Le ventilateur utilisé dans le capteur solaire(CF)

➤ **Les températures expérimentales du capteur solaire à air**

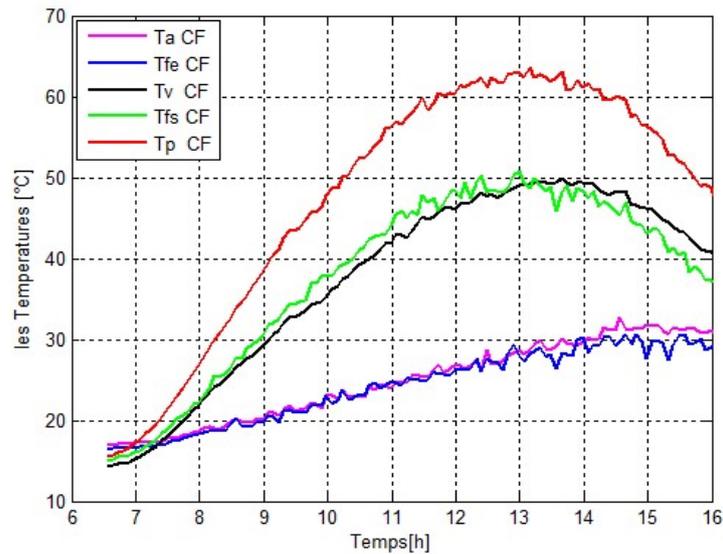


Figure N°.II.37: Les températures expérimentales en convection forcée

➤ **Rendement expérimental en convection forcée**

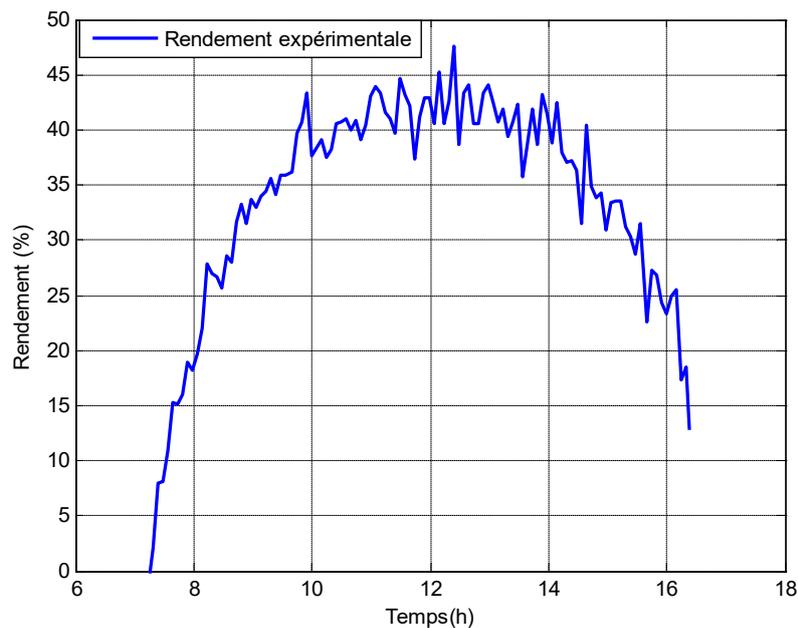


Figure N°. II.38: La variation instantanée du rendement expérimental du capteur en CF

On observe sur La figure N°. II.38, 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 N°. II.37 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 au capteur et les valeurs de la température ambiante sont presque semblables et elles prennent la plus petite valeur.

➤ Comparaison des résultats

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 :

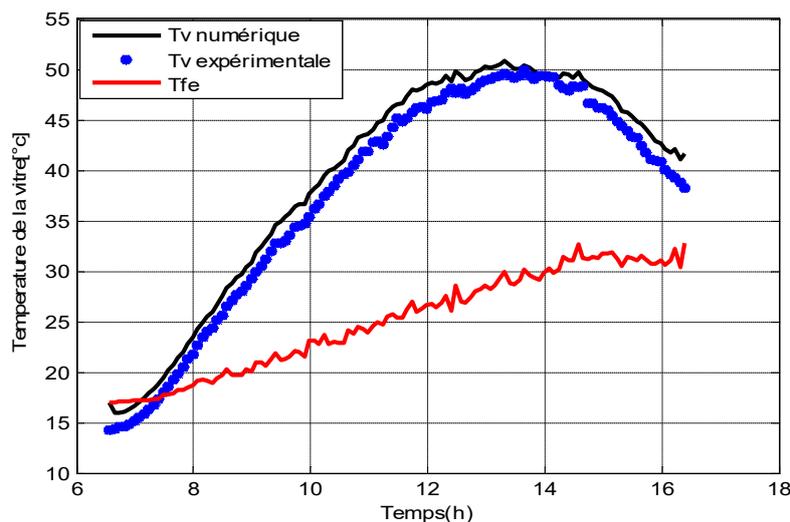


Figure N°. II.39: Comparaison entre la température du vitrage simulée et expérimentale en CF

La figure N°.II.39 représente les températures de la vitre simulée et expérimentale et la température du fluide à l'entrée (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.

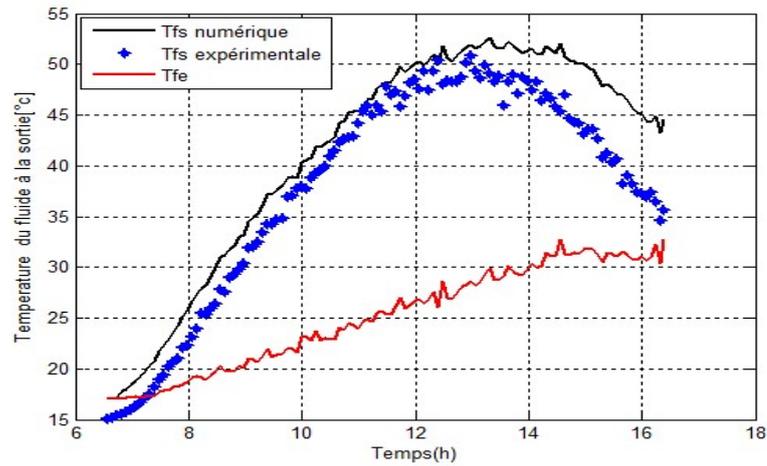


Figure N°.II.40: Comparaison entre les températures du fluide sortant théorique et expérimentale

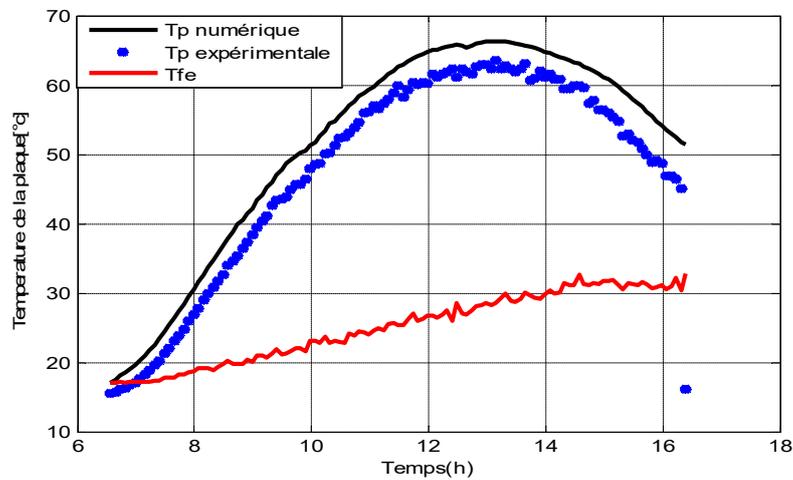


Figure N°.II.41: Comparaison entre la température de la plaque absorbante simulée et expérimentale en CF

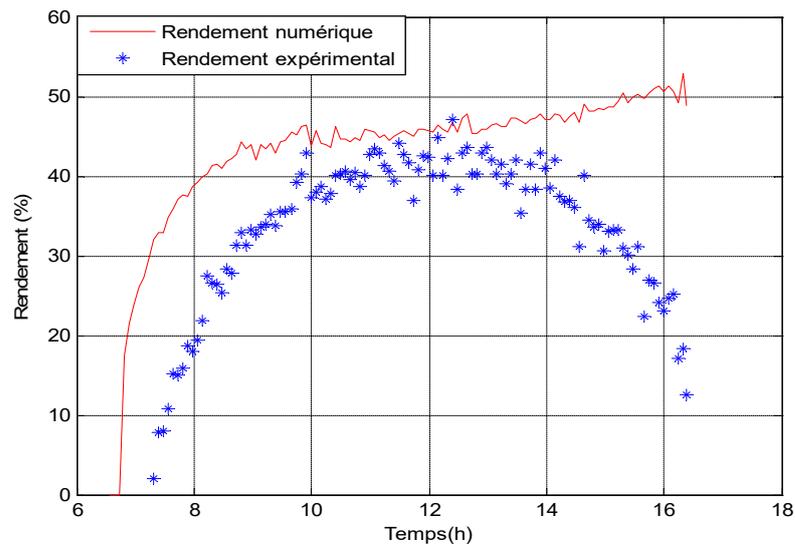


Figure N°. II.42 : Comparaison entre le rendement simulé et expérimental en CF

On peut dire que les valeurs numériques et expérimentales sont en bonne analogie (cohérence) avec un faible écart dans les extrêmes; Cet écart est observé à cause des hypothèses simplificatrices prises dans la simulation 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).

II.21. Capteur simple et à ailette avec et sans MCP en CN

La variation temporelle du rayonnement solaire de 24/02/2020

La figure N°. (II.47) représente la variation de l'éclairement solaire en fonction du temps de la journée 24/02/2020 du site de l'étude (Adrar).

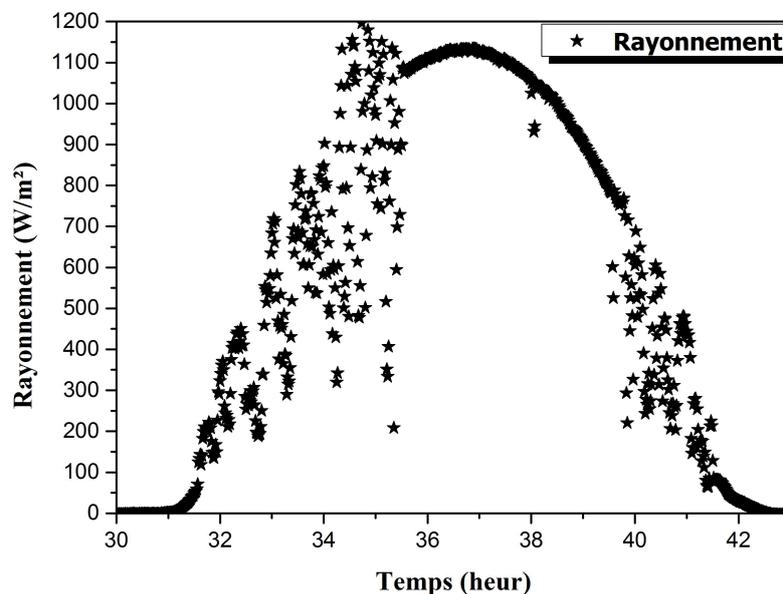


Figure N°. II.43 : La variation temporelle du rayonnement solaire de la journée de 24/02/2020

On observe que le rayonnement solaire prend la forme d'une cloche au cours de la journée, attendu qu'il prend ces valeurs minimales au coucher et au lever du soleil. Puis il atteint cette valeur maximale 1200 w/m² à midi.

Les températures de différentes composantes du capteur simple de 24/02/2020

La figure N°. (II.44) représente la variation des températures des différents composants pour le capteur simple de la journée 24/02/2020 du site de l'étude.

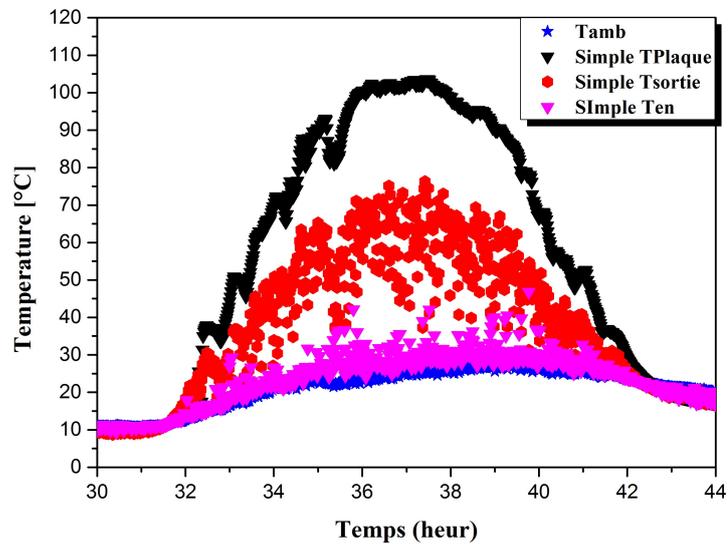


Figure N°. II.44: Températures des différentes composantes du capteur simple de 24/02/2020

L'ambiante, la plaque, l'entrée et la sortie en fonction du temps, attendu qu'elles possèdent une forme de cloche.

La figure suivante illustre les Températures de différents composants du capteur solaire à air mené de chicanes de 24/02/2020

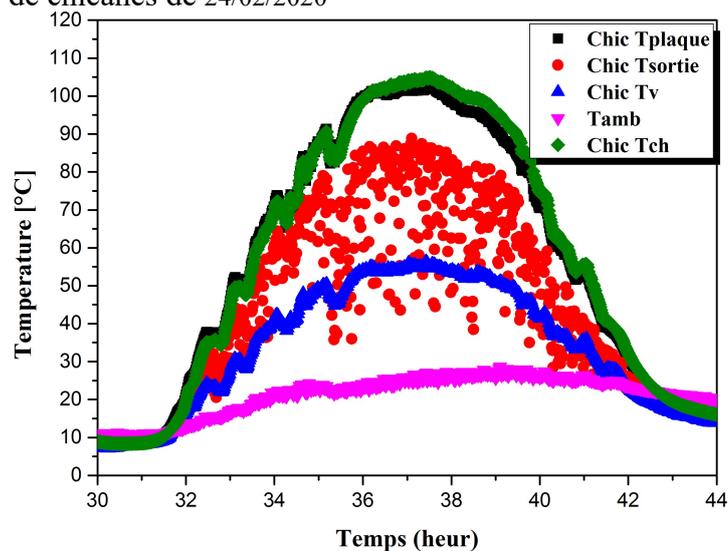


Figure N°. II.45: Les températures des différents composants du capteur solaire à air avec chicanes

La figure suivante regroupe les températures des différentes composantes du capteur solaire à air aux chicanes avec MCP de 24/02/2020

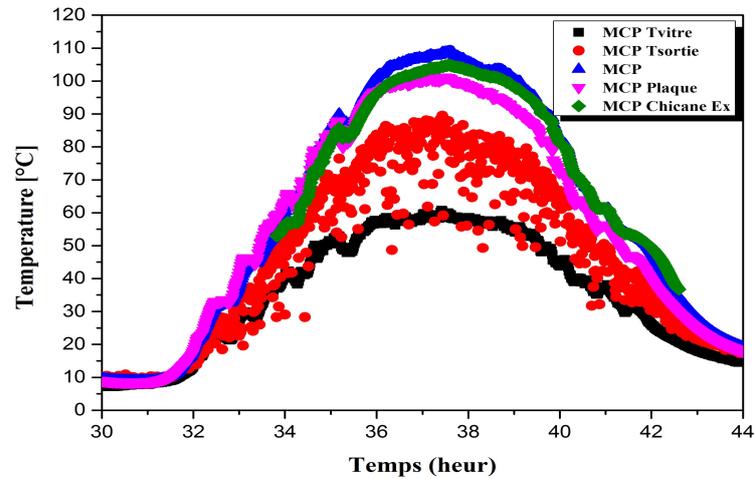


Figure N°. II.46: Les températures de différentes composantes du capteur avec chicanes et MCP

Rendement thermique des capteurs solaires à air (simple, aux chicanes et aux chicanes avec MCP)

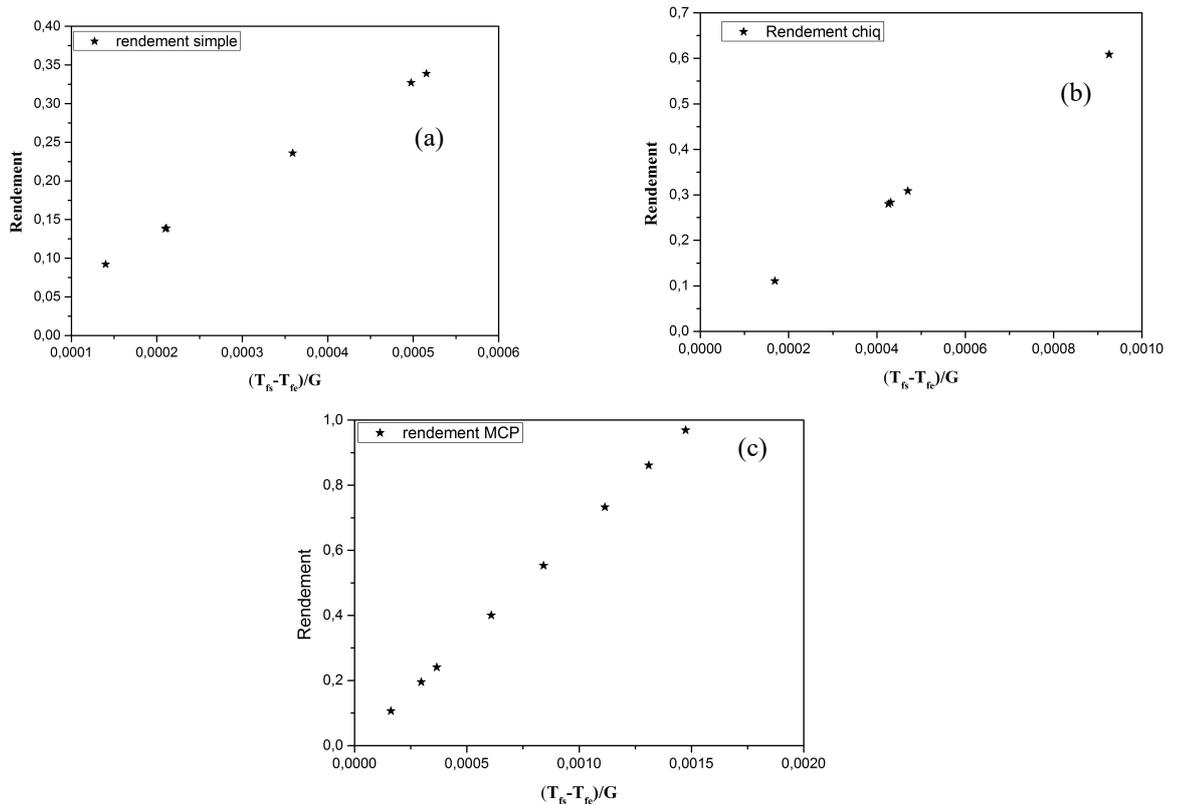


Figure N°. II.47: La variation instantanée du rendement thermique des capteurs solaires à air : simple (a), aux chicanes (b) et aux chicanes avec MCP (c).

La figure N°. II.47 représente la variation instantanée du rendement thermique des capteurs solaires à air (simple, avec chicanes et avec chicanes et MCP), on constate une amélioration du rendement de 15% et 20% pour le capteur avec chicanes et MCP par rapport le capteur simple en valeurs moyennes.

II.22. Conclusion

Une synthèse des travaux antérieurs sur les capteurs thermiques a été présentée, puis une étude numérique et expérimentale de différentes configurations pour la prolongation et l'amélioration du rendement de capteur solaire ont été présentées.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et simulés a confirmé la validation du modèle de simulation.

L'amélioration de forme, en introduisant des ailettes, de formes et orientation définies, conduit à une augmentation dans les performances, de 59% par rapport au capteur simple.

En ajoutant le MCP de quantité limitées dans ces ailettes, encore un apport de rendement de 15% par rapport à ce sans MCP a été enregistré.

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 50°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.

**Chapitre ISOTHERME DE SORPTION POUR LES DIFFERENTS PRODUITS
ALIMENTAIRES**

III

Contient les différentes méthodes de détermination des isothermes de sorption, les produits étudiés et leurs propriétés physico-chimiques, les courbes des isothermes et leur simulation.

