



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière

Département de Physique

Thèse de Doctorat

en Physique Énergétique

Présentée par :

Nadir Nadia

Approche théorique et expérimentale du  
séchage solaire des produits agro-  
alimentaires.

Devant le jury composé de :

Mr. BOUBEKRI Abdelghani	Pr. U.K.M. Ouargla	Président
Mr. BENMOUSSA Hocine	Pr. U.H.L. Batna	Examineur
Mr. ATTIA Med EL Hadi	Dr. U. El oued	Examineur
Mr. DAOUDI Bahmed	Pr. U.Ghardaia	Examineur
Mr. BOUGUETTAIA Hamza	Pr. U.K.M. Ouargla	Promoteur
Mr. BOUGHALI Slimane	Pr. U.K.M. Ouargla	Co-promoteur

Année Universitaire : 2020/2021.

# **REMERCIEMENTS**

Les travaux exposés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides ( LENREZA), Faculté des sciences et de la technologie et des sciences de la matière, Université Kasdi Merbah Ouargla. Par cette occasion je tiens à adresser mes plus vifs remerciements au directeur actuel, Omar Boukraa

Avant tout je remercie Dieu qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Je remercie mon encadreur Monsieur Bouguettaia Hamza, Professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire, pour ses conseils précieux, et la compétence de son encadrement.

J'exprime tous mes remerciements à mon co-encadreur Monsieur Slimane Boughali, Professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla pour tous ses efforts, ses soigneux conseils et tout son soutien physique dont besoin. Je le remercie beaucoup pour sa patience et pour tout le temps qu'il m'a consacré.

Je remercie Monsieur BOUBEKRI Abdelghani, Professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie vivement Messieurs BENMOUSSA Hocine, Professeur à l'université de Batna, et Messieurs ATTIA Med ELHadi, Docteur à l'université d'Eloued, et Messieurs DAOUDI Bahmed, Professeur à l'université de Ghardaia pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également, Monsieur Djamel Bechki, Professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour ses aides, ses conseils, ainsi que ses encouragements.

Je remercie mes amies : Madame Rzeria Yamina, Madame Mahdadi Roukia, pour leur soutien moral et leur aide durant mon travail. Enfin je passe un grand remerciement à tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce mémoire.

## Table de matière

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I: Synthèse bibliographique et présentation des matériaux locaux</b>	
I.1. Introduction.....	7
I.2. Isolation thermique.....	9
I.3. Avantages d'isolation thermique.....	9
I.4. Classification des matériaux isolants.....	9
I.4.1. Matériaux inorganique.....	9
I.4.2. Matériaux organiques.....	10
I.4.3. Matériaux combinés.....	11
I.5. Propriétés et performances d'un matériau isolant.....	11
I.5.1. Propriétés physiques.....	11
I.5.2. Propriétés de l'hygiène et de la santé.....	12
I.6. Matériaux composites à base de fibres naturelles.....	12
I.7. Généralité sur le palmier dattier.....	12
I.7.1. Etude morphologique du palmier dattier.....	13
I.7.1.1. Parties de palmier dattier.....	14
I.7.1.2. Fibres de palmier dattier.....	15
I.8. Estimation du tonnage du palmier dattier et de leurs sous-produits.....	15
I.8.1. Variétés de palmier dattier en Algérie.....	15
I.8.2. Sous-produits de palmier dattier et leurs applications.....	16
I.8.2.1. Sous – produits de palmier.....	16
I.9. Synthèse des travaux réalisés sur le bois de palmier.....	17
I.10. Conclusion.....	20
<b>Chapitre II: Etude théorique de gisement solaire et du capteur solaire plan</b>	
II.1. Introduction.....	22
II.2. L'astre solaire.....	23
II.2.1. Paramètres physiques de l'astre solaire.....	23

II.3. Le rayonnement solaire .....	23
II.3.1 Spectre solaire .....	23
II.3.2. Constante solaire .....	24
II.3.3. L'Albédo .....	25
II.4. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire .....	25
II.4.1. Air-masse.....	26
II.5. Interaction des rayonnements électromagnétiques avec l'atmosphère.....	26
II.5.1. Phénomène de diffusion .....	26
II.5.2. Phénomène d'absorption .....	27
II.6. Interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière .....	27
II.7. Composantes du rayonnement solaire .....	27
II.8. Eclairement ou densité de puissance .....	28
II.9. Irradiation ou densité d'énergie .....	28
II.10. Le capteur solaire plan .....	28
II.10.1. Principe de Fonctionnement .....	28
II.10.2. Constituants d'un capteur solaire plan .....	29
II.10.2.1. Partie avant .....	29
II.10.2.2. Partie absorbante.....	30
II.10.2.3. Partie arrière.....	30
II.10.3. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire.....	30
II.10.3.1. Les paramètres internes .....	30
II.10.3.2. Paramètres externes .....	33
II.11. Analyse thermique de capteur solaire plan à air .....	33
II.11.1. Bilan thermique global de la paroi absorbante .....	34
II.11.2. Méthode par tranche .....	35
II.11.2.1. Bilan thermique de la vitre .....	35
II.11.2.2. Bilan thermique de l'absorbeur .....	35
II.11.2.3. Bilan thermique du fluide caloporteur .....	35