La détermination des chaleurs isostériques et le temps de stockage font la tâche finale de ce chapitre

III.1 Introduction :

Les palmiers sont considérés parmi la famille de plantes la plus importante et classés en troisième position [16]. Divers produits consommables sont acquis auprès des palmiers, notamment les différents types de dattes, le cœur de palmier... etc. Les palmiers est l'un des produits que l'on retrouve en masse dans le sud Algérien. L'habitat local du sud connaît très bien son importance de richesse pour la consommation et sa valeur nutritive. Plusieurs travaux de recherche sont menés sur l'utilisation de nos produits comme fruit, légume et pour montrer son importance économique [16] - [28], mais peu de recherches sur les questions liées à sa conservation. Cependant, tous les produits alimentaires séchés dans de mauvaises conditions se dégradent et perdent tous leurs nutriments et leur qualité organoleptique. Les informations sur la distribution et l'intensité des liaisons des molécules d'eau et leur disponibilité fonctionnelle dans les substances biochimiques et biologiques sont des paramètres essentiels pour le séchage [24]. Ces paramètres se trouvent dans les isothermes de sorption et ne peuvent pas être prédits par la théorie. Ces informations fournissent des données sur l'équilibre chimique du produit afin de connaître les limites de stabilité après séchage et d'assurer une meilleure conservation lors du stockage. Al-Muhtaseb [18] a souligné l'importance des propriétés de sorption des produits alimentaires pour la déshydratation et en particulier la durée de conservation des produits séchés. Limousin et al [19] présente les bases physiques cachées pour mieux définir l'isotherme de sorption et les différents modèles empiriques et méthodes expérimentales pour avoir une bonne isotherme de sorption. Une étude expérimentale par Wang [20] des isothermes de désorption / adsorption par la méthode gravimétrique des pommes de terre à quatre températures de 40, 50, 60 et 70 ° C. La même expérience a été illustrée par Kaymak [21] mais avec des abricots, des raisins, des pommes et pommes de terre à 30 ° C, 45 ° C et 60 ° C pour tester les constantes des équations de sorption. Les poivrons verts et rouges ont été étudiés par Ertekin [22] qui a constaté que les chaleurs de sorption augmentaient proportionnellement à la diminution de la teneur en eau et des chaleurs de désorption. Une étude a été faite par moi-même [23] pour déterminer les composants physico-chimiques et les courbes isothermes de désorption pour les différents types de dattes du Sahara Algérien (Adrar). Akanbi [24] a choisi la tomate pour étudier leur comportement au séchage et a constaté que les modèles Oswin et GAB représentent mieux les isothermes

d'adsorption de la tomate déshydratée à 25 ° C. Goula [25] a confirmé l'idée du modèle GAB. J Quirijns [26] a discuté du modèle de séchage par diffusion-sorption et a montré que l'existence de différentes classes d'eau (eau libre et eau liée) peut être déduite par le modèle GAB. La modélisation mathématique des isothermes de sorption a été décrite dans la littérature [27] par huit modèles mathématiques empiriques et semi-empiriques. Parmi ces modèles; le modèle BET [20], Halsey [29] modifié, GAB [30], Oswin [31] modifié, Peleg [32], Henderson-Thompson [33]. Le GAB est le modèle qui décrit le mieux les aliments [34] - [37]. Peu de chercheurs ayant travaillé sur nos produits [17], [38], cependant la disponibilité de ce produit dans le Sud Algérien. Pour des raisons économiques nous a donné l'idée comme première étape de travailler sur ces produits pour donner une première plateforme à améliorer leurs traçabilité, leurs promotion sur le marché international, leurs qualité gustative et sanitaire, et à terme de préserver le tissu socio-économique. La nature hygroscopique du produit est la première étape d'une bonne appréciation du processus de séchage. Les isothermes de sorption sont des courbes permettant de déterminer les teneurs finales en eau et les seuils de températures maximales permettant d'optimiser les conditions de séchage.

Dans ce chapitre, l'étude entame la caractérisation physico-chimique des produits étudiés, en un premier lieu, ceci est pour les variétés des dattes et même pour le cœur de palmier. En un deuxième lieu, nous allons présenter la méthode et le protocole expérimental utilisés pour la détermination des courbes des isothermes de sorptions pour les produits cités. Ces résultats seront lissés par les modèles appropriés dans ce domaine. Ces isothermes seront présentées et modélisées afin de déduire les différents paramètres thermodynamiques caractérisant ces produits tels que la chaleur isostérique et la durée de vie.

III.1.1 Dattes *Takarboucht*, *Tegazza*, *Hmira* et le Cœur de Palmier :



Figure N° III.1. Echantillon des dattes *tegazza*, *takarboucht* et cœur de palmier.

Nous avons choisi la variété des dattes *Takarboucht/Tegazza/Hmira* à la base des critères suivants:

- La disponibilité de la variété de ces dattes;
- rentre dans la production de plusieurs ingrédients alimentaires: la farine (soupe) de bébé (usine de Ghardaïa) ;
- rentre dans la production de Vinaigre ;

III.1.2 Prélèvement des dattes *Takarboucht/Tegazza* et le cœur de palmier :

III.1.2.1 *Takarboucht/Tegazza* : Les dattes *Takarboucht/ Tegazza* sont récoltées au mois d'Aout/Octobre-Novembre, période de maturation des dattes, dans le site de Bouda, situé 30km Ouest d'ADRAR. La datte est une baie, de forme généralement allongée dans la plupart du temps, mais le fruit peut avoir différentes formes et couleurs, leurs dimensions sont très variables de 1,5 à 8 cm de longueur et d'un poids de 2 à 18 g. Sur le plan botanique, la datte est une baie ayant une seule graine communément appelé noyau. La variété dattes *Takarboucht/Tegazza* est un type de dattes Grossier, moyenne sucré et énergétique, le poids atteint 8g, la longueur moyenne de 2à 7cm, et de diamètre moyen de 1.8 cm, contenant un « noyau » allongé et marqué d'un sillon longitudinal, Originare de la région de Bouda dans la région de Touat, Algérie.

III.1.2.2 *Cœur De Palmier* : La recherche a été réalisée sur de jeunes palmiers dattiers "Gharsa" (voir figure N°. III.1) de la zone de bouda au sud de l'Algérie "Adrar", dans

de bonnes conditions au laboratoire UREMS. Après avoir extrait le cœur de palmier, la préparation des échantillons pour l'étude a été entamée.

III.2.La composition physicochimique des dattes Takarboucht, cœur de palmier.

III.2.1 Les dattes Takarboucht : La composition physicochimique des dattes Takarboucht est donnée par le tableau suivant :

Tableau III.1 : La composition physicochimique des dattes Takarboucht

Constituant	Eau H%	Matière sèche	Matière M _O	M _m	Sucre	Lipide
%	22.25	77.75	74.79	2.96	74.14	0.65

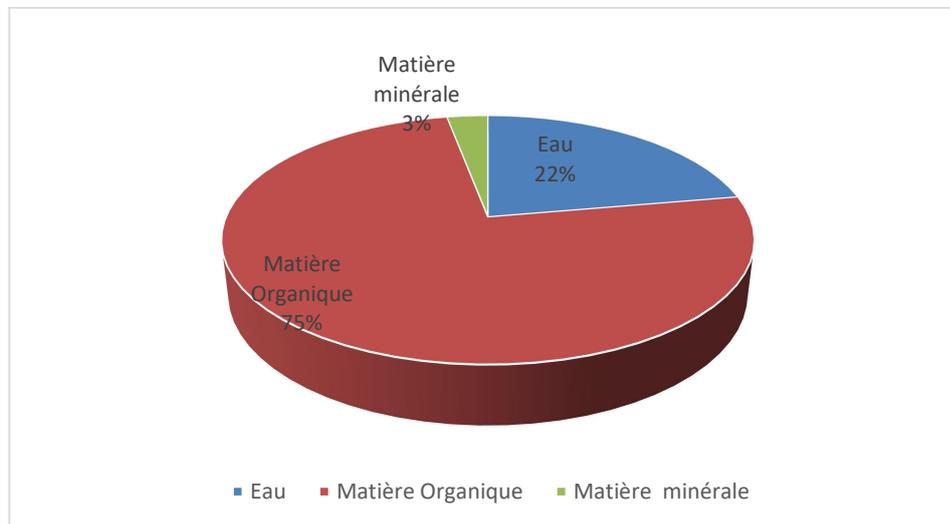


Figure N°. III.2 La composition physicochimique des dattes de takarboucht

III.2.1 Le Cœur De Palmier : La composition physicochimique du Cœur De Palmier est détaillée sur le tableau suivant :

Tableau III.2 : La composition physicochimique du Cœur De Palmier

Composition	Humidité	Matière sèche	Matière Minérale	Matière organique
%	83	17	13.77	3.23

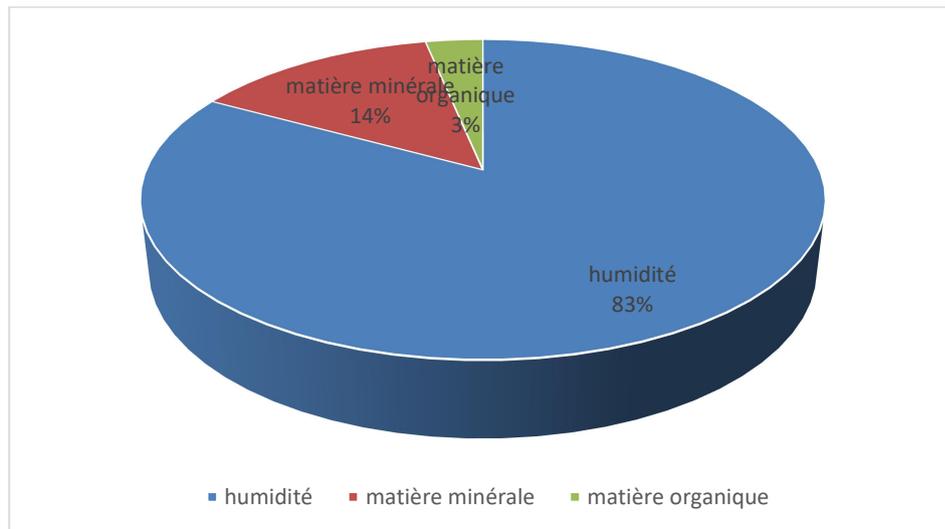


Figure N°. III.3. La composition physicochimique du Cœur De Palmier

III.2.1 Matériel et mode opératoire:

Les procédures d'obtention des isothermes de sorption d'eau à partir de produits agroalimentaires sont décrites en détail par plusieurs auteurs [38], [40]. Ces procédures comprennent soit des méthodes dynamiques où l'échantillon est placé dans un courant de gaz, la température et l'humidité maintenues constantes, sans agitation de l'air, ou des procédures statiques (adsorber ou désorber) où l'échantillon, est placé dans des enceintes contenant des solutions de sels saturés et maintenu à température et humidité relative constantes, jusqu'à atteindre l'équilibre thermodynamique. Pour déterminer les isothermes de désorption; nous avons utilisé la technique gravimétrique dont elle est basée sur la méthode des solutions salines saturées. La teneur en humidité à l'équilibre est calculée pour des températures de 30, 40 et 50 ° C.



Figure N° III.4. Appareillage pour la détermination des isothermes de sorption

Le dispositif expérimental utilisé consiste en un four rempli de huit pots de solutions salines saturées (KOH, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, K_2CO_3 , $NaNO_3$, KCl et $BaCl_2 \cdot 6H_2O$) qui permettent d'obtenir une activité en eau comprise entre 0,07 et 0,96 [41]. Les solutions sont préparées par désolution d'une quantité bien étudiée de sel dans de l'eau distillée. L'ensemble mis à une température plus élevée pour assurer la saturation et parvenir à l'équilibre [16], [42]. Tous les pots sont en verre d'un demi-litre avec un couvercle hermétique. Chaque pot rempli respecte le rapport de 1/4 de solution saline saturée au vide. Pour confirmer la saturation des solutions à l'équilibre, une couche est maintenue visible des sels solides. Chaque échantillon pèse $1 \pm 0,001$ g. Tous les pots sont placés dans une étuve où la température a été bien contrôlée. Cette opération dure jusqu'à la stabilisation de la masse de l'échantillon.

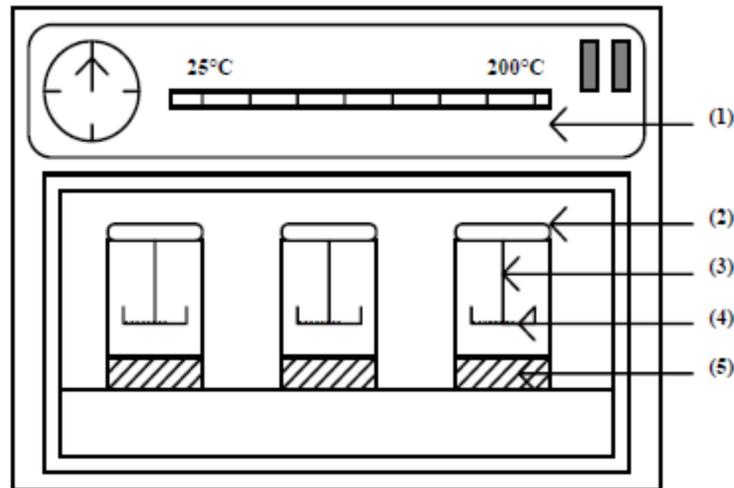


Figure N°. III.5. Schéma explicatif de détermination des isothermes de sorption :

1-Bain thermo staté, 2- Bocal, 3- Porte échantillon, 4- Produit, 5- Solution saline saturée

L'étape suivante consiste à placer les échantillons qui ont été pesés auparavant dans des pots contenant des solutions salines saturées (voir figure N°. III.3).

Après la fermeture des bocaux, le tout sera mis dans la même cuve où la température a été contrôlée. La pesée sera quotidienne jusqu'à la stabilisation de la masse avec une erreur acceptable d'environ 2%.

$$X_{eq} = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (\text{III-1})$$

La teneur en humidité du produit d'équilibre hygroscopique X_{eq} est calculée par l'équation (III-1) où m_w et m_d sont respectivement les masses de séchage (avant et après) [35].

Critères statistiques de choix des modèles décrivant les isothermes de sorption :

On trouve huit modèles mathématiques dans la littérature pour modéliser les isothermes de sorption. Ces modèles sont basés sur une base plus ou moins physique [44] - [46], qui décrit la relation entre la teneur en humidité d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température.

Tableau III.3 Principaux modèles mathématiques pour décrire les isothermes de sorption

Nom dumodèle	Equations
Oswinmodified[43]	$X_{eq} = (A + BT) \left[\frac{A_w}{1 - A_w} \right]^c$
BET modified (Iglesias and chirifie1982) [44]	$X_{eq} = \frac{(A + BT) \cdot C \cdot A_w}{[1 - A_w] \cdot [1 - A_w + C \cdot A_w]}$
Peleg model (1993) [24]	$X_{eq} = A \cdot A_w^{K1} + B \cdot A_w^{K2}$
Langmuir (1916) [45]	$X_{eq} = \frac{1}{[A + B \cdot A_w^{c-1}]}$
GAB (van den berg 1984) [46]	$X_{eq} = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot A_w}{[1 - B \cdot A_w] \cdot [1 + B \cdot A_w + B \cdot C \cdot A_w]}$

Dans ce travail, nous avons étudié en détail quatre modèles mathématiques qui ont été regroupés dans le tableau III.4 pour l'ajustement et la modélisation des isothermes de sorption du cœur de palmier pour les trois températures 30, 40 et 50 ° C. L'analyse de l'ajustement et du choix du modèle approprié pour estimer les constantes du modèle à partir des résultats expérimentaux se fait via deux progiciels (Curve Expert 1.4 et Origin 6). Trois paramètres statistiques pour le calcul de l'écart sont définis par les équations 2, 3 et 4. Le coefficient de corrélation (r), l'erreur standard (S) et le pourcentage de différence relative moyenne (P)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{exp.data}} (X_{ei} - X_{ecal})}{n_{exp.data} - n_{param}}} \quad (III-2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n_{exp.data}} (X_{ei} - X_{ecal})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_{exp.data}} (X_e - X_{ei})^2}} \quad (III-3)$$

$$P\% = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n_{exp.data}} \left(\frac{X_{ecal} - X_{ei}}{X_{ei}} \right) \quad (III-4)$$

X_{ecal} et X_{ei} sont respectivement la valeur calculée et la valeur expérimentale de la teneur en humidité à l'équilibre, n_{param} est le numéro des paramètres du modèle particulier

Détermination de la chaleur isostérique de sorption :

La chaleur de sorption isostérique est l'énergie de fixation de l'eau sur le substrat, ou bien de la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure qui devrait être fournie avec le produit pour le déshydrater, peut être déterminée par une équation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron [35], [47], [48], à partir des données de sorption d'humidité.

$$Q_{st} = -R \left[\frac{\partial(\ln A_w)}{\partial \frac{1}{T}} \right] \tag{III-5}$$

En supposant que la chaleur de sorption isostérique indépendante de la température, l'intégration de cette équation donne l'équation (III-6) :

$$\ln(a_w) = - \left(\frac{q_{st}}{R} \right) \left(\frac{1}{T_k} \right) + k \tag{III-6}$$

III.3 Résultats Expérimentaux et Simulation :

Après avoir obtenu les masses humides et sèches de toutes les prises d'essais et calculé les teneurs en eau d'équilibre, les données sont reportées, pour les trois températures (40°C, 50°C et 60°C) dans ce qui suit.

III.3.1 Isotherme de désorption de dattes :

L'équilibre hygroscopique pour la désorption des dattes est réalisé. Les figures N°. III.1,2,3 montrent que l'isotherme de désorption a une allure sigmoïdale, Ceci est en concordance avec le comportement des autres produits agroalimentaires. [33]

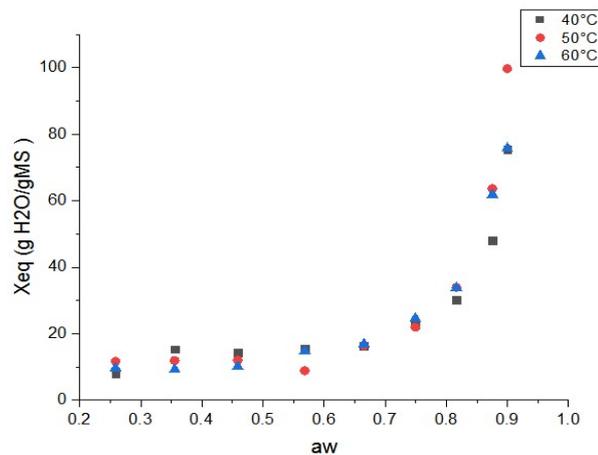


Figure N°. III.6 : Isotherme de désorption de Dattes Hmira: Points expérimentaux à trois températures de travail

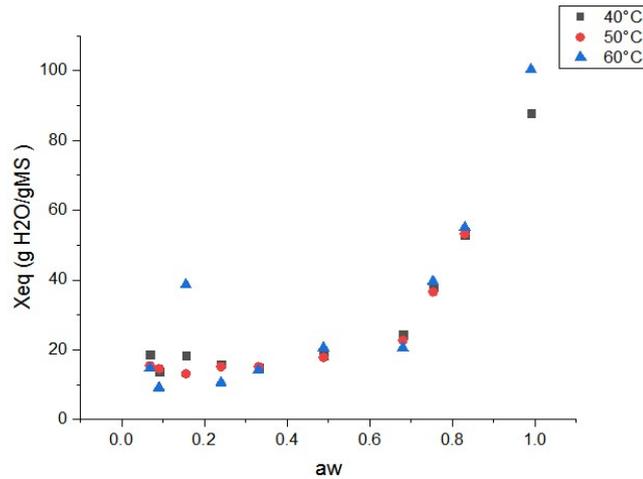


Figure N° III.7. Isotherme de désorption de Dattes Tegazza : Points expérimentaux à trois températures de travail

III.3.2 Isotherme de désorption de cœur de palmier :

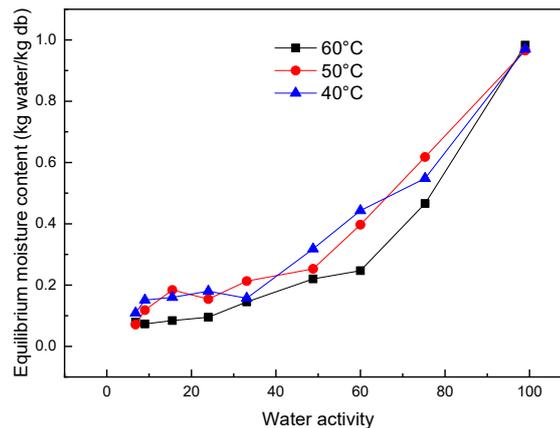


Figure N° III.8. Isotherme de désorption de cœur de palmier

III.4 Modélisation des Courbes :

III.4.1 Modélisation des Courbes par les modèles empirique :

En utilisant le logiciel CurveExpert, nous testons les équations des modèles mentionnés ci-dessus sur les courbes de teneur en eau (X_{eq}) en fonction de l'activité de l'eau (a_w) pour différents échantillons à des températures de 40, 50 et 60 °C.

Dans le volet des résultats, logiciel donne différents modèles compatibles avec les courbes dans l'ordre des valeurs d'erreur standard (S) et Coefficient de détermination (r^2).

Les tableaux (III.4), (III.5) et (III.6) suivants résument les trois modèles de courbes d'Isotherme de désorption de dattes les plus compatibles pour chaque type de dattes à différentes températures.

➤ **Datte de Hmira :**

Tableau III.4: paramètres des modèles des isothermes de désorption des dattes Hmira pour les Trois températures

modèle	paramètre	Température		
		40°C	50°C	60°C
GAB	A	5.1620911E+00	4.8531150E+00	5.7782679E+00
	B	1.0317648E+00	1.0566205E+00	1.0281214E+00
	C	6.0400555E+07	1.8173366E+08	1.1486393E+07
	S	5.034421E-02	3.3245492E-02	2.2044421E-02
	r ²	0.96164668	0.99222759	0.99389443
	EMR	15.279690	14.222570	4.524473
BET	A	1.2678723E+01	9.4542305E+00	1.2174080E+02
	B	8.2889540E+06	3.6897531E+06	2.1800194E-01
	n	9.7620384E-01	9.5404166E-01	9.8499994E-01
	S	2.1430291E-02	1.8029954E-02	3.0099267E-02
	r ²	0.993050100	0.99771398	0.98861741
	EMR	4.2352600	4.527888	5.193051
Peleg	A	5.2651706E+02	2.2602260E+01	1.9817306E+02
	k	2.1956372E+01	6.0785932E-01	1.1627000E+01
	B	2.3808648E+01	6.1300308E+02	1.9485113E+01
	q	5.7427963E-01	1.9632646E+01	6.3730462E-01
	S	2.8620452E-02	2.3582715E-02	1.8040466E-02
	r ²	0.99008376	0.99687127	0.99659244
	EMR	8.7408580	7.058619	5.479267

Les courbes des isothermes de désorption des points expérimentaux décrivant par les modèles empiriques Au-dessus pour les différentes températures:

- **Modèle de GAB :**

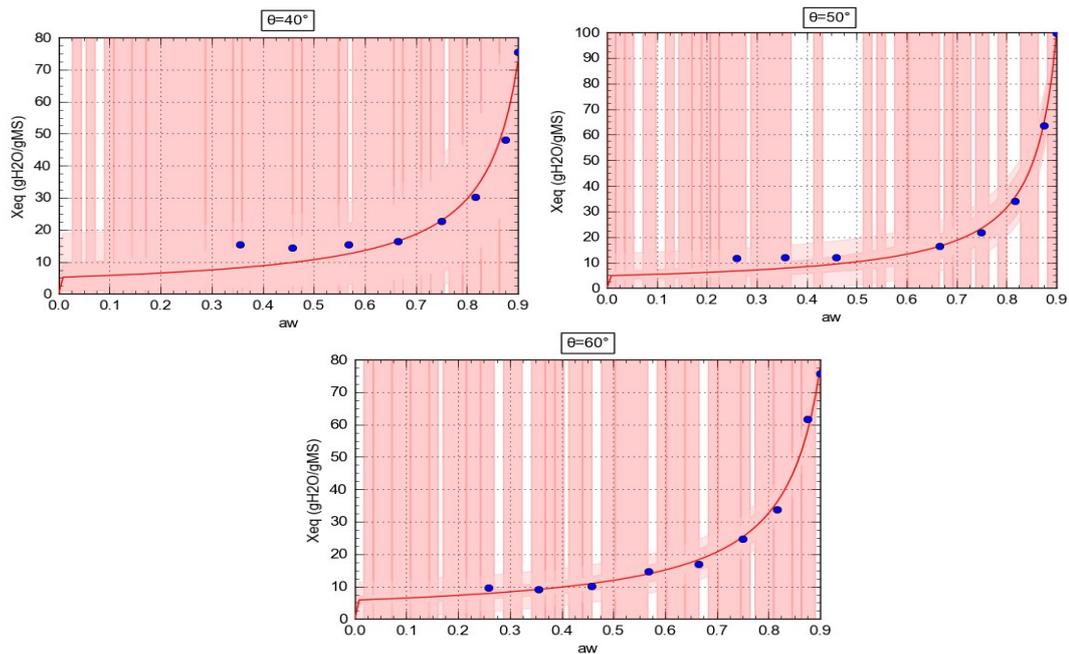


Figure N°. III.9 Les courbes des isothermes des dattes Hmira décrites par le modèle de GAB pour les différentes températures

- **Modèle de Peleg :**

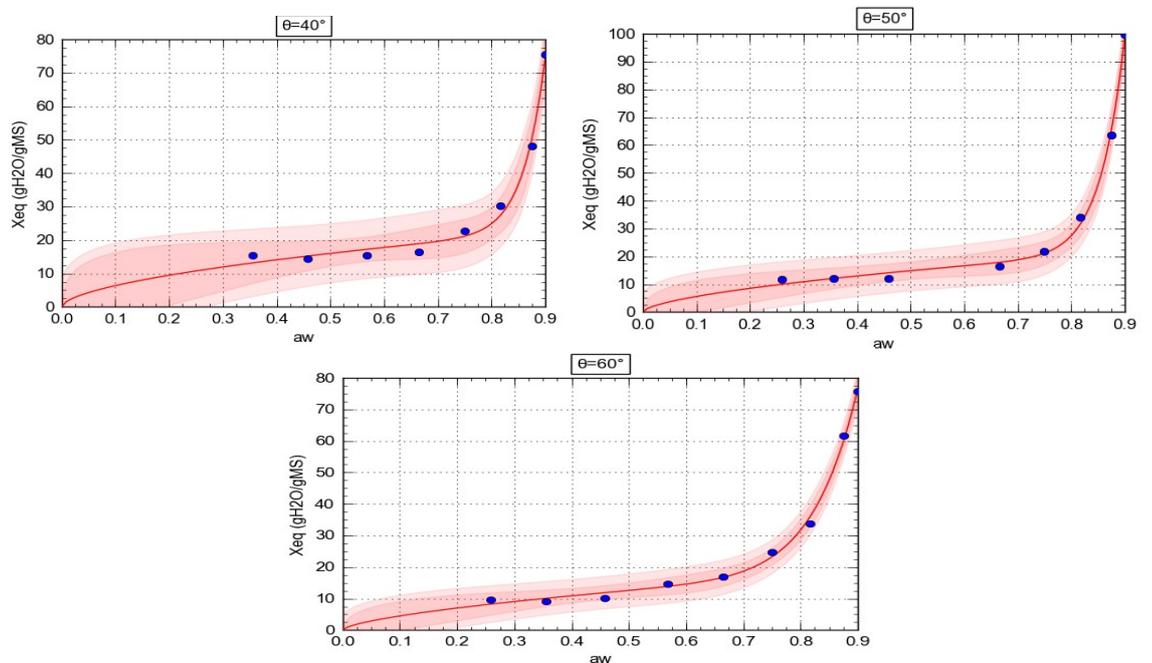


Figure N°. III.10 Les courbes des isothermes des dattes Hmira décrites par le modèle de Peleg pour les différentes températures

- **Modèle de BET :**

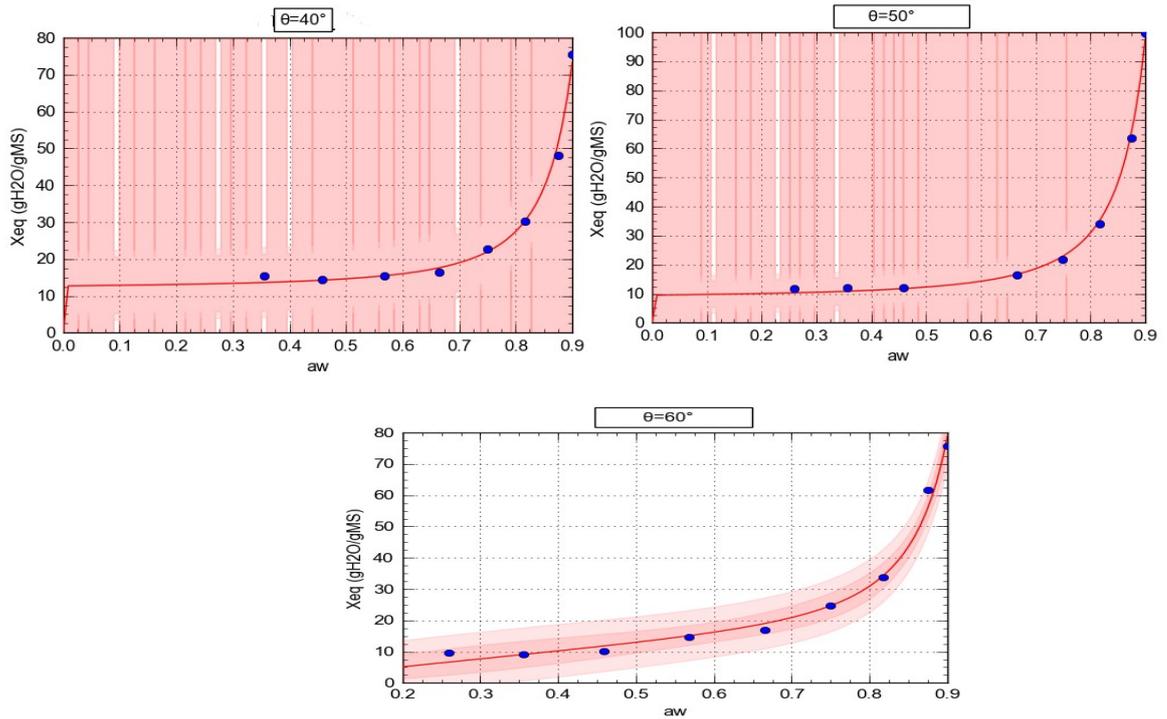


Figure N°. III.11 Les courbes des isothermes les dattes Hmira décrites par le modèle de BET pour les différentes températures

➤ **Datte de Tegazza :**

Tableau III.5 : paramètres des modèles des isothermes de désorption des dattes Tegazza pour les Trois températures

Modèle	Paramètres	Température		
		40°C	50°C	60°C
GAB	A	1.3327770E+01	1.1044549E+01	1.3984214E+01
	B	8.5889476E-01	9.4885052E-01	8.7142505E-01
	C	-5.1646033E+07	1.1007448E+09	2.5824129E+01
	S	4.4593631E-02	2.9563704E-02	4.5808832E-02
	r ²	0.98269529	0.97451582	0.98496149
	EMR	10.494460	10.915870	22.679570
Peleg	A	7.6733311E+01	1.5682230E+01	8.9566282E+01
	k	3.9371426E+00	1.7463815E-02	4.2310118E+00
	B	1.4325051E+01	1.1170963E+02	1.4331035E+01
	q	2.8257935E-04	5.8531375E+00	7.8335399E-02
	S	1.5996263E-02	5.9055339E-03	2.8472043E-02
	r ²	0.99833000	0.99923734	0.99535235

	EMR	3.526902	2.001272	5.771230
BET	A	5.0012483E+03	1.4675042E+01	5.8304975E+03
	C	1.1017352E-02	6.5027424E+03	9.7365748E-03
	n	9.9996878E-01	9.6032650E-01	9.9996000E-01
	S	7.6538275E-02	2.0139719E-02	7.5971329E-02
	r ²	0.94902279	0.98817341	0.95863759
	EMR	24.522360	4.515701	22.583230

- **Modèle de GAB :**

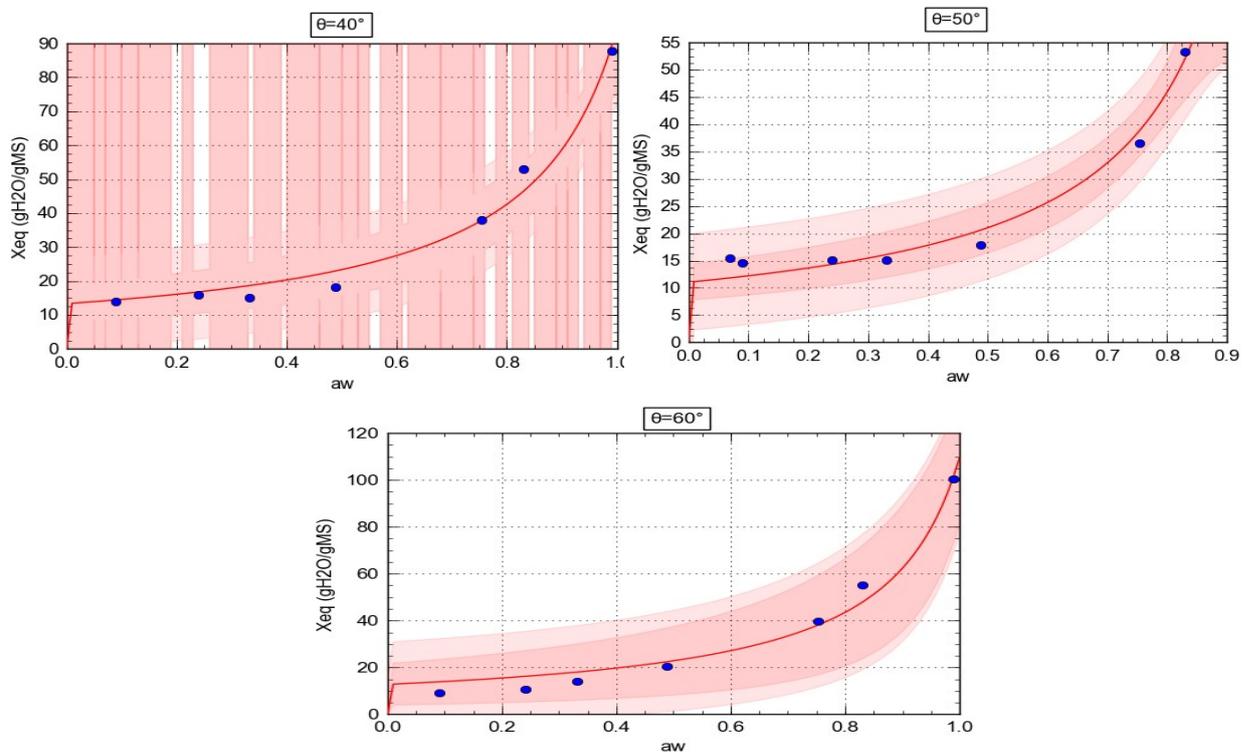


Figure N°. III.12 Les courbes des isothermes des dattes Tegazza lissées par le modèle de GAB pour les différentes températures

- **Modèle de Peleg :**

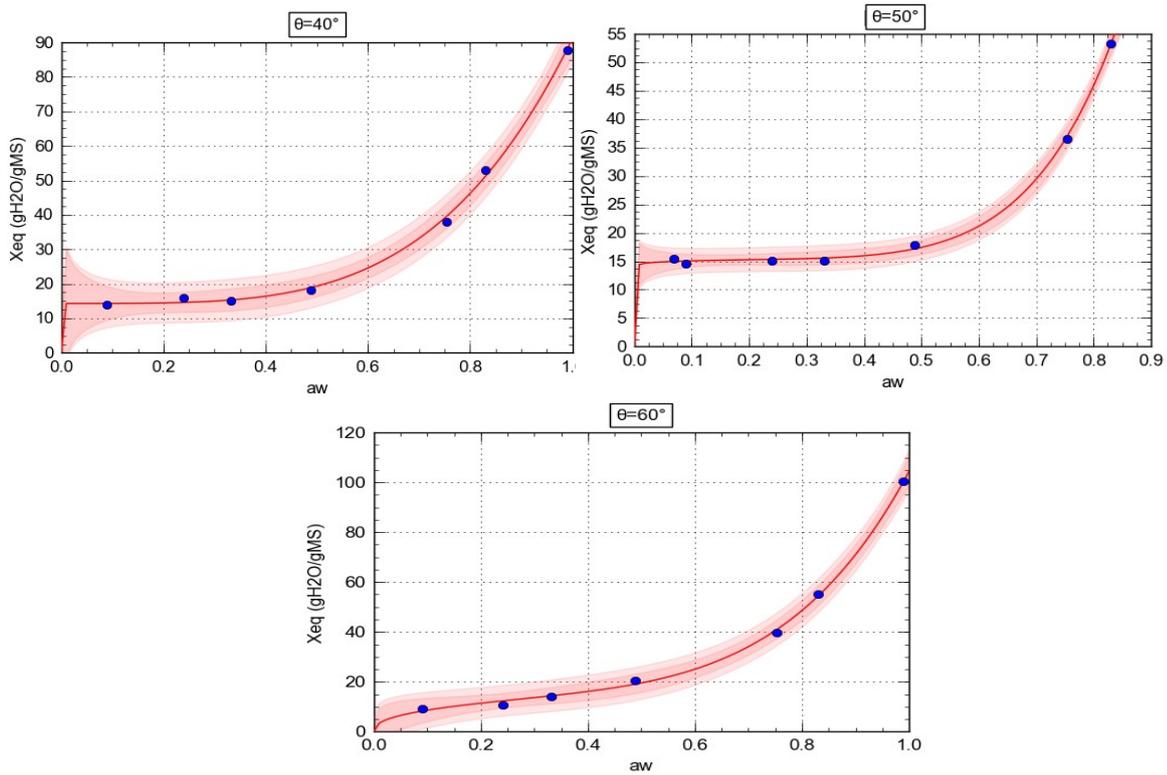


Figure N°. III.13 Les courbes des isothermes des dattes Tegazza lissées par le modèle de Peleg pour les différentes températures

- **Modèle de BET :**

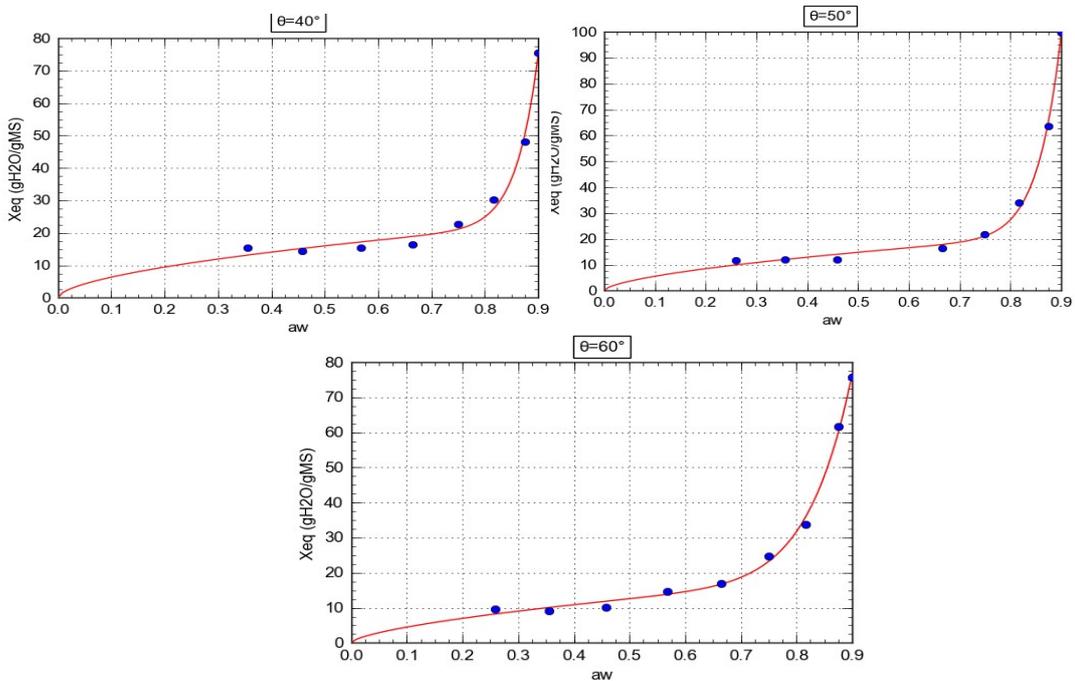


Figure N°. III.14 Les courbes des isothermes les dattes Tegazza lissées par le modèle de BET pour les différentes températures

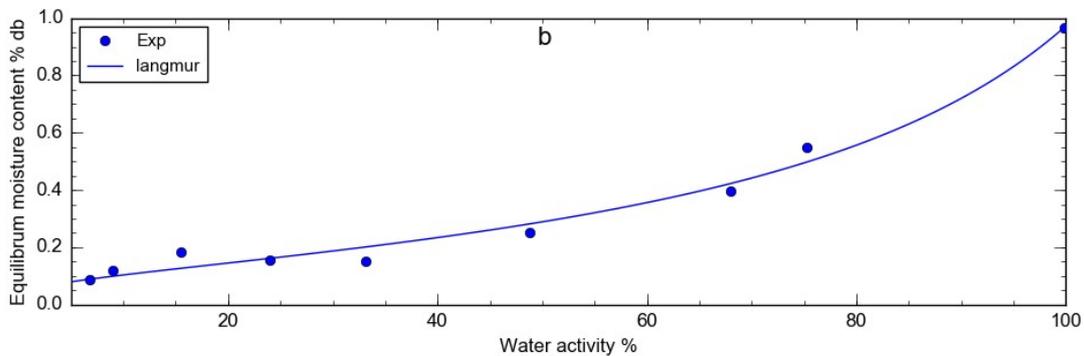
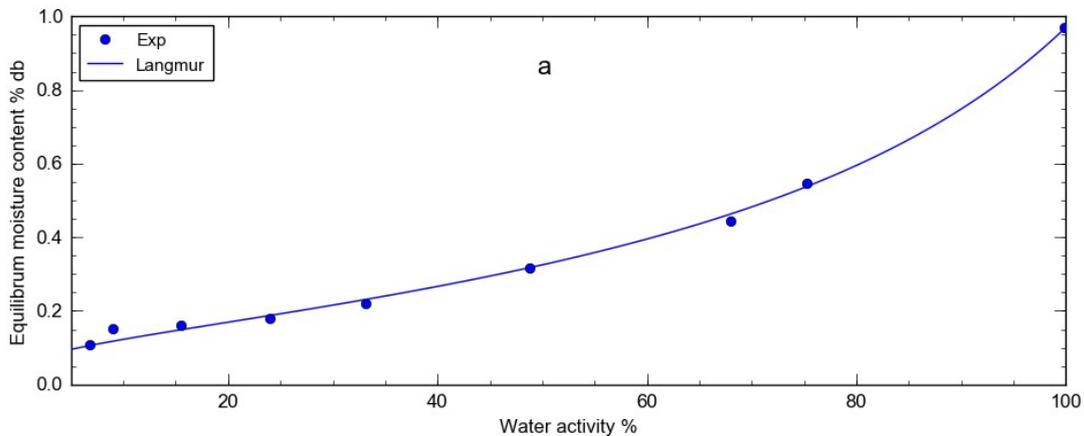
En observons que le même modèle ne peut décrire plusieurs produits agricoles en un seul et cela en raison de la composition différente de l'eau dans chaque produit alimentaire, comme le démontrent de nombreuses études sur le terrain.