II.11.2.4. Bilan thermique dans la plaque inférieure en Aluminium.....	36
II.11.3. Méthode globale.....	38
II.12. Rendement instantané du capteur solaire.....	40
II.13. Conclusion .....	41

### **Chapitre III: Notion générale sur le séchage**

III.1. Introduction .....	43
III.2. Les milieux poreux .....	44
III.2.1. Propriétés du milieu poreux .....	44
III.2.1.1. La porosité.....	44
III.2.1.2. La perméabilité.....	45
III.3. Caractéristiques des solides humides .....	45
III.3.1. Humidité absolue .....	45
III.3.2. Humidité relative.....	46
III.4. Activité de l'eau dans les aliments .....	46
III.5. Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz.....	46
III.6. Isotherme d'adsorption et de désorption .....	48
III.6.1. Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption .....	50
III.7. Cinétique du séchage.....	50
III.7.1. Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide .....	51
III.7.1.1. Période de mise en température.....	52
III.7.1.2. Période à allure constante.....	52
III.7.1.3. Période de ralentissement.....	52
III.8. Classification des systèmes de séchage à énergie solaire.....	53
III.8.1. Séchoir solaire passif ou à convection naturelle .....	54
III.8.2. Séchoir solaire actif ou à convection forcée .....	54
III.8.3. Séchoir solaire direct .....	55
III.8.4. Séchoir solaire indirect.....	55
III.8.5. Les séchoirs solaires mixtes .....	56

III.8.6. Séchoirs solaires hybrides .....	57
III.9. Mode de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage.....	58
III.10. Description et formulation mathématique du séchage .....	59
III.10.1. Description et modélisation du caisson de dessiccation .....	59
III.10.2. Hypothèses simplificatrices .....	60
III.10.3. Equations du modèle .....	61
III.10.4. Détermination des coefficients d'échange.....	61
III.10.5. Méthode de résolution.....	63
III.11. Démarche à suivre pour bien mener une opération de séchage solaire .....	63
III.11.1 Détermination des contraintes du produit .....	63
III.11.2. Caractéristiques du site .....	64
III.11.2.1. Facteurs climatiques .....	64
III.11.2.2. Facteurs humains.....	65
III.11.3. Réalisation du séchoir .....	65
III.12. Modèle de séchage en couche mince.....	66
III.12.1. Paramètres statistiques utilisés.....	67
III.13. Conclusion.....	69

#### **Chapitre IV: Etude expérimentale du capteur solaire plan**

IV.1. Introduction .....	71
IV.2. Description de capteur solaire .....	72
IV.3. Principe de fonctionnement.....	73
IV.4. Appareillages de mesures.....	73
IV.4.1. Mesure du rayonnement solaire .....	73
IV.4.2. Mesure de la température, et la vitesse de l'air .....	74
IV.5. Matériels.....	74
IV.5.1. Bois de palmier dattier .....	74
IV.5.2. Le sable de dunes .....	74
IV.5.3. Préparation des matériaux locaux .....	75

IV. 6. Résultats expérimentaux.....	77
IV.6.1. Influence de l'isolation thermique.....	77
IV.6.1.1. Effet du rayonnement sur la température.....	77
IV.6.1.2. Effet de la température de l'absorbeur sur la température d'entrée et de sortie.....	78
IV.6.1.3. la variation de la température de sortie.....	80
IV.6.1.4. Efficacité thermique des capteurs solaires avec isolation de palmier dattier.....	83
IV.6.2. Influence de sable.....	85
IV.6.2.1. Variation des différentes températures.....	85
IV.6.2.2. Variation de la différence des températures.....	86
IV. 7. Conclusions.....	87

### **Chapitre V: Etude expérimentale du séchage solaire**

V.1. Introduction.....	89
V.2. Description du système de séchage.....	91
V.2.1. Le capteur solaire.....	91
V.2.2. La chambre de séchage.....	92
V.3. Fonctionnement du système.....	92
V.3.1. Préparation du sable.....	93
V.3.2. Conception du concentrateur.....	93
V.4. Séchage de la tomate.....	94
V.4.1. Préparation du produit.....	94
V.4.2. Détermination de la masse sèche du produit.....	94
V.4.3. Protocole expérimental.....	94
V.5. Résultats expérimentaux.....	98
V.5.1. Effet du rayonnement sur la température.....	98
V.5.2. Profil des températures du produit et de l'air asséchant.....	100
V.5.3. Variations du rayonnement solaire.....	103