À partir des résultats des tableaux ci-dessus, nous concluons que:

- ✓ Le modèle le plus approprié pour décrire isotherme de désorption pour les dattes de Tegazza est le modèle Peleg.
- ✓ En ce qui concerne les dattes hmira, le modèle BET est le mieux adapté pour décrire l'isotherme de désorption.

Ceci est basé sur le choix des valeurs les plus faibles pour les erreurs standard (S) et relative moyenne (EMR), et les plus grandes valeurs pour le coefficient de corrélation (r^2) aux températures expérimentales.

➤ **Cœur de palmier :**



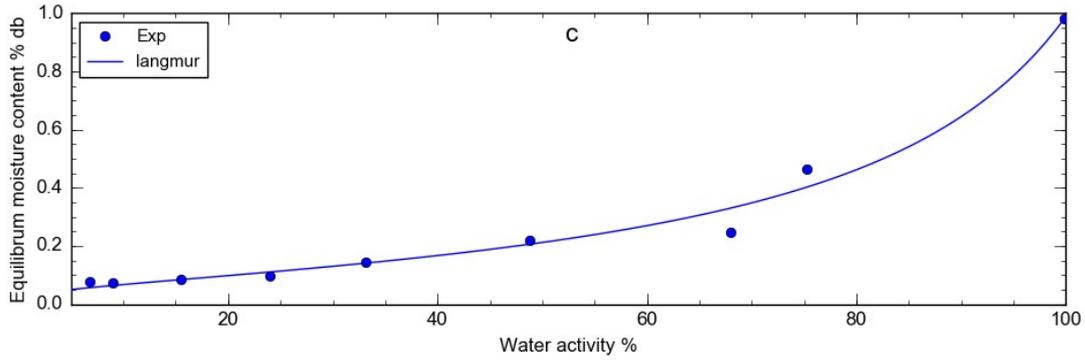
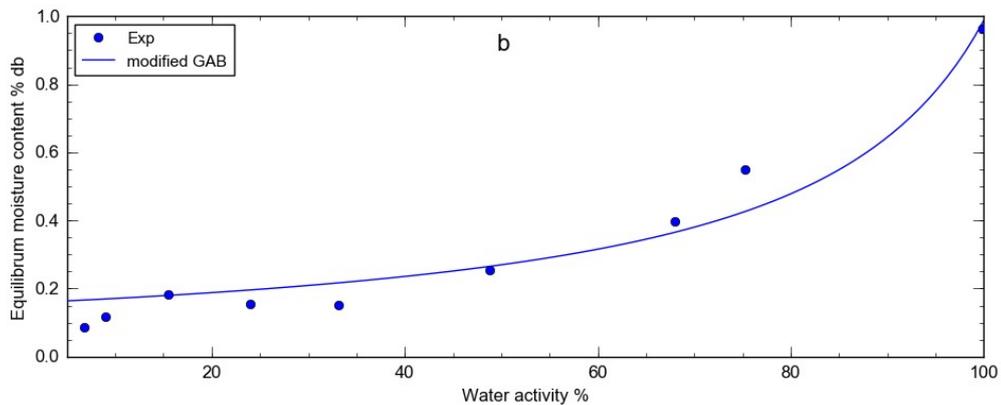
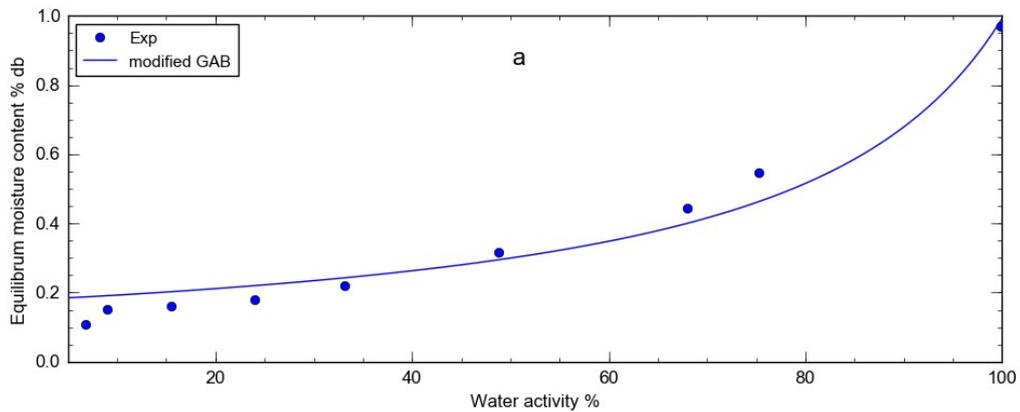


Figure N° III.15 Isothermes expérimentaux d'adsorption du cœur de palmier à 40° C (a), 50° C (b) et 60 ° C (c) simulés par le modèle LANGMUIR.

Tableau III.6. Résultats de l'ajustement des isothermes de sorption

Modelnames	T(°C)	A	B	C	R	R ²	EST
Langmuir	40	-48.1648	64.5001	0.9411	0.998	0.9968	0.018
	50	-41.788	61.815	0.920	0.992	.98640	0.041
	60	-33.966	68.31	0.854	0.991	0.983	0.044
ModifiedGAB	40	-0.1764	57.703	0.999	0.982	0.964	0.0598
	50	-0.156	44.668	0.999	0.975	0.951	0.072
	60	-0.113	22.52	0.999	0.980	0.961	0.980



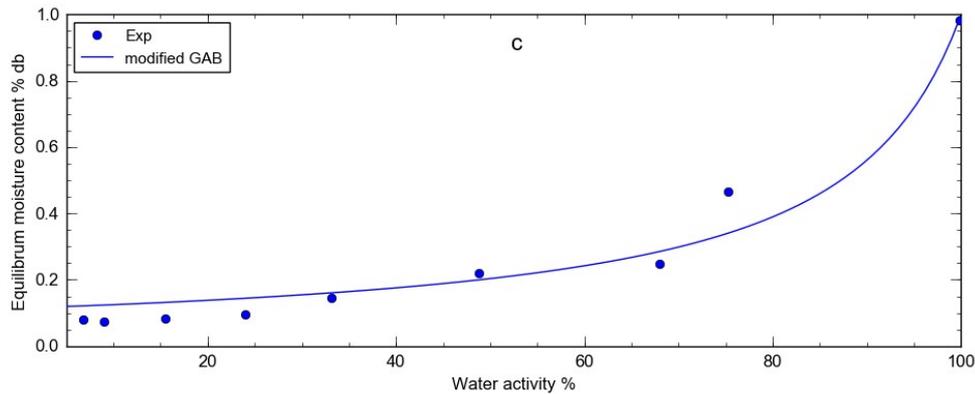


Figure N°III.16 Isothermes expérimentaux d'adsorption du cœur de palmier à 40° C (a), 50° C (b) et 60 ° C (c) simulés par GAB modifié

Les isothermes de désorptions expérimentales obtenues à 30, 40 et 50 ° C sont présentées sur la figure 16. Ils ont un aspect sigmoïde selon la classification du BET, et en concordance avec le comportement d'autres produits agroalimentaires [49]. On note que la teneur en eau d'équilibre augmente avec l'augmentation de l'activité de l'eau qu'ils contiennent. Une région de flexion observée sur les isothermes de sorption dans la plage d'activité de l'eau de 65 à 80. selon la littérature et selon [16], [50], les courbes des isothermes de sorption du palmier peuvent être divisées en trois zones:

La première zone d'activité de l'eau dans la gamme de (13-50) est une zone d'une quantité minimale d'eau. Cette quantité est due aux sites actifs par les liaisons hydrogène dans les molécules des groupes polaires. La deuxième zone (50-85) est la zone de réactions chimiques et biochimiques. Sous la monocouche se trouve une petite quantité d'eau et à un moment donné où nous avons une forte teneur en eau, l'eau remplit les micropores et les macropores. La troisième zone (70 à 0,9) où l'excès d'eau dans les macrocapillaires provoque la création ou la naissance microbienne. Le tableau 3 montre les résultats de l'analyse de régression non linéaire des isothermes de désorption cardiaque du palmier obtenus à 30, 40 et 50 ° C. Les valeurs des constantes des modèles sont toutes incluses dans le tableau 4. A, B et C sont les coefficients standards de chaque modèle. r et EST sont respectivement le coefficient de corrélation et l'erreur standard. Les figures 4 et 5 montrent l'adsorption expérimentale des cœurs de palmier à 30 (a), 40 (b) et 50 ° C (c) simulée respectivement par les modèles GAB et BET. Le traitement des données obtenues nous a montré des résultats acceptables pour la prédiction de la teneur en humidité du cœur de palmier. Les résultats fournis par les deux modèles GAB et Peleg

montrent une bonne correspondance avec les isothermes de sorption par rapport aux autres modèles (faible erreur standard et coefficient de corrélation élevé).

III.5 Détermination de la chaleur isostérique de sorption :

Pour calculer la chaleur isostérique de sorption, nous utilisons les données accompagnant le modèle PELEG dans le volet des résultats, en fixent la valeur de la teneur en eau et en enregistrant les valeurs d'activité de l'eau pour chaque température expérimentale, puis tracer les courbes

III.5.1 Détermination de la chaleur isostérique de sorption pour les dattes Hmira:

Tableau III.7: les valeurs d'activité d'eau pour des valeurs fixes de la teneur en eau au températures 40 et 60°C pour les dattes deHmira

ln(aw)			1/T (1/K)
Xeq=0.16(g/g)	Xeq=0.15(g/g)	Xeq=0.1(g/g)	
-0.40692	-0.43278	-1.40854	0.003195
-0.40452	-0.42297	-0.65105	0.003003

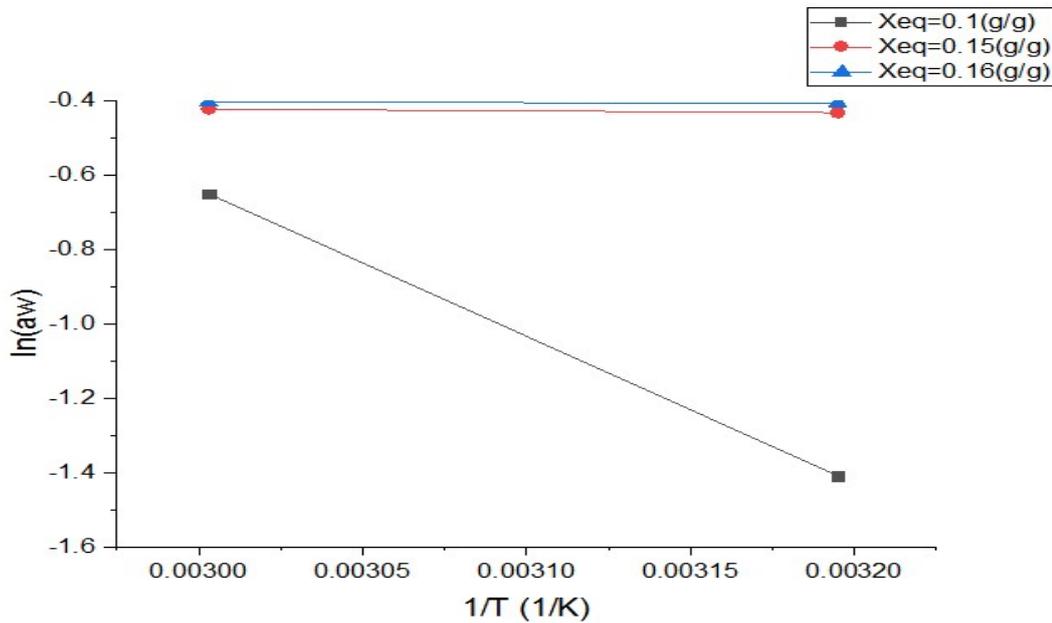


Figure N° III.17 Isostères de désorption pour les dattes Hmira

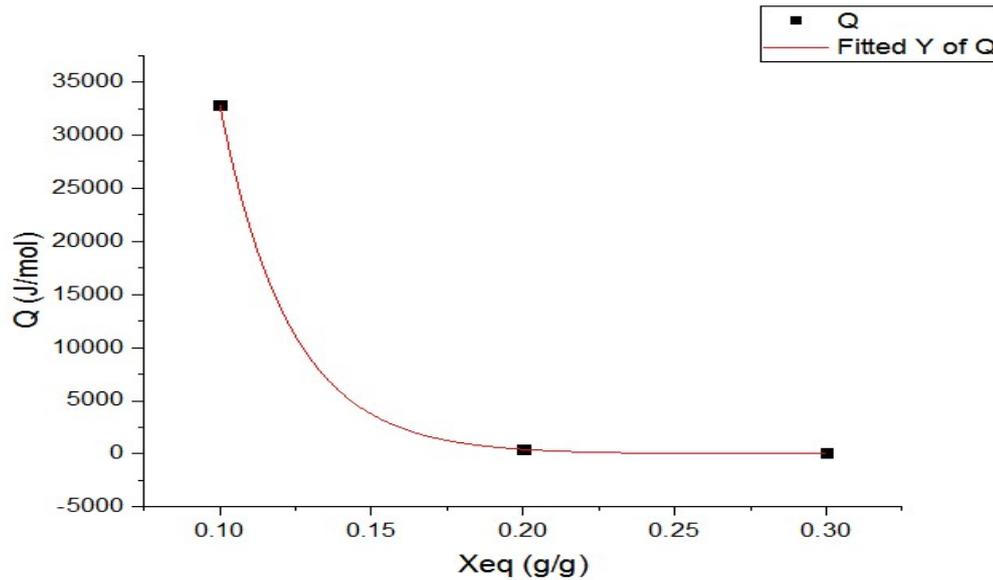


Figure N° III.18 Chaleur isostérique nette de désorption de dattes Hmira en fonction de la teneur en eau d'équilibre

Dans la figure 18, On observe également une augmentation de la chaleur nette de désorption, au fur et à mesure que le degré de déshydratation augmente. Cela due à l'existence des sites polaires fortement actifs dans le produit qui sont couverts de molécule d'eau formant la couche moléculaire [34].

La régression non linéaire à été employée pour évaluer les paramètres de l'équation empirique (II-10) avec le procédé de Levenberg-Marquardt (Tableau(III.8)). Ces résultats est en parfait accord avec les résultats obtenus par [35] pour d'autre produit alimentaire.

Tableau III.8: Estimation des Paramètres de l'équation empirique (II-11) pour les dattes Hmira

Q_0 (kJ/mol)	X_0 (g H ₂ O/g M _S)	r^2
2515.87787723	0.023	0.99997

III.5.2 Détermination de la chaleur isostérique de sorption pour dattes Tegazza :

En suivant la même méthode, nous trouvons:

Tableau III.9: les valeurs de l'activité d'eau pour desvaleurs fixes de la teneur en eau au températures 40 et 60°C pour dattes Tegazza

ln(aw)				1/T (1/K)
Xeq=0.35(g/g)	Xeq=0.3(g/g)	Xeq=0.2(g/g)	Xeq=0.15(g/g)	
-0.33408	-0.44519	-0.97631	-2.20818	0.003195
-0.33129	-0.43248	-0.89968	-1.81094	0.003003

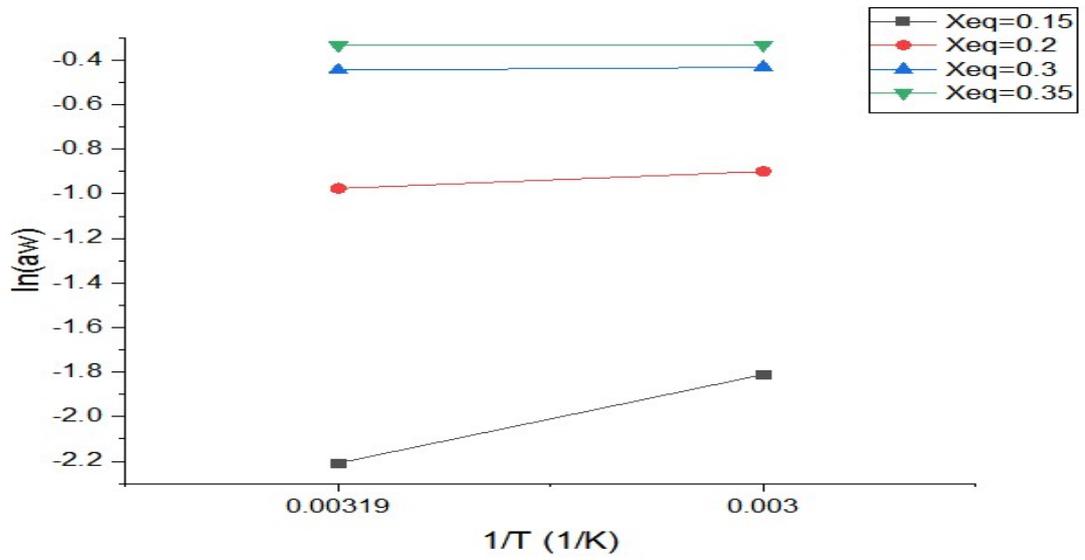


Figure N°.III.19. Isostères de désorption pour les dattes Tegazza

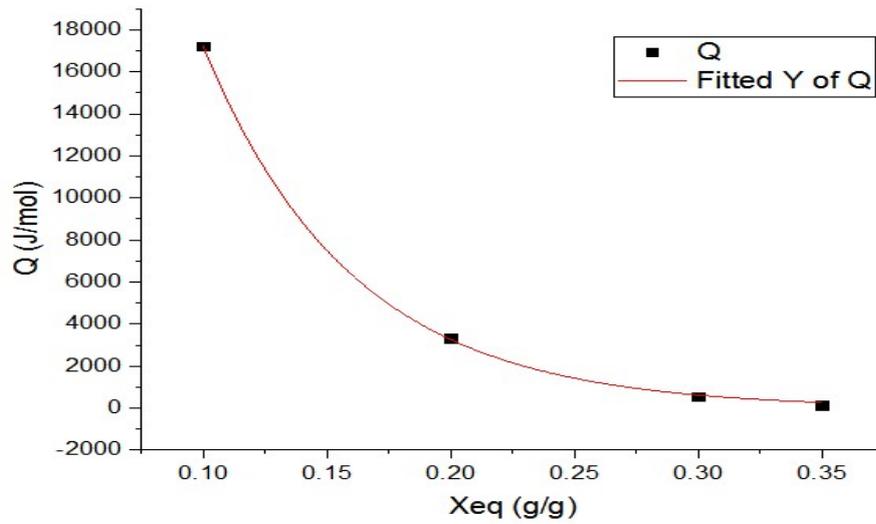


Figure N°.III.20. Chaleurisostériques nette de désorption de dattes Tegazza en fonction de la teneur en eau d'équilibre

Tableau III.10: Estimation des Paramètre de l'équation empirique (II-11) pour dattes Tegazza

Q_0 (kJ/mol)	X_0 (g H ₂ O/g M _S)	r^2
90.78397681	0.060	0.99977

III.5.2 Détermination de la chaleur isostérique de sorption pour le cœur de palmier :

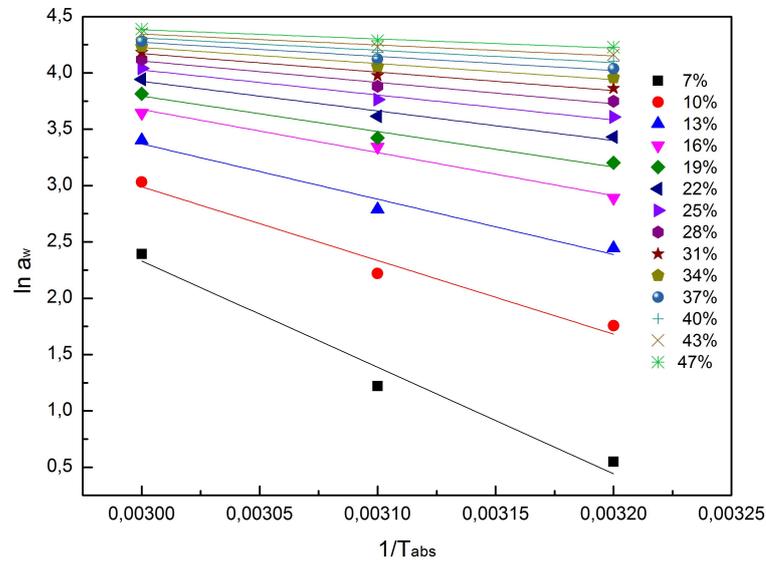


Figure N°III.21. Courbes d'isostères de désorption pour le palmier entendre

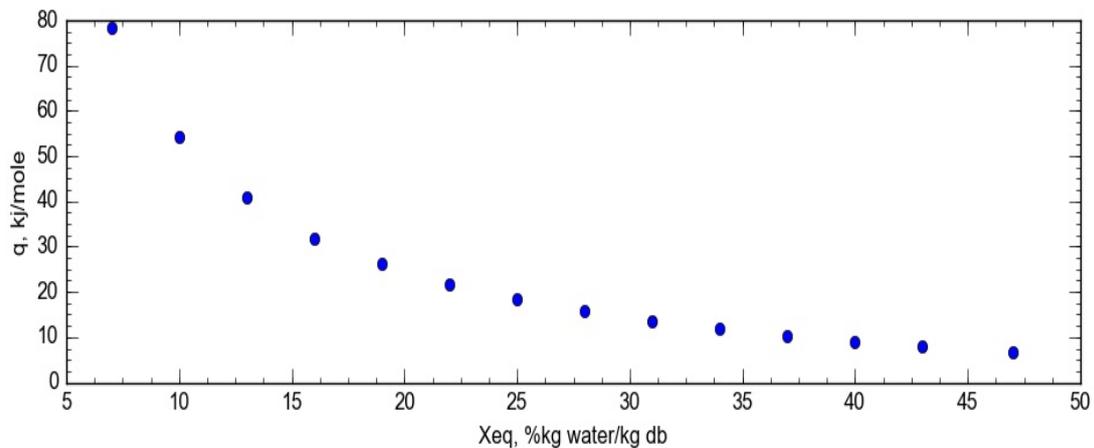


Figure N°III.19 Chaleur de désorption isostérique en fonction de la teneur en eau d'équilibre du cœur de palmier.

En utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron 6, les isothermes isostériques de la sorption du cœur de palmier sont tracées en fonction de $\ln(a_w)$ par rapport à $(1 / T_k)$ pour des valeurs de teneur d'équilibre fixes. La chaleur de sorption isostérique nette peut être calculée à chaque valeur de la teneur en humidité d'équilibre à partir de la

penne des courbes isostériques qui est égale à $(- (q_{st} / R))$. Les courbes isostériques déterminées pour le cœur de palmier à l'aide de l'équation de Clausius-Clapeyron sont présentées sur la figure III.25. Nous avons la même remarque que [27] concernant l'augmentation de la teneur en humidité du cœur de palmier provoque une diminution vers zéro des valeurs absolues des pentes. Les chaleurs de sorption nette isostérique obtenues pour différentes teneurs en eau à l'équilibre ont été déterminées en utilisant le modèle GAB en combinaison avec l'équation 2. Les variations de la désorption des cœurs de palmier avec la teneur en eau sont illustrées dans les figures III.25 et 26. Elles montrent que la chaleur isostérique est plus importante à faible teneur en eau, illustrant la forte liaison de l'eau au substrat, et elle devient négligeable en présence de chaleur latente à forte humidité. La fonction suivante utilisée pour décrire la relation entre la chaleur de sorption isostérique et la teneur en eau à l'équilibre:

$$q_{st} = \frac{1.178 - 1.222X_{eq}}{1 + -1.841X_{eq} + 6.172X_{eq}^2} \quad (III.7)$$

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, Notre travail consiste en l'étude théorique et expérimentale des isothermes de sorption des dattes et du cœur de palmier à différentes températures.

Sur le plan expérimental, nous avons établi des analyses physico-chimiques pour déterminer les caractéristiques de chaque produit étudié, ainsi les isothermes de sorption des produits agro-alimentaires par la méthode gravimétrique statique des solutions salines saturées pour trois températures (40°C, 50°C, 60°C).

Après avoir eu les points expérimentaux des isothermes de sorption des trois variétés des dattes (Hmira, Tegazza et takarboucht) et le cœur du palmier, on a déterminé par la suite parmi les modèles les plus connus, le ou les modèles décrivant parfaitement ce phénomène et proposé un modèle semi-empirique convenable, ainsi calculé la chaleur isostérique.

Les résultats d'analyses physico-chimiques des variétés de datte de takarboucht montrent qu'elle est composée de 22% d'eau, 0.65% lipide et le plus dominant le sucre 74%.

Par ailleurs Les résultats expérimentaux montrent que les isothermes de désorption des dattes ont une allure sigmoïdale qui caractérise les produits agroalimentaires.

Ces courbes de sorption sont ajustées par quatre modèles mathématiques. L'analyse des paramètres statistiques, EMR, EST et leurs résidus ei montre que le model de GAB T= 40°C R (0.963 à 0.907), EMR(0.11 à 48.05) .EST(0.290 à 0.612) , T=50°C R(0.937 à 0.903) , EST(1.88 à 5.65) , EMR(27.27 à 106.9),T=60°C R(0.852 à 0.888), est le meilleur modèle qui décrit l'ensemble des isothermes de désorption des dattes Tegazza.

Dans cette partie, nous nous proposons d'introduire le séchage par rayonnement solaire, de donner et de présenter les différents séchoirs existants et utilisés pour le séchage des produits alimentaires. Puis donner cas d'application de séchage solaire de deux produits alimentaires : fruit et plante médicinale

IV.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 évaporé 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 solaire important 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]

IV.2. Généralités sur le séchage solaire

IV.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 d'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]

IV.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]

IV.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 :

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

IV.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]

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

➤ **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 :

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

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

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

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

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

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

IV.2.2.3. Températures caractéristiques de l'air humide

IV.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]

IV.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]

IV.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

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

IV.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 thermophysiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraits et donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croustage, 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 N°.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 $1 - \varepsilon$

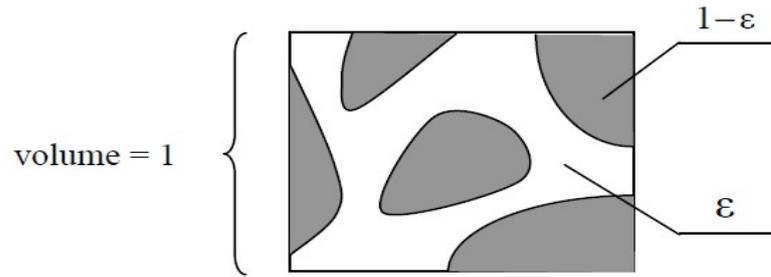


Figure N°IV.1 Volume de contrôle microscopique [1]

IV.2.4. Caractéristiques des solides humides

IV.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]

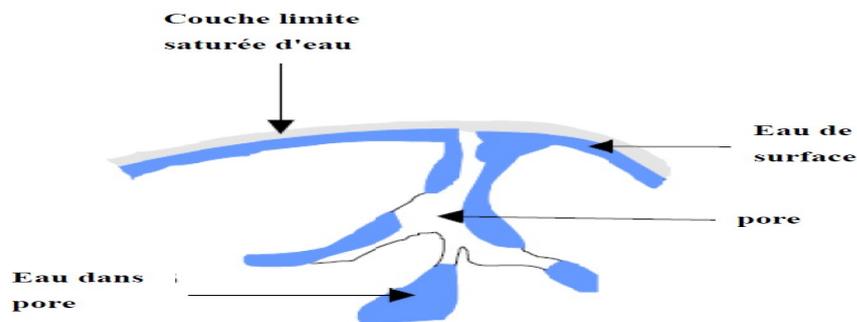


Figure N°IV.2 : Description du solide humide

IV.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]

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

IV.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]

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

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

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

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

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

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états (figure N°.IV.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.

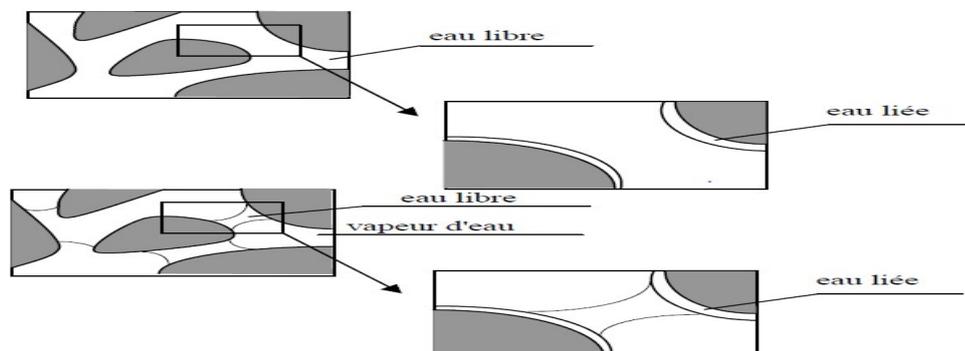


Figure N°.IV.3 Les différents types d'eau dans le matériau.

IV.3. Mesure de l'humidité

IV.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 N°.IV.4 Hygromètre à cheveux.[22]

IV.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 N°. IV.5 Thermo-hygrographe.[22]

IV.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:

IV.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:**

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

IV.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 régie par la loi de Newton ; Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivante [6] :

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

IV.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]**

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

IV.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 :

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

IV.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]

IV.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 n 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].

IV.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] :

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

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

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

IV.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]

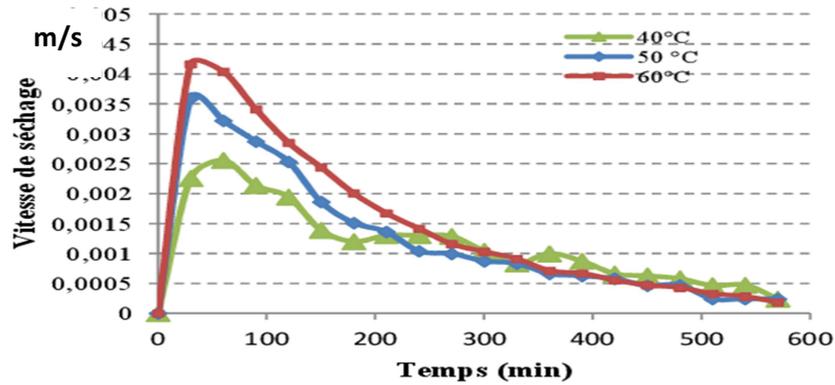


Figure N°.IV.6: L'allure de la vitesse de séchage en fonction du temps [4]

IV.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]

IV.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 N°.IV.7 Séchoirs solaires directs simples [4]

IV.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 ou forcée jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques et le mode de séchage [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 N°IV.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 N°IV.9: Chambre du séchoir solaire indirect[22]

IV.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 N°IV.10: Séchoir solaire mixte.[4]

IV.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 N°IV.11: 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.

IV.10.4. Cinétique de séchage solaire de produits alimentaires : tomates et absinthe

La tomate fait partie des fruits riche en eau, environ 90%, l'absinthe fait partie des plantes médicinales riche en matière sèche, environ 78%, les deux produits sont ramenés au laboratoire et préparés en vue d'un suivi de la cinétique de séchage solaire.

La variation de la teneur en eau nous informe sur l'évolution du séchage et la migration d'eau du produit. Elle est inversement proportionnelle au fil du temps de séchage.

Les figures suivantes illustrent, les deux séchoirs utilisés, les étapes de préparation de produits et l'évolution de la cinétique de séchage,



Figure N°.IV.12. Séchoirs mixte et hybride (PVT)



Figure N°.IV.13. Préparation des produits à sécher

Chaque claie de tomate contient une masse d'1 kg de tranches semblables et minces d'environ 1cm d'épaisseur. Ces claies sont réparties entre les deux séchoirs de bas en haut.

Les séchoirs sont reliés à deux acquisitions pour enregistrer l'humidité relative, les températures des différents composants du système et le rayonnement solaire.



Figure N°IV.14. Système d'acquisition de données

Les figures suivantes illustrent l'évolution de la température des différents éléments constituant les deux séchoirs :

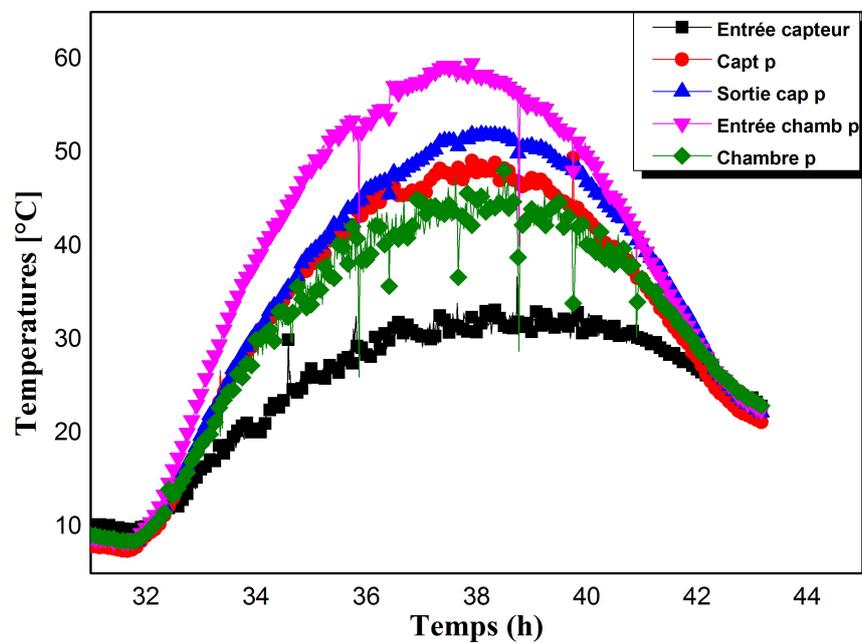


Figure N°IV.15. Températures des composants du séchoir hybride

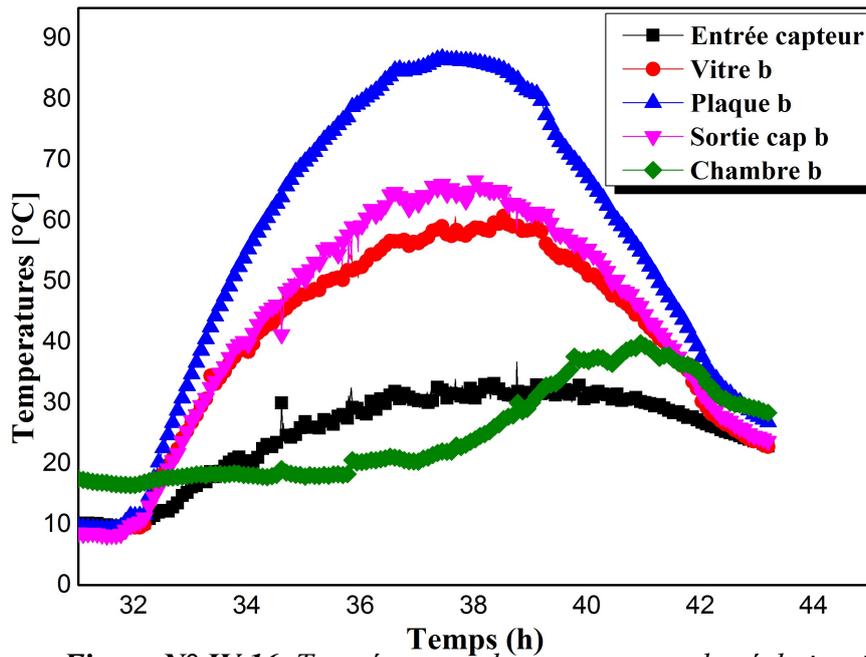


Figure N°IV.16. Températures des composants du séchoir mixte

On remarque que les températures suivent l'évolution du rayonnement solaire, minimal au coucher et au lever du soleil, maximal à midi solaire dans Les deux séchoirs, avec une différence d'environ 10 à 15°C davantage pour le séchoir mixte.

Les figures IV.17 et 18 représentent l'évolution de la température et de l'humidité relative à l'entrée et à la sortie de l'enceinte de séchage.

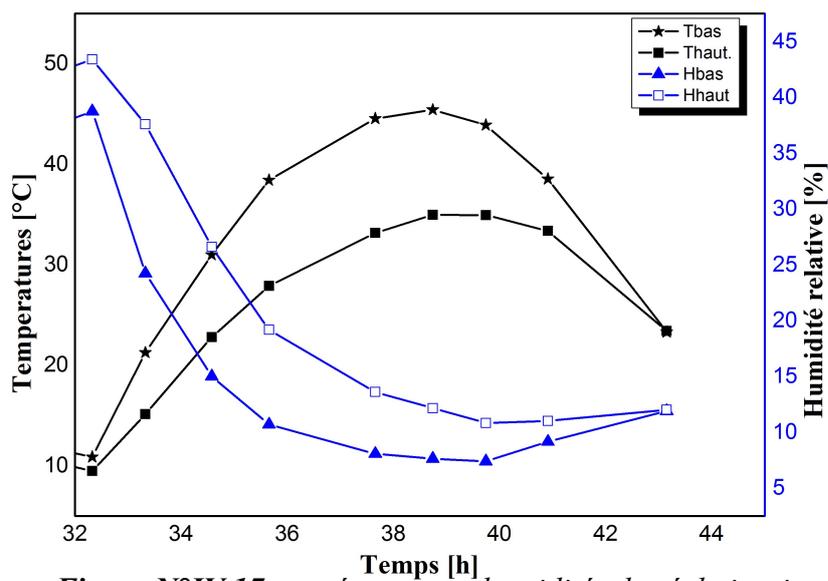


Figure N°IV.17 températures et humidités du séchoir mixte

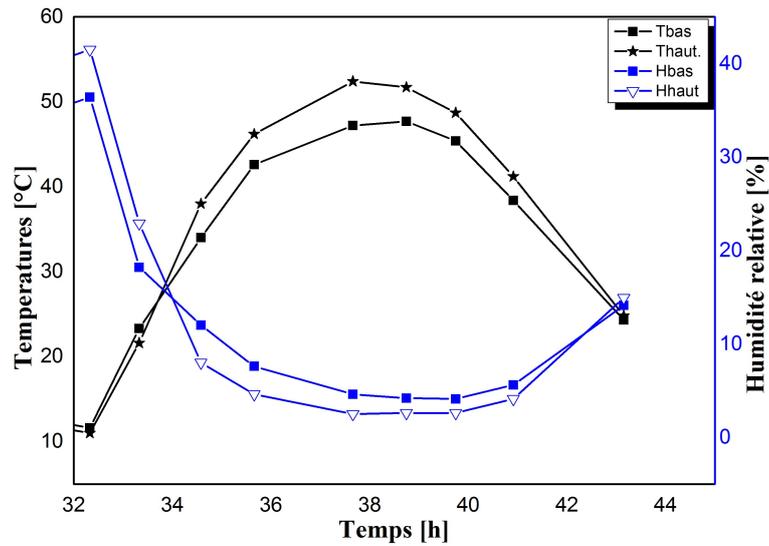


Figure N° IV.18 Températures et humidités du séchoir hybride

On constate que l’humidité et la température présentent une relation inversement proportionnelle, dont l’air asséchant rentre à l’enceinte de séchage avec une température relativement élevée et une humidité relative faible, en traversant le produit à sécher, perd de la chaleur et gagne une humidité en plus.