V.5.4. Variation de la température de sortie des capteurs.....	104
V.6. Caractéristiques de séchage .....	106
V.6.1. Variation de la teneur en eau.....	106
V.6.2. Cinétique de séchage.....	109
V.7. Modèles théoriques appropriés pour le processus de séchage.....	111
V.8. Conclusions .....	115
Conclusion général et perspectives.....	118
Références bibliographiques.....	121
ANNEXE A: Les instruments de mesure.....	120
ANNEXE B: Les modèles théoriques appropriés pour le processus de séchage.....	139



## Liste des figures

<b>Figure.I.1</b> : Schéma de palmier dattier .....	13
<b>Figure.I.2</b> : Schéma d'une palme de palmier dattier.....	14
<b>Figure I.3</b> : Couffins et cordage .....	16
<b>Figure I.4</b> : Plats et plateaux.....	16
<b>Figure I.5</b> : Chapeaux .....	16
<b>Figure I.6</b> : Utilisation du stipe de palmier et de kernef dans la toiture d'une maison.....	17
<b>Figure I.7</b> : Combustible de rachis. ....	17
<b>Figure II.1</b> : Le spectre solaire. ....	24
<b>Figure II.2</b> : Masse atmosphérique ou air masse.....	26
<b>Figure II.3</b> : Phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission.....	27
<b>Figure II .4</b> : Composants d'un capteur solaire plan.....	28
<b>Figure II.5</b> : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés. ....	29
<b>Figure II.6</b> : Schéma électrique relatif à une section du capteur. ....	35
<b>Figure II.7</b> : Echanges thermiques dans une tranche fictive dx. ....	37
<b>Figure III.1</b> : Isotherme d'équilibre .....	47
<b>Figure III.2</b> : Isotherme d'adsorption et de désorption.....	49
<b>Figure III.3</b> : Périodes du séchage. ....	51
<b>Figure III.5</b> : Séchoir solaire indirect.....	56
<b>Figure III.6</b> : Séchoir solaire mixte à circulation forcé.....	57
<b>Figure III.7</b> : Séchoir solaire hybride solaire gaz. ....	58
<b>Figure III.8</b> : Mode de transfert lors du séchage.....	58
<b>Figure III.9</b> : Echange thermique et massique dans une tranche du caisson de dessiccation ..	60
<b>Figure IV.1</b> : Schématisation du capteur solaire plan à air. ....	72
<b>Figure IV.2a</b> : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps. 77	77
<b>Figure IV.2b</b> : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps. 78	78
<b>Figure IV.2c</b> : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps. 78	78
<b>Figure IV.3.a</b> : Variation de la température de l'air d'entrée, et de sortie de capteur solaire et de la température de l'absorbeur avec le temps de tout les capteurs isolants. ....	79
<b>Figure IV.3b</b> : Variation de la température de l'air d'entrée, et de sortie de capteur solaire et de la température de l'absorbeur avec le temps de tout les capteurs isolants. ....	80
<b>Figure IV.3c</b> : Variation de la température de l'air d'entrée, et de sortie de capteur solaire et de la température de l'absorbeur avec le temps de tout les capteurs isolants. ....	80
<b>Figure IV.4</b> : Variation de la température de sortie de capteur solaire avec le temps.....	81

<b>Figure IV.5 :</b> La variation de la différence de température entre la température de sortie et la température d'entrée pour les sept capteurs .....	82
<b>Figure IV.7 :</b> Efficacité thermique de tous les capteurs isolants. ....	85
<b>Figure IV.8a :</b> Variation des températures en fonction du temps.....	86
<b>Figure IV.8b :</b> Variation des températures en fonction du temps. ....	86
<b>Figure IV.9 :</b> Variation de la différences des températures en fonction du temps. ....	86
<b>Figure V.1 :</b> Schéma descriptif du système de séchage .....	91
<b>Figure V.2 :</b> Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (sans amélioration).....	99
<b>Figure V.3 :</b> Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable).....	99
<b>Figure V.4 :</b> Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable + réflecteur droit).....	99
<b>Figure V.5 :</b> Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable + réflecteur gauche).....	100
<b>Figure V.6 :</b> Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable + réflecteur droit - gauche). ....	100
<b>Figure V.7 :</b> Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (sans amélioration).....	101
<b>Figure V.8 :</b> Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable).....	101
<b>Figure V.9 :</b> Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable + réflecteur droit). ....	102
<b>Figure V.10 :</b> Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable + réflecteur gauche).....	102
<b>Figure V.11 :</b> Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable + réflecteur droit - gauche).....	102
<b>Figure V.12 :</b> Variations du rayonnement solaire en fonction du temps.....	104
<b>Figure V.13 :</b> Variation de la température de l'air de sortie avec le temps de tous les cas du capteur. ....	105
<b>Figure V.14 :</b> Influence de la couche de sable à la surface de l'absorbeur de capteur sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage. ....	107
<b>Figure V.15 :</b> Influence de réflecteur aux côtés de capteur sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.....	108