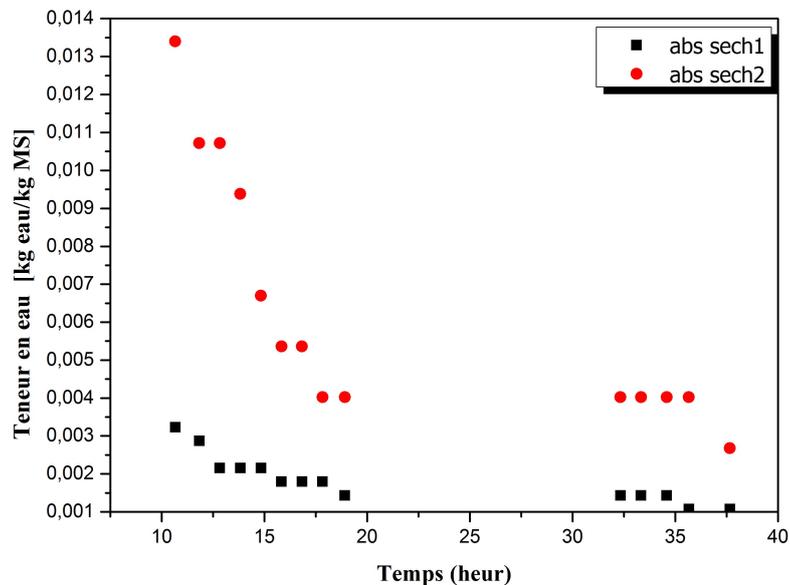


Figure N° IV.19. Cinétique de séchage de l’absinthe dans les deux séchoirs solaires

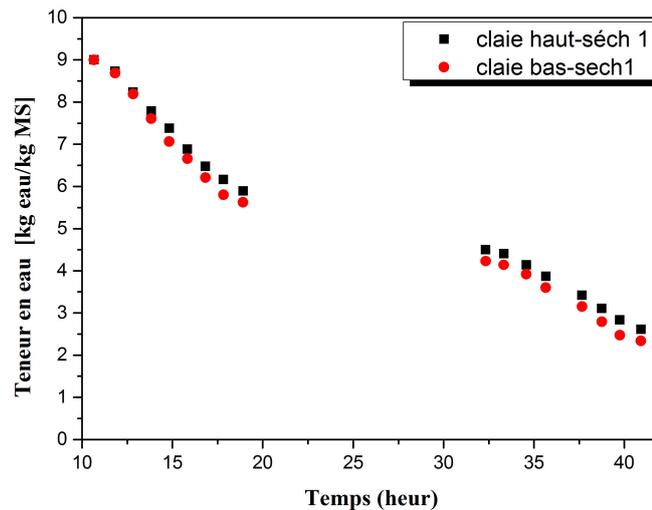


Figure N° IV.20. Cinétique de séchage de tomate dans le séchoir mixte

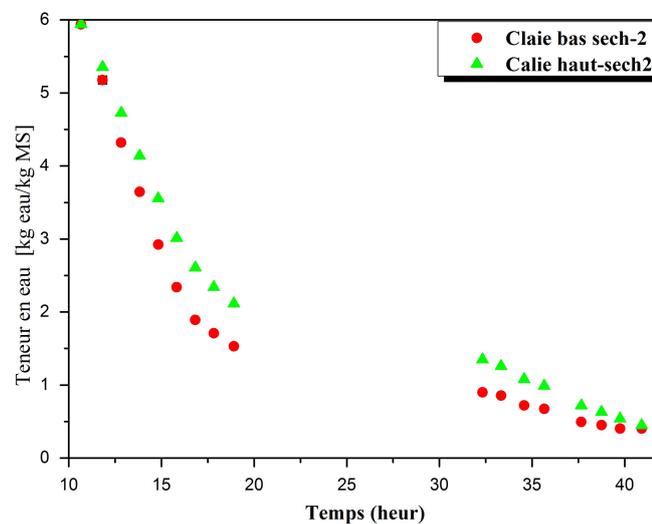


Figure N° IV.21. Cinétique de séchage de tomate dans le séchoir hybride

La cinétique de séchage des produits préalablement cités, a une allure exponentielle, diminuant avec le progrès du temps, et en s'arrêtant le processus de séchage en gardant 15% de la teneur en eau initiale du produit, qui peut être caractérisé par la stabilisation de la masse de produit à environ 120g pour la tomate et 40g pour l'absinthe.

IV.11. Conclusion

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

De point de vue énergétique le système hybride présente davantage comparé au séchoir mixte, en temps de séchage et qualité de produit, en ce qui concerne l'isolation du système et l'isolation thermique, le séchoir mixte présente une meilleure configuration.

Une durée minimale de séchage des plantes médicinales a été enregistrée lors de séchage de l'absinthe : environ six heures, pour la tomate une durée plus importante atteint les 30 heures, pour arriver à l'état final.

Conclusion Générale

Conclusion générale:

L'objectif visé dans cette thèse 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. Puis l'expérimentation du dispositif par le séchage des produits alimentaires locaux.

Les expériences ont porté sur la simulation numérique et expérimental du capteur solaire mené d'ailettes, 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 $T_f=56^\circ\text{C}$) sous forme de chaleur latente. La simulation du capteur solaire sans et avec un MCP dans le sens de montrer l'effet de 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 lors de l'utilisation des ailettes confirment une amélioration de 15% en valeur moyenne. L'utilisation de MCP engendre une amélioration de 5% par rapport à ce à chicane, et de 20% par rapport au simple.

En cas d'intégration du MCP sous forme de lit (07kg), la durée de fonctionnement du capteur solaire à air : est prolongée 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 a 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 il joue le rôle d'un régulateur.

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.

Les courbes d'isothermes de sorption des variétés de dattes locales: takarboucht et l'hmira et du cœur de palmier en utilisant la méthode gravimétrique des solutions salines saturées, ont été déterminées expérimentalement. Le lissage de ces résultats par les modèles utilisés dans ce domaine comme le modèle de GAB, montre une parfaite cohérence de R^2 d'environ 0.99 et permet la détermination de la chaleur isostérique des différents produits.

Enfin, le séchage de la tomate et l'absinthe dans deux configuration de séchoir: mixte et à capteur PVT indirect permet de suivre la cinétique de ces produits et d'évaluer le temps de séchage estimé à 6 heures pour l'absinthe et 30 heures le cas de la tomate, avec certaines différences en temps et qualité de produit entre les deux systèmes, davantage pour le système à PVT.

Nous avons pu retenir quelques suggestions et perspectives :

- La réalisation expérimentale du système étudié dans le cas: de présence du MCP, mais avec une masse plus importante sous forme de lit,
- L'utilisation d'un matériau MCP avec des propriétés bien définis (le cas présent: les paraffines commerciales)
- L'intégration du capteur solaire à air étudié dans un système de séchage pour le tester et l'évaluer : l'effet sur les produits séchés.
- Le test du système à différentes périodes de l'année.

D'autre part, les courbes caractéristiques du séchage "CCS" surtout des produits alimentaires locaux, nécessitent l'acquisition d'un matériel scientifique apte et qualifié: enceinte climatique à humidité contrôlée et vitesse d'air contrôlée.

La prédiction du temps de stockage qu'on n'a pas traitée dans cette étude, fait la continuité et la suite des travaux de simulation de calcul des propriétés thermodynamiques des produits alimentaires.

Ainsi que la détermination des courbes d'adsorption pour les produits étudiés fait la seconde tâche dans l'étude des isothermes de désorption et adsorption en utilisant la même méthode et le même protocole.

Enfin, il sera très utile d'exploiter la deuxième face du capteur solaire en introduisant des réflecteurs de différentes formes pour assurer l'alimentation en rayonnement solaire.

Bibliographie

Bibliographies

- [1] J. A. Duffie et W. A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition", Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. 2013.
- [2] M. Iqbal. An Introduction to Solar Radiation, Tome 1 1983, by Academic Press Canada.
- [3] P. Brichambeaut. Le gisement solaire de l'ALGÉRIE, Tec et Doc 1982 .
- [4] Armel OUMBE, " Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire au sol ", PhD thesis, MINES ParisTech, 2009.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] A. Boulemtafes , D. Semmar, « Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect », Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger ,1999, p. 2.
- [8] A. Degla. R. Sioud, « séchage solaire des dattes deglet-nour : simulation numérique », mémoire master académique, domaines sciences thermiques, 6/6/2015, p.3-16.
- [9] 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.
- [10] 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 .
- [11] Djabouabdellah Abdelmadjid, « Etude et mesure des données solaires d'un Gisement solaire dans une zone isolé », Université d'Adrar Ahmed draia, 2014/2015.
- [12] 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.

- [13] Ben hamza Abderrahmane, « Simulation Numérique d'un capteur solaire plan utilisant des Matériaux à changement de phase », Université KASDIMerbah d' Ouargla, Belkhir ,Soutenu Publiquement , 31/05/2016,p. 5-21.
- [14] Younsi sidi ali, « Etude bidimensionnelle d'un capteur solaire à tube sous vide avec un échangeur en épingle » , Mémoire de magister, Université HassibaBenbouali Chleff, 2011, p. 14-18.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] D. V. Johnson, "Palm conservation: its antecedents, status and needs," World Palm Symp. Fairchild Trop. Bot. Gard., 1995.
- [18] M. L. A. B. P.C. Tabora, M.Balick, "Hearts of Palm (Bactris, Euterpe and others).pdf." 1993.
- [19] S. S. Salvi, J. and Katewa, "Preliminary assessment of nutritional value of palm heart of Phoenix sylvestris (Roxb .)," Int. Food Res. J., vol. 21, no. 5, pp. 2051–2054, 2014.
- [20] F. C. M. Galleti, "Palm heart harvesting in the Brazilian Atlantic forest] changes in industry structure and the illegal trade," J. Appl. Ecol., vol. 35, pp. 294–301, 1998.
- [21] O. L. S. Ylvester et al., "Illegal Palm Heart (Geonoma edulis) Harvest in Costa Rican National Parks : Patterns of Consumption and Extraction 1," vol. 63, no. Brown 2002, pp. 179–189, 2009.
- [22] M. M. Shimizu et al., "Enzyme characterisation, isolation and cDNA cloning of polyphenol oxidase in the hearts of palm of three commercially important species," Plant Physiol. Biochem., vol. 49, no. 9, pp. 970–977, Sep. 2011.
- [23] and S. D. C.L.Wilson, M.E. Wismiewski, C.L. Biles, R. MacLaughlin, E. Chalutz, "Biological control of post-harvest diseases of fruits and vegetables," Altern. to Synth. Fungic. Crop prot, vol. 10, pp. 172–177, 1991.
- [24] S. Bennaceur et al., "Determination Of The Moisture-Sorption Isotherms And Isotheric Heat Of Henna Leaves," vol. 88, no. 1, pp. 53–62, 2015.

- [25] A. A. Larbi, A. Loumani, A. Mediani, S. Bennaceur, and C. Tigani, “Instrumentation Mesure Métrologie Determination of moisture sorption-isotherms and isosteric heat of hearts of palm (jomare) harvested in the Algerian Sahara.”
- [26] A. H. Al-Muhtaseb, W. A. M. McMinn, and T. R. A. Magee, “Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 80, no. 2, pp. 118–128, 2002.
- [27] G. Limousin, J.-P. Gaudet, L. Charlet, S. Szenknect, V. Barthes, and M. Krimissa, “Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement,” *Appl. geochemistry*, vol. 22, no. 2, pp. 249–275, 2007.
- [28] N. Wang and J. G. Brennan, “Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures,” *J. Food Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 269–287, 1991.
- [29] F. Kaymak-Ertekin and A. Gedik, “Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes,” *LWT-Food Sci. Technol.*, vol. 37, no. 4, pp. 429–438, 2004.
- [30] F. Kaymak-Ertekin and M. Sultano\u011flu, “Moisture sorption isotherm characteristics of peppers,” *J. Food Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 225–231, 2001.
- [31] A. Mediani, H. Mounzar, A. A. Larbi, A. Loumani, W. B. Chaouch, and A. Djaber, “Instrumentation Mesure Métrologie The Isothermal Sorption Measurement and the Isosteric Heats Determinations for the South Algerian Date Varieties,” vol. 18, no. 4, pp. 389–396, 2019.
- [32] C. T. Akanbi, R. S. Adeyemi, and A. Ojo, “Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices,” *J. Food Eng.*, vol. 73, no. 2, pp. 157–163, 2006.
- [33] A. M. Goula, T. D. Karapantsios, D. S. Achilias, and K. G. Adamopoulos, “Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp,” *J. Food Eng.*, vol. 85, no. 1, pp. 73–83, 2008.
- [34] E. J. Quirijns, A. J. B. Van Boxtel, W. K. P. van Loon, and G. Van Straten, “Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption,” *J. Sci. Food Agric.*, vol. 85, no. 11, pp. 1805–1814, 2005.
- [35]Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Tsami, E. and Marinos-Kouris, D., Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables, *J. Food Eng*, Vol.20.pp.55-74, 1993.
- [36] H. A. Iglesias and J. Chirife, “Handbook of Food Isotherms: Water Parameters for Food and Food Components,” *Acad. Press Inc.*, New York, pp. 262–283, 1982.

- [37] S. M. Henderson, "A basic concept of equilibrium moisture content," *Agric. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 29–31, 1952.
- [38] C. Van den Berg, "Description of water activity of food engineering purposes by means of the GAB model of sorption," *Eng. Foods*, New York Elsevier, p. 119.
- [39] C. R. Oswin, "The kinetics of package life," *Isotherm, J. Soc. Chem. Ind.*, vol. 65, pp. 419–421.
- [40] Peleg, "Assessment of semi-empirical four parameter general model for sigmoid sorption isotherms," *J. Food Process. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 21–37, 1993.
- [41] & al T. L. Thompson, "Mathematical simulation of corn drying a new model," *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, vol. 11, pp. 582–586.
- [42] and C. R. S. Simal, A. Fermentia, A. Cstell-Palou, "Water desorption thermodynamic properties of pineapple," *J. Food Eng.*, vol. 80, pp. 1293–1301, 2007.
- [43] A. Jamali, M. Kouhila, L. A. Mohamed, A. Idlimam, and A. Lamharrar, "Moisture adsorption – desorption isotherms of *Citrus reticulata* leaves at three temperatures," vol. 77, pp. 71–78, 2006.
- [44] H. Machhour, A. Idlimam, M. Mahrouz, I. El Hadrami, and M. Kouhila, "Sorption isotherms and thermodynamic properties of peppermint tea (*Mentha piperita*) after thermal and biochemical treatment," vol. 3, no. 2, pp. 232–247, 2012.
- [45] A. Idlimam, A. Lamharrar, A. Koukouch, M. Kouhila, and M. Asbik, "Study of Solar Drying Process and Moisture Desorption Isotherm of Moroccan *zygophyllum gaetulum* by Forced Convection," no. 5, pp. 139–146, 2014.
- [46] A. Hematian and S. Mahsa, "Kinetic studies on palm heart protein solubility and investigation of physicochemical , functional and thermal properties of palm heart protein isolate," 2019.
- [47] R. Pini, S. Ottiger, A. Rajendran, G. Storti, and M. Mazzotti, "Reliable measurement of near-critical adsorption by gravimetric method," pp. 393–403, 2006.
- [48] V. Placet, J. Passard, P. Perre, V. Placet, J. Passard, and P. P. Wavet, "WAVET *, a custom device able to measure viscoelastic properties of wood under water saturated conditions (* WAVET : Environmental Vibration Analyser for Wood) To cite this version : HAL Id : hal-00395522," 2009.

- [49] A. I. N. Press, “The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity,” vol. 42, pp. 112–135, 2006.
- [50] M. F. a & S. L. c M. Kouhila a , N. Kechaou b , M. Otmani b, “Experimental Study Of Sorption Isotherms And Drying Kinetics Of Moroccan Eucalyptus,” *Dry. Technol. An Int. J.*, no. September 2013, pp. 37–41.
- [51] K. Helrich, “AOAC: Official Methods of Analysis (Volume 1),” vol. 1, no. Volume 1, 1990.
- [52] N. A. A. Idlimam, A. Lamharrar, “Thermodynamic properties and moisture sorption isotherms of agrania spinosa and zygophyllum geatulum,” *J. Agron.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–14, 2008.
- [53] S. Lahsasni, M. Kouhila, and M. Mahrouz, “Adsorption – desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*),” vol. 45, pp. 249–261, 2004.
- [54] M. Kouhila, A. Belghit, M. Daguene, and B. C. Boutaleb, “Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia o cinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*),” vol. 47, pp. 281–287, 2001.
- [55] T. P. Labuza, A. Kaanane, & J. Y. Chen, “Effect of temperature on the moisture sorption isotherm and water activity shift of two dehydrates food,” *J. Food Sci.*, vol. 50, pp. 385–391, 1985.
- [56] L. A. Mohamed, M. Kouhila, S. Lahsasni, A. Jamali, and A. Idlimam, “Equilibrium moisture content and heat of sorption of *Gelidium sesquipedale*,” *Stored Prod. Res.*, vol. 41, pp. 199–209, 2005.
- [57] J. G. Kapsalis, “Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherm,” *Water Act. Appl. to Food*, [Eds. L. B. Rockl. L. R. Beuchat, 1987.
- [58] and T. P. L. G. V. Barbosa-Canovas, A. J. Fontana, S. J. Schmidt, “Water Activity in Foods,” Blackwell Publ. Prof. Iowa, USA, 2007.
- [59] C. R. Oswin, “The kinetics of package life. III. The isotherm,” *J. Soc. Chem. Ind.*, vol. 65, no. 12, pp. 419–421, 1946.
- [60] & J. C. H. A. Iglesias, “Water sorption parameters for food and food components,” *Handb. food isotherms*, Acad. Press. New York.archive/macros/latex/contrib/supported/IEEEtran/, 1982.
- [61] I. Langmuir, “*Journal of American Chemical Society*,” vol. 46, pp. 1361–1362, 1916.

- [62] C. Van den Berg, "Description of water activity of food engineering purposes by means of the GAB model of sorption," Eng. Foods, New York , Elsevier, p. 119, 1984.
- [63] 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.
- [64] « Aide-mémoire du thermicien », Edition 1997,
- [65] J. Noël, S. Lepers, J. Virgone. « Amélioration du confort d'été sur des bâtiments à ossature légère par des matériaux à changement de phase », <http://www.jnlog.com/pdf/ibpsa2007.pdf>,
- [66] M. Daguinet, "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France (1985).
- [67] D. R. P. Angavhance, R. L. Ssawhucy, P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer ", Energy 27 (579-590) – (2002).
- [68] M. Kouhila, A. Belghit, M. Kaoua et M. Daguinet, "Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire", Rev. energ. ren : Physique énergétique (1998).
- [69] M. Kouhila, A. Belghit, et M. Daguinet, "Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte", Entropie, 233 (20- 31) - (2001).
- [70] Mohamed El Baily (11 mai 2008) , L'énergie solaire et les utilisations les plus importantes.
- [71] B. Dadda, S. Kherrou et L. Serir , Réalisation d'un séchoir solaire indirect , Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable, 'URAER , B.P. 88, Garet Etaam, Ghardaïa, Algérie
- [72] A. KHENBLOUCHE, Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire. Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah . Ouargla.(2014)..
- [73] S. CHOUICHA, Etude Expérimentale du Séchage Solaire des Dattes Humides et Impact sur la Qualité .Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah. Ouargla .(2010)..

- [74] E.BENALIA, Exploitation de la source thermique de l'eau Albien dans le séchage solaire des produits agro-alimentaires .Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah. Ouargla.(2014).
- [75] W.BELACHI. Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires .Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah .Ouargla(2009).
- [76] Y. Jannot. Isothermes de sorption : modèles et détermination. LEPT-ENSAM. (2003).
- [77] H. A. IGLESIAS et J. CHIRIFE. Handbook of food isotherms water sorption. Parameters for food and food components. Academic Press, New-York, (1982).
- [78] - J. NGANHOU, Les transferts couplés de chaleur et de matière dans une opération de séchage en lit épais. Thèse de l'Université de Poitiers, (1987).
- [79] Clément AHOUANNOU, Yves JANNOT , Émile SANYA et Gérard DEGAN (2010), Détermination expérimentale et modélisation des isothermes de désorption de produits agricoles tropicaux , ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>
- [80] C. AHOUANNOU, Y. JANNOT, B. LIPS et A. LALLEMAND. Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo. Sc. des aliments, 20, (2000) 413-432.
- [81] SAID Bachir, Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées , Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah.Ouargla(2015).
- [82] Tsami, E., Maroulis, Z. B., Morunos-Kouris,D. and Saravacos, G. D., Heat of sorption of water in dried fruits, Int J Food Sci Technol, Vol.25.pp.350–359, 1990
- [83] Jangam, S.V. and Mujumdar, A.S., Basic concepts and definitions, in Drying of Foods. Published in Singapore, 1, 1-30 (2010).
- [84] Heiss, R.; Echner, E. Moisture content and shelf life II. Food Manufacture (1971).
- [85] S. Akkad et Al. Evaluation des isothermes de désorption et de la chaleur isostérique de deux plantes aromatiques et médicinales par la méthode gravimétrique statique en vue de leur séchage. Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008) 1 – 6.
- [86] Tsami E., Net Isosteric Heat of Sorption in Dried Fruits, Journal of Food Engineering, Vol.14.pp. 327-335. 1991.

- [86] Dilip, J. & Tiwari, G. N. Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II . Thermal modeling and experimental validation. *Energy and Buildings* 45, 2777–2793 (2004).
- [87] Murthy, M. V. R. A review of new technologies , models and experimental investigations of solar driers. *Renewable Energy* 13, 835–844 (2009).
- [88] Karim, A. Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications. *Applied Thermal Engineering* 26, 121–130 (2006).
- [89] Hounsa, A., Kouadio, L. & DeMol, P. Automédication par les antibiotiques provenant des pharmacies privées de la ville d’Abidjan en Côte d’Ivoire. *MEDMAL* (2009). doi:10.1016/j.medmal.2009.10.002
- [90] Toure, S. & Kibangu-Nkembo, S. Comparative study of natural solar drying of cassava , banana and mango. *Renewable Energy* 29, 975–990 (2004).
- [91] Heat transfer—a review of 1994 literature.pdf.
- [92] Tripathy, P. P. & Kumar, S. Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. *Applied Thermal Engineering* 29, 884–891 (2009).
- [93] Lamnatou, C., Papanicolaou, E., Belessiotis, V. & Kyriakis, N. Finite-volume modelling of heat and mass transfer during convective drying of porous bodies – Non-conjugate and conjugate formulations involving the aerodynamic effects. *Renewable Energy* 35, 1391–1402 (2010).

Annexes

The Isothermal Sorption Measurement and the Isothermic Heats Determinations for the South Algerian Date Varieties

Ahmed Mediani^{1,2*}, Houcine Mounzar¹, Ahmed Amine Larbi¹, Akil Loumani¹, Wafa Braham Chaouch¹, Abdelkrim Djaber¹, Cherif Tigani¹, Ali Benatiallah²

¹ Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, Adrar 01000, Algeria

² Laboratoire d'Energie, Environnement et Système d'Information (LEESI), Faculté des Sciences et Technologies, Université d'Adrar, Algeria

Corresponding Author Email: medianiusto@yahoo.fr

<https://doi.org/10.18280/i2m.180408>

Received: 18 April 2019

Accepted: 10 July 2019

Keywords:

sorption isotherm, solar drying, gravimetric method, isothermic heats, date varieties, GAB and SMITH models

ABSTRACT

The equilibrium water content of a product to be dried is essential during a forced convection solar drying and storage operation. These values are often taken from the so-called isothermal sorption curves. The isotherms determination is an essential step to know the distribution and the intensity of the water connections in the products.

They make it possible to determine the products final water content to be reached in order to optimize the drying conditions and give valuable information on the hygroscopic equilibrium. As a result, this experimental study aims to determine the physicochemical components' and the desorption isotherms curves for deferent date type L'hmira, Bamakhlouf and Tegazza from the Touat region, in South-West Algeria, using the saturated salt solution method. The experiment is carried out for three temperature values 40 °C, 50 °C and 60 °C, to study the influence of the temperature on the equilibrium curves of the product and finally to describe the isothermal moisture desorption for deferent date types for three temperatures using known models of GAB, SMITH, LANGMUIR and OSWIN.

1. INTRODUCTION

Many agricultural products, consumed in large quantities are not always available during the seasons. Several solutions are proposed to overcome this handicap for example: greenhouse cultivation, freezing and the preservation by drying. The solar drying use is a simple, safe and adequate solution for a large number of agricultural products. The Southern Algerian regions are beginning to experience more or less rapid development. A large part of the agricultural production of these regions: tomato, dates, henna, mint. etc., lends itself perfectly to conservation by drying to ensure continuity in their availability and allow their transport as well as to reducing the produces cost. The dates are the historical food of great and high energy and commercial values. According to FAO statistical data in 2012, Algeria is the world's sixth largest date producer, with an estimated average annual production of 789357 tones, for more than 12 million date palms, particularly in TOUAT areas.

Certain dates varieties have excess production, such as: Aghammou or L'L'hmira, which is destined for export to the African countries: Mali, Niger, and Chad. As well as, some local applications such as livestock or for industrialization (manufacture of soup, vinegar). Date varieties are generally drayed after harvest using traditional solar dryer. Agriculture use solar energy; free, non-polluting and excellently clean. Those methods are subjects of several researches.

Sorption isotherms are of great importance in the food

industry, especially in solar drying, storage and food preservation. Their knowledge tells us about the hygroscopic or hydric balance of the product under consideration, the isothermic heats, and the lifetime's duration. We do not know the product stability types. This equilibrium is characterized by these curves whose experimental determination requires a large number of measurements. They are also useful during a solar drying process. Indeed, it is from these sorption curves that we can determine the final product water content, so as to ensure the physicochemical and microbiological stability during the storage, in addition the product shelf life can be predicted [1-6].

studies on sorption isotherms are carried out by mathematical modeling, eight mathematical models (in the literature) empirical and semi-empirical based on more or less physical bases [7-10], describing the correlation of water content with balance with the water activity of the products. among these models: GAB [11], modified BET [12], Henderson-Thompson [13], modified Halsey [14], modified Oswin [15], Peleg [16]. GAB is the most widely used model for various foods [17-20].

The present Works focus firstly the experimental determination of the sorption curves for L'hmira, Bamakhlouf and Tegazza varieties, secondly we are interested in defining among the existing mathematical models, the most appropriate model for the studied product and finally, we are interested in modelling the isothermic heats for deferent dates.

2. OPERATING MODE

The obtaining isotherm point's principle is as follows: a sample of the product is placed in an enclosure maintained at temperature T and at relative humidity H_r of the constant air: this is the gravimetric method. The sample is weighed at regular intervals until its mass no longer varies, it is then in equilibrium with the air at (T, H_r) . Knowing its wet mass, it is then sufficient to determine its dry mass to deduce its water content X , the couple (H_r, X) provides a point of the isotherm of sorption or desorption. The product is suspended in a sealed container inside which a solution maintains a constant relative humidity. The solutions used are saline solutions saturated with salt. The temperature is kept constant by placing the containers in a thermostatically controlled enclosure. We use as many salts as we want to obtain points on the isotherm [19-21].



Figure 1. Saturated saline solutions preparation

3. SATURATED SALINE SOLUTIONS PREPARATION

The saturated saline solutions used are: KOH, KF, $MgCl_2$, K_2CO_3 , NaCl, KCl, $BaCl_2$, K_2SO_4 . These solutions make it possible to obtain relative moistures ranging from 5.5 to 95.8 % (Table 1).



Table 1. Standard values of relative humidity given by different salts as a function of temperature [22]

Salts	$T_1 = 40\text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 55\text{ }^\circ\text{C}$
	HR (%)	HR (%)
KOH	5,7	5,5
KF	20,8	20,8
$MgCl_2$	30,5	30,5
K_2CO_3	45,6	45
NaCl	74,4	74,5
KCl	81,2	81,2
$BaCl_2$	88,2	88,2
K_2SO_4	95,8	95,8

But, before beginning the preparation of the eight salt solutions, we consulted the different values of the solubility of the salts used and that to have a prior idea on their masses (Table 2).

Each saturated solution is obtained by dissolving, in a bottle containing 120 ml of distilled water, a mass weighed in a 0.001g precision digital display scale; during the preparation, stirring of the solutions was necessary. The masses of salts added to obtain these saturated salt solutions are given in Table 3.

Table 2. Used salts solubility [16]

Solution	KOH	KF	$MgCl_2$	K_2CO_3	NaCl	KCl	$BaCl_2$	K_2SO_4
Solubility (g /l)	1100	449	542	1120	359	340	360	120

Table 3. Used saturated salts masses

Solutions	KOH	KF	$MgCl_2$	K_2CO_3	NaCl	KCl	$BaCl_2$	K_2SO_4
Masses m_i (g)	132	35.9	43.3	134.4	28.7	27.2	28.8	9.6

4. SAMPLE PREPARATION OF L'HMIRA, BAMAKHLOUF AND TEGAZZA DATES:

We brought samples of Takarboucht / Tegazza dates from the Adrar (Bouda) area, to the URER / MS laboratory, in a fresh and healthy state for the purpose of the study. The fresh samples destined for the Takarboucht / Tegazza date desorption process are small pieces of about the same mass (1 g) weighed using a precision 10^{-3} g digital scale. Each sample is then placed in the jar (on a perforated stainless steel grid prepared in advance), above the acid solution, and thus remains in an environment stabilized in temperature and hygrometry.



Figure 2. L'hmira, Bamakhlouf and Tegazzadates preparation

5. EXPERIMENTAL METHOD

The VACUCELL oven (VU) is a vacuum chamber, electrically heated, in which it is possible to heat the objects placed there after the evacuation. The evacuated objects are placed on the shelves in the room. The device operates up to a temperature of 200 ± 1 °C. The desorption experiments carried out were carried out at two different temperatures: 40 °C., 55 °C. and eight relative humidity values. For each working temperature, an oven was used. So, in each oven, there are eight hermetic jars (Figure 2).



Figure 3. The product arrangement in the oven

Before placing the product to be studied in the jars, they are introduced into the controlled oven at a fixed set temperature. The jars are left in the oven for 24 hours so that the saline solutions can adapt to the working temperature. Then the samples are introduced into the jars and using an electronic balance 0.001g precision digital display. They are weighed every two days until the mass variation between two successive measurements becomes less than 2 %. The thermodynamic equilibrium is reached after a few days.

As soon as the equilibrium wet masses are determined, the samples are introduced into the oven at 105 °C. for 24 hours in order to determine their dry masses.



Figure 4. The products in the oven at 105 °C

After obtaining the wet and dry mass of all test shots. Equilibrium water contents are been calculated using the relationship:

The dry extract of the sample is determined: the water content of the sample is then known for a given hygrometry. A desorption curve is obtained: that is, the sample loses water to reach equilibrium because the sample placed in the chamber was wet.

6. EXPERIMENTAL AND SIMULATION RESULTS

After obtaining the wet and dry masses of all test samples and calculating equilibrium water contents, summarize the equilibrium moisture content values of all date samples are plotted for 40 °C, 50 °C and 60 °C, in Tables 4, 5 and 6.

Table 4. Obtained water equilibrium for three temperatures of L'hmira dates

Xeq(g H ₂ O/gMS)			
Aw	θ=40°C	θ=50°C	θ=60°C
90	0.75492958	0.99679487	0.75787728
87.56	0.48064085	0.63623596	0.61764706
81.66	0.30213904	0.33895921	0.33811802
74.93	0.22765363	0.21938089	0.24613003
66.51	0.16395664	0.16504854	0.16845329
56.83	0.15529753	0.08860759	0.14772727
45.88	0.14306569	0.12046444	0.1011236
35.57	0.15316642	0.1194690	0.09210526
25.89	0.07959479	0.1166180	0.09656301

Table 5. Obtained water equilibrium for three temperatures of Tegazza dates

Xeq(g H ₂ O/gMS)			
aw	θ=40°C	θ=50°C	θ=60°C
99	0.87727273	/	1.003125
83	0.5290611	0.53277545	0.55102041
75.3	0.38026125	0.36592179	0.39665653
68	0.24404762	0.22759602	0.20574887
48.8	0.18333333	0.17804154	0.20623145
33.1	0.1496063	0.15159944	0.14157973
24	0.15981013	0.15142429	0.10576923
15.5	0.18456884	0.13149847	0.38660578
9	0.13855422	0.14637681	0.09177215
6.8	0.18597561	0.15428571	0.14710744

Table 6. Obtained water equilibrium for three temperatures of Bamakhlouf dates

Xeq(g H ₂ O/gMS)			
aw	θ=40°C	θ=50°C	θ=60°C
99	1.13492036	1.12714286	0.88166667
83	0.9	0.62243286	0.7
75.3	0.39365079	0.35060976	0.35225376
68	0.43174603	0.28219971	0.29259897
48.8	0.26349206	0.2944	0.21086262
33.1	0.18888889	0.15494978	0.22182469
24	0.24920635	0.13817664	0.122571
15.5	0.14126984	0.16148148	0.1443299
9	0.18412698	0.14092954	0.15913556
6.8	0.12857143	0.13969571	0.11908932

6.1 Dates isotherm desorption

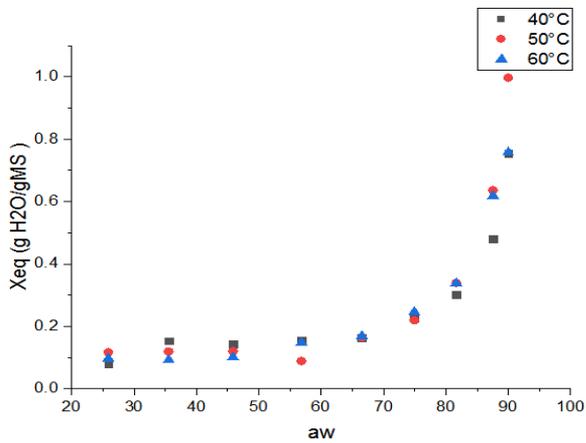


Figure 5. L'hmira date desorption isotherm: Experimental points at three working temperatures

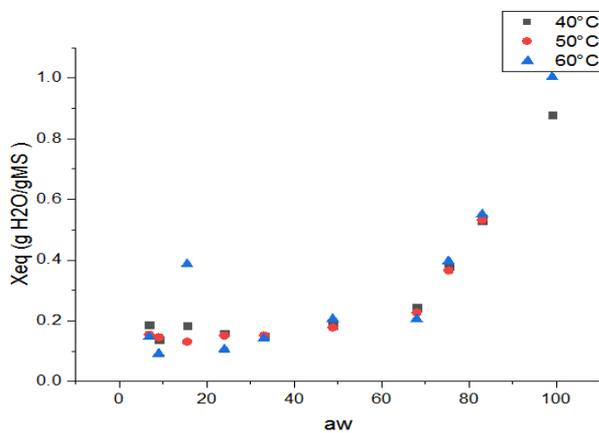


Figure 6. Tegazza date desorption isotherm: experimental points at three working temperatures

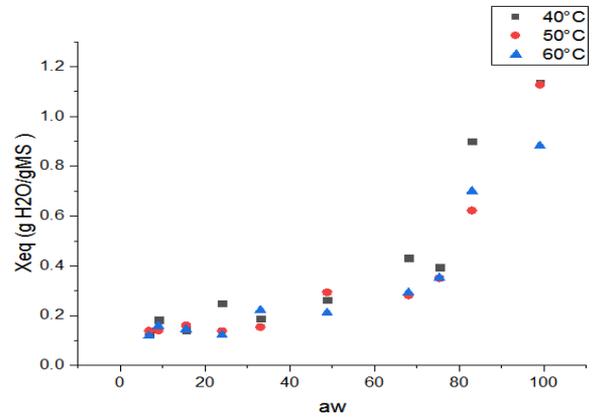


Figure 7. Bamakhlouf date desorption isotherm: experimental points at three working temperatures

The hygroscopic equilibrium for dates desorption is realized. Figures 5, 6 and 7 show that the desorption isotherm has a sigmoidal appearance. This is consistent with the behavior of other agri-food products [23-30].

6.2 Curve modeling

Using Curve Expert software, we test the equations of the above models on water content (X_{eq}) curves as a function of water activity (a_w) for different samples at temperatures of 40, 50 and 60 ° C [31-39].

In the results pane, software gives different models compatible with the curves in the order of standard error values (S) and Coefficient of determination (r^2). The following Tables 7, 8 and 9 summarize the three most compatible dates desorption isotherm models for each type of date at different temperatures.

Note that the most suitable model for date desorption isotherm curves is the GAB model, since it has the lowest values for the standard errors (S) and the largest values for the coefficient of determination (r^2) at experimental temperatures.

Table 7. Model parameters of L'hmira date desorption isotherms at three temperatures

models	parameters	Temperatures		
		40 °C	50 °C	60 °C
GAB	A	-5.1928179E-02	-4.7702490E-02	-5.777748E-02
	B	6.8131185E+01	1.2786111E+02	7.6595657E+01
	C	9.9984864E-01	9.9991728E-01	9.9986577E-01
	S	4.6094014 E-02	3.2860925E-02	2.2042156E-02
	r^2	9.6579273E-01	9.9155055E-01	9.9389568E-01
CAURIE	A	5.3542922E+00	-8.963677E+00	5.8860118E+00
	b	5.4353015E-02	9.8643388E-02	6.1617524E-02
	S	9.3439722E-02	9.5634732E-02	6.3774799E-02
	r^2	8.3600174E-01	9.1650760E-01	9.4038246E-01
PELEG	A	-2.2790668E-05	7.4502921E-02	-1.2596080E-07
	k	2.1485148E+00	3.8039716E+00	3.7199177E+00
	B	5.1676668E-06	-7.4503108E-02	7.6501601E-08
	q	2.6870899E+00	3.8039709E+00	3.8874526E+00
	S	1.35130297E-01	1.4905582E-01	9.4802419E-02
	r^2	7.5500705E-01	8.5512766E-01	9.0590064E-01

Table 8. Model parameters of Tegazza date desorption isotherms at three temperatures

Models	parameters	Temperatures		
		40°C	50°C	60°C
GAB	A	-1.3538144E-01	-1.0631120E-01	-1.2812661E-01
	B	2.2469293E+01	1.1509816E+00	2.9950693E+01
	C	9.9961891E-01	9.9168426E-01	9.9970525E-01
	S	4.2051312E-02	2.0605969E-02	5.1158684E-02
	r ²	9.8166800E-01	9.8560635E-01	9.8124378E-01
Peleg	A	9.6031872E-01	3.6439506E-09	4.9769361E-09
	k	1.7766861E+00	4.1812376E+00	4.1275782E+00
	B	-9.6009453E-01	1.7125941E-01	1.0723777E-01
	q	1.7766861E+00	-6.4888186E-02	4.9980316E-02
	S	1.3579015E-01	1.6384339E-02	2.8781669E-02
	r ²	8.4707540E-01	9.9271998E-01	9.9525071E-01
BET	A	2.0398098E-01	1.4425471E+02	1.3298921E-01
	C	1.8043961E+00	1.2419379E-04	1.4677305E+00
	n	-1.6527645E-01	7.8424171E-01	-2.3463105E-01
	S	3.4129795E-02	9.0425647E-02	1.9655943E-02
	r ²	9.8792414E-01	7.2281607E-01	9.9723118E-01

Table 9. Model parameters of Bamakhlouf date desorption isotherms at three temperatures

Models	parameters	Temperatures		
		40°C	50°C	60°C
GAB	A	-1.1187980E-01	-1.1317039E-01	-1.1908188E-01
	B	1.4747643E+01	6.9670627E+00	6.0415004E+00
	C	9.9936626E-01	9.9869601E-01	9.9855391E-01
	S	3.9256465E-02	1.8564819E-02	1.8789033E-02
	r ²	9.9473497E-01	9.9785484E-01	9.96125917E-01
Peleg	A	4.3363487E-01	3.8895813E-09	-5.5001654E-01
	k	-3.4262062E-01	4.1914788E+00	2.4991706E+00
	B	7.796049E-11	5.2414657E-02	5.5002524E-01
	q	5.1308094E+00	2.2404252E-01	2.4991706E+00
	S	7.5851909E-02	8.0255226E-02	1.4094793E-01
	r ²	9.8427461E-01	9.6792881E-01	8.2559136E-01
	BET	A	1.7965963E-01	6.9558197E+00
C	2.1273255E+00	7.1301578E-10	1.7340500E+00	
n	-1.3360631E-01	3.8934301E+00	-1.7686765E-01	
S	4.7175214E-02	1.4448316E-01	2.7244222E-02	
r ²	9.9239663E-01	8.7006898E-01	9.9185466E-01	

6.3 Isotheric sorption heats determination

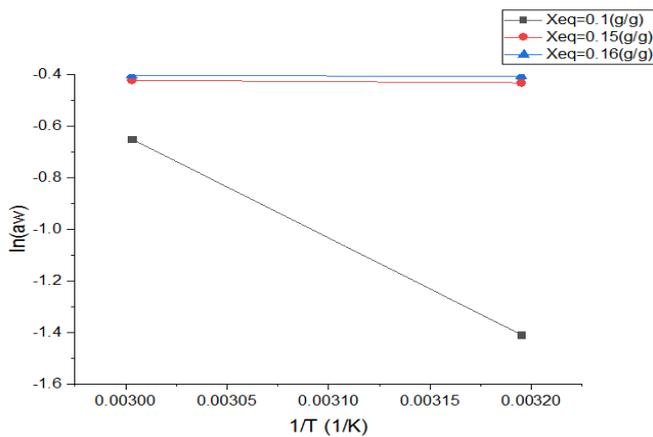


Figure 8. Desorption isotherms for L'hmira dates

To calculate the isothermal heat of sorption, we use the data accompanying the GAB model in the results pane, set the water content value and record the water activity values for each experimental temperature, then plot the curves

$$\ln a_w = f\left(\frac{1}{T}\right) \quad (1)$$

after that, we draw the curve

$$Q_{st} = f(X_{eq}) \quad (2)$$

Desorption isotherms for L'hmira, Tegazza and Bamakhlouf dates are illustrate in Figure 8, 10 and 12, respectively.

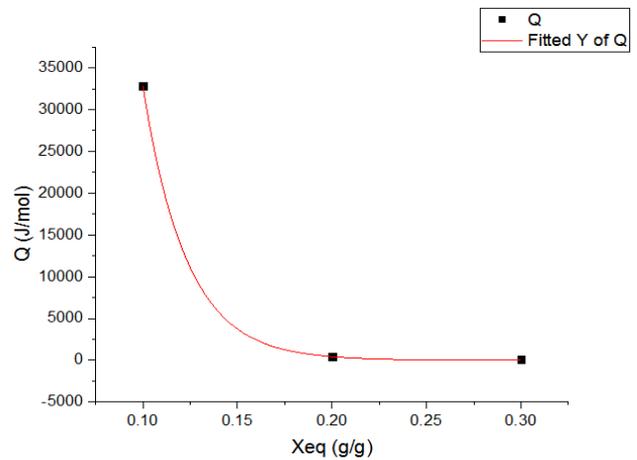


Figure 9. Net Isotheric heat desorption of L'hmira dates according to equilibrium water content

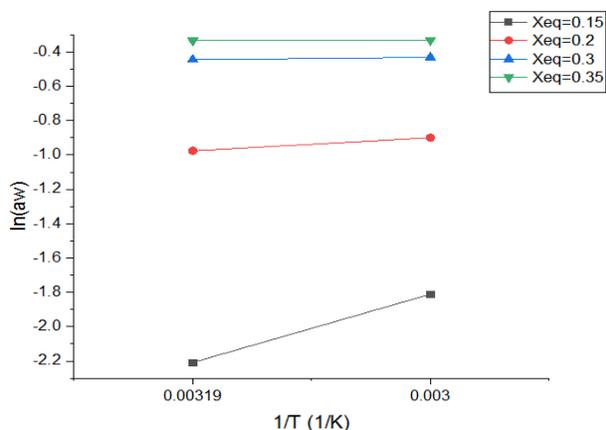


Figure 10. Desorption isosters for Tegazza dates

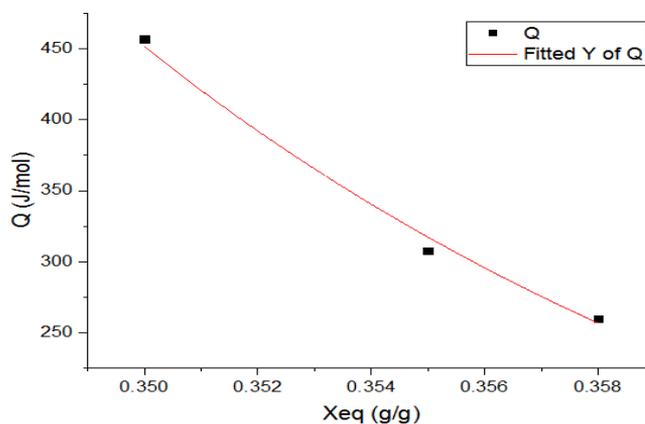


Figure 13. Net Isothermic heat desorption of Bamakhloof dates according to equilibrium water content

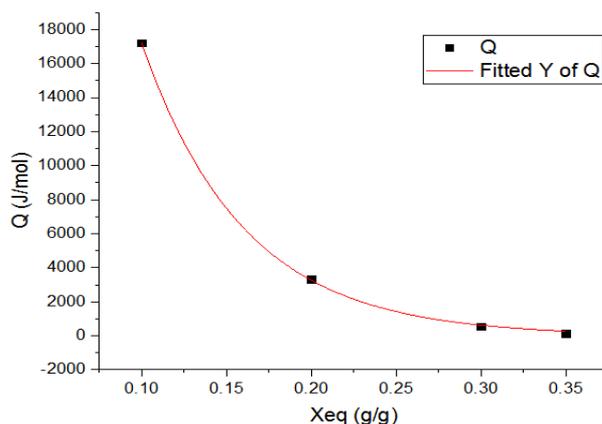


Figure 11. Net Isothermic heat desorption of Tegazza dates according to equilibrium water content

Table 10. Empirical parameters estimation

	Q_0 (kJ/mol)	X_0 (g H ₂ O/g MS)	r^2
L'hmira date	2515.87787723	0.023	0.99997
Tegazza date	90.78397681	0.060	0.99977
Bamakhloof date	23.0067.E09	0.0142	0.99394

7. CONCLUSION

The objective, after having the experimental curves of the desorption isotherms curves of the three varieties of dates (L'hmira, Tegazza, Bamakhloof) is to determine by following the most well-known models, by describing this phenomenon and of proposing a suitable model, thus calculating the isosteric heat and predicting the storage life.

Our study allowed us to conclude by noting, through previous theoretical and experimental work, that the determination of these curves is indispensable in the drying field and that the understanding of the equilibrium between the drying air and the wet product to be dried is imperative. Our determination that the BET model is suitable to describe the desorption isotherm of the L'hmira date, as well as the Peleg model is suitable to describe the isotherms of the desortions for both Tegazza and Bamakhloof dates. At the same time the proposed model also has acceptable results, where the coefficient of determination (r^2) has exceeded 0.99 in most cases. On the other hand, we calculated the isosteric heat. And we left the door open to those who want to complete this study for determining the adsorption curves and the estimated lifetime.

The desorption curves of the three types of dates were in good agreement with those found in many previous scientific works. Indeed, the water content at equilibrium is inversely proportional to the temperature, this was very clear on the isotherms, when the activity of the water exceeds 0.4.

Finally, the smoothing of the experimental points allowed us to find experimental equations characterizing the desorption of the date at 40 °C, 50 °C and 60 °C.

ACKNOWLEDGMENT

The present work was ben effectuated in the solar drying

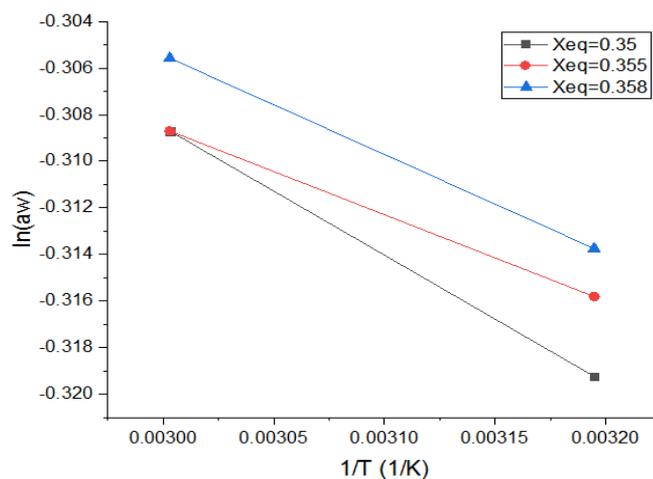


Figure 12. Desorption isosters for Bamakhloof dates

In Figure 9, 11 and 13, there is also an increase in net desorption heat as the degree of dehydration increases. This is due to the existence of highly active polar sites in the product that are been covered by water molecule forming the molecular layer [20].

Nonlinear regression was used to evaluate the parameters of the empirical Eq. (2) with the Levenberg-Marquardt method (Table 10). These results are in perfect agreement with the results obtained by Tsami et al. [21] for other food products.

laboratory at the Thermal and Thermodynamics Conversion Division, within the Research Unit Energies in Renewable Energies in the Sahara Medium. Development Centre of Renewable Energies, Adrar, Algeria

REFERENCES

- [1] Touati, B. (2008). theoretical and experimental study of solar drying of leaves of spearmint (mint viridis). PhD thesis. Department of Physics. Tlemcen.
- [2] Daguene, M. (1985). Solar dryers.
- [3] Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L., Sarsavadia, P.N. (2002). Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, 27(6): 579-590. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00005-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00005-1)
- [4] Kouhila, M., Belghit, A., Kaoua, M., Daguene, M. (1998). Experimental study of convective drying of mint in a modular multipurpose dryer with partially solar heating. *Revue Energie Renouvelable. Energetic Physics*, 1-5.
- [5] Kouhila, M., Belghit, A., Daguene, M., Boutaleb, B.C. (2001). Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia o cinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*). *Journal of Food Engineering*, 47(4): 281-287. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00130-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00130-8)
- [6] Mounzar, H., Azzi, A., Sahli, Y., Haida, A. (2018). Monthly fresh water yield analysis of three solar desalination units a comparative study in the south Algeria climatic condition. *International Journal of Heat and Technology*, 36(4): 1330-1335. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.360423>
- [7] Larbi, A.A., Loumani, A., Mediani, A., Bennaceur, S., Tigani, C. (2019). Experimental measurement of moisture sorption isotherms and isosteric heat of palm hearts (Jomare) harvested in the Algerian Sahara. *Instrumentation Mesure Métrologie*, 18(3): 297-304. <https://doi.org/10.18280/i2m.180310>
- [8] Dadda, B., Kherrou, S., Serir, L. (2008). Realization of an indirect solar dryer. *Review of Renewable Energies*, 2008: 127-134.
- [9] BOULEMTAFES-BOUKADOUM, A., & BENZAOU, A. Simulation Numerique D'un capteur solaire à air a Absorbent rugueux destiné au séchage des produits agricoles.
- [10] Benalia, E. Exploitation of the thermal source of Albian water in the solar drying of agro-alimentary products (Doctoral dissertation).
- [11] Chouicha, S. (2010). Experimental study of solar drying and impact on quality. Doctoral Dissertation, Thesis Magister, University Kasdi Merbah Ouargla.
- [12] Iglesias J.C.H.A. (1982). Water sorption parameters for food and food components. *Handb. food isotherms*, Acad. Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-370380-4.x5001-4>
- [13] Mitrevsky, V. (1973). Mathematical modelling of the sorption isotherms of quince. *Mathematical Modelling of the Sorption Isotherms of Quince*, 21(5): 13-25. <https://doi.org/10.2298/TSCI170118095M>
- [14] Belachi, W. (2009). Application of solar drying for the conservation of agro-food products. Magister's Memory: Kasdi Merbah University, Ouargla.
- [15] Jannot, Y. (2003). Sorption isotherms: Models and determination. LEPT-ENSAM.
- [16] Iglesias, H.A., Chirife, J. (1982). Handbook of food isotherms water sorption. Parameters for food and food components. Academic Press, New-York.
- [17] Nganhou, J. (1987). Coupled transfers of heat and matter in a thick bed drying. Thesis of the University of Poitiers.
- [18] Ahouannou, C., Jannot, Y., Sanya, E., Degan, G. (2010). Experimental determination and modeling desorption isotherms of tropical agricultural products.
- [19] Ahouannou, C., Jannot, Y., Lips, B., Lallemand, A. Characterization and modeling of the drying of three tropical products: Cassava, ginger and okra. *Food Sc.*, 20: 413-432.
- [20] Bachir, S. (2015). Mathematical modeling of indirect solar drying deglet-nour dehumidified dates. Master Thesis: Kasdi Merbah. Ouargla University.
- [21] Tsami, E., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., Saravacos, G.D. (1990). Heat of sorption of water in dried fruits. *International Journal of Food Science & Technology*, 25(3): 350-359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01092.x>
- [22] Jangam, S.V., Mujumdar, A.S. (2010). Basic concepts and definitions. *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*, 1: 1-30.
- [23] Heiss, R., Eichner, K. (1971). Moisture content and shelflife. *Food Manufacture*.
- [24] Akkad, S., Idlimam, A., Lamharrar, A., Essaber, M., Kouhila, M., Costa, J. (2008). Evaluation of the desorption isotherms and the isosteric heat of two aromatic and medicinal plants by the static gravimetric method with a view to their drying. *Renewable Energies Review SMST 08 Algiers*, pp. 1-6.
- [25] Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 14: 327-335.
- [26] Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. *J. Food Eng*, 20: 55-74.
- [27] Idlimam, A., Lamharrar, A., Abdenouri, N., Akkad, S., Kane, C.E., Jamali, A., Kouhila, M. (2008). Thermodynamic properties and moisture sorption isotherms of *Argania spinosa* and *Zygophyllum gaetulum*. *Journal of Agronomy*, 7(1): 1-14.
- [28] Lahsani, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. (2004). Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*), 45: 249-261. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00133](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00133)
- [29] Kouhila, M., Belghit, A., Daguene, M., Boutaleb, B.C. (2001). Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia o cinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*). *Journal of Food Engineering*, 47(4): 281-287. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00130-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00130-8)
- [30] Maroulis, Z.B., Tsami, E. (1984). Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. *Jour. Foods, Eng, Elsevier*, p. 119. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(88\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0260-8774(88)90069-6)
- [31] Iglesias, J.C.H.A. (1982). Water sorption parameters for food and food components. *Handb. Food Isotherms*, Acad. Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-370380-4.x5001-4>
- [32] Langmuir, I. (1932). Vapor pressures, evaporation, condensation and adsorption. *Journal of the American Chemical Society*, 54(7): 2798-2832. <https://doi.org/10.1021/ja01346a022>

- [33] Labuza, T.P., Kaanane, A., Chen, J.Y. (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherm and water activity shift of two dehydrates food. *J. Food Sci.*, 50: 385-391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x>
- [34] Mohamed, L.A., Kouhila, M., Lahsasni, S., Jamali, A., Idlimam, A. (2005). Equilibrium moisture content and heat of sorption of *Gelidium sesquipedale*. *Stored Prod. Res.*, 41: 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2004.03.001>
- [35] Kapsalis, J.G. (1987). Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherm. *Water Act. Appl. to Food*, eds. L.B. Rockl., L.R. Beuchat.
- [36] Barbosa-Canovas, T.P.L.G.V., Fontana, A.J., Schmidt, S.J. (2007). *Water Activity in Foods*. Blackwell Publ. Prof. Iowa, USA.
- [37] Mounzar, H., Azzi, A., Sahli, Y., Hieda, A. (2017). Immersed fins influence on the double slope solar still production in south Algeria climatic condition. *International Journal of Heat and Technology*, 35(4): 1065-1071. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.350444>
- [38] Mounzar, H., Azzi, A., Sahli, Y., Hieda, A. (2018). Double slope solar still with immersed fins: Theoretical and experimental study. *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series C-Electrical Engineering and Computer Science*, 80(1): 231-246.
- [39] Mounzar, H., Azzi, A., Sahli, Y., Haida, A. (2018). Monthly fresh water yield analysis of three solar desalination units a comparative study in the south Algeria climatic condition. *International Journal of Heat and Technology*, 36(4): 1330-1335. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.360423>

NOMENCLATURE

aw	water activity (dimensionless)
r ²	correlation coefficient [-]
T	temperature [°C]
X _{eq}	equilibrium moisture content [kg/kg]
H _r	relative humidity %
A,C,k,B, q,S	model coefficients
Q ₀	net isosteric heat of desorption [J/mol]

ملخص

يرتبط تشغيل المجفف الشمسي ارتباطاً وثيقاً بالأداء الصحيح لمجمع أو لاقط الطاقة الشمسية ، وهو الجزء الأكثر أهمية ، حيث يوفر الحرارة اللازمة ، ويحول الإشعاع الشمسي المستلم إلى حرارة قابلة للاستغلال ، و لكن يظل انخفاض كفاءته و مردوديته و انقطاعه عن العمل خلال الليل أو في غياب الشمس ، يشكلان مصدر قلق للعديد من الباحثين. من بين الحلول المقترحة: استخدام الأشكال المختلفة للزعانف ومواد تغيير الطور (MCP). قمنا بمحاكاة تشغيل المجمع الشمسي واختبرناه بشكل تجريبي ، وينتج عن المحاكاة في كلتا الحالتين: الحمل الحراري الطبيعي أو الحمل القسري ، ويظهر تحسناً بنسبة 15 % للنموذج مع الزعانف ، و 20 % للنموذج بإضافة MCP. تتيح إضافة MCP الحفاظ على درجة حرارة التشغيل عند حوالي 50 درجة مئوية وتمديد عمل النظام إلى 3 ساعات بعد غروب الشمس وأكثر من ذلك. كما تمت دراسة تجفيف المنتجات الغذائية: الطماطم و نبتة الشببة الطبية ، كتطبيق لدمج هذه النظم في مجففات بالطاقة الشمسية ، وتم تحديد التقدير التجريبي لظواهر الإمتصاص ثابتة الحرارة لأصناف التمر المحلية مثل لحميرة و تقربوش، بالإضافة إلى قلب النخيل: الجمار. كما تمت نمذجتها لاستخراج المعلومات الديناميكية الحرارية لهذه المنتجات خاصة بالنموذج الموافق للمواد الغذائية GAB .

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

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, restent le faible rendement et le fonctionnement de ces systèmes durant la nuit ou en absence du soleil, un souci pour plusieurs chercheurs. Parmi les solutions proposées: l'utilisation de différentes formes d'ailette et les matériaux à changement de phase. 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, montrent une amélioration de 15% pour la configuration avec ailettes, et 20% en ajoutant le MCP. L'ajout d'un MCP permet le maintien de la température de fonctionnement à environ 50°C et la prolongation de fonctionnement du système à 3h après le coucher du soleil et plus.

L'étude de séchage des produits alimentaires: la tomate et l'absinthe, comme application d'intégration de ces systèmes dans des séchoirs solaires a été évaluée, la détermination expérimentale des isothermes de sorption des variétés de dattes locales et le cœur du palmier a été faite, et modélisée afin d'arracher les informations thermodynamiques nécessaires pour le séchage et le stockage de ces produits.

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

Abstract

The operation of the solar dryer is strongly linked to the proper functioning of the solar collector, which is the most important part, providing the necessary heat, transforming the received solar radiation into heat, remain the low efficiency and the operation of these systems during the night or in the absence of the sun, a concern for several researchers. Among the solutions proposed: the use of different fin shapes and phase change materials. We simulated the operation of the solar collector and tested it experimentally, the simulation results in both cases: natural convection or forced convection, show an improvement of 15% for the configuration with fins, and 20% by adding the MCP. The addition of an MCP allows the operating temperature to be maintained at around 50 ° C and the system to be extended to 3 hours after sunset and more.

The drying study of food products: tomatoes and wormwood, as an application for integrating these systems in solar dryers was evaluated, the experimental determination of sorption isotherms of local date varieties and the heart of palm been made and modeled in order to extract the thermodynamic information for these products by using GAB model.

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