<b>Figure V.16</b> : Variation de la vitesse de séchage en fonction de la durée de séchage et de la teneur en eau du produit. ....	110
<b>Figure V.17</b> : Humidité absolue réduite expérimentale et simulée par le modèle de Midilli. ....	114

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Différentes variétés de palmier dattier en Algérie.....	15
<b>Tableau III.1:</b> Modèles des courbes de sorption, désorption.....	50
<b>Tableau III.2 :</b> Différents modèles mathématiques de séchage.....	67
<b>Tableau V.1:</b> Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes expériences. ....	111

## Liste des photos

<b>Photo IV.1 :</b> Photo des capteurs solaires plan à air. ....	73
<b>Photo. IV. 2a.</b> Photo du capteur solaire avec isolant pétiole (pièce). ....	75
<b>Photo. IV. 2b.</b> Photo du capteur solaire avec isolant fibres (pièce). ....	75
<b>Photo. IV. 3a.</b> Photo du capteur solaire avec isolant pétiole (poudre). ....	76
<b>Photo. IV. 3b.</b> Photo du capteur solaire avec isolant fibres (poudre). ....	76
<b>Photo. IV. 4a.</b> Photo du capteur solaire avec isolant pétiole poudre + platre. ....	76
<b>Photo. IV. 4b.</b> Photo du capteur solaire avec isolant fibres poudre + platre. ....	76
<b>Photo V. 1:</b> Photographie du capteur solaire plan avec réflecteur. ....	94
<b>Photo V. 2:</b> Photographie du capteur solaire plan avec une couche de sable sur l'absorbeur. ....	95
<b>Photo V. 3:</b> Photographie du capteur solaire plan avec un réflecteur sur le coté droit. ....	96
<b>Photo V. 4:</b> Photographie du capteur solaire plan avec un réflecteur sur le coté gauche. ....	96
<b>Photo V. 5:</b> Photographie du capteur solaire plan avec des réflecteurs sur les cotés droit - gauche. ....	97

## Nomenclature

$A_W$	Activité de l'eau du produit	
$C_{ppe}$	Chaleur massique de la paroi externe	$J.kg^{-1}C^{-1}$
$C_{pa}$	Chaleur massique de l'air	$J.kg^{-1}C^{-1}$
$C_{pe}$	Chaleur massique de l'eau	$J.kg^{-1}C^{-1}$
$C_{ppi}$	Chaleur massique de la paroi interne	$J.kg^{-1}C^{-1}$
$C_{ppr}$	Chaleur massique du produit	$J.kg^{-1}C^{-1}$
$C_s$	Chaleur spécifique du substrat	$J.kg^{-1}C^{-1}$
$V_{TD}$	Coefficient de thermo migration de vapeur	$m^2/s$
$L_{TD}$	Coefficient de thermo migration du liquide	$m^2/s$
$D_L$	Coefficient de diffusion du liquide	$m^2/s$
$D_V$	Coefficient de diffusion du liquide	$m^2/s$
$D_M$	Coefficient de diffusion massique isotherme	$m^2/s$
$D_T$	Coefficient de diffusion massique non isotherme	$m^2/s$
$D_{MV}$	Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur	$m^2/s$
$D_{TV}$	Coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur	$m^2/s$
$H$	Enthalpie de l'air humide	$J.kg^{-1}$
$h_{ce}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{ci}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la face interne de la paroi de l'armoire de séchage.	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{cp}$	Coefficient d'échange thermique par convection air-produit	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_d$	Coefficient d'échange thermique par conduction entre les parois de l'armoire de séchage	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$H_r$	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de la paroi de l'armoire de séchage et la voûte céleste.	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$J_L$	Flux masse surfacique du liquide	$kg/m^2s$
$J_V$	Flux masse surfacique de la vapeur d'eau	$kg/m^2s$
$K$	Conductivité hydraulique du milieu	$W/m^2 K$
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C	$Jkg^{-1}$
$M$	Taux de changement de phase	$kg/s$
$ma.s$	Masse de l'air sec	$kg$
$M_h$	Masse du produit humide	$kg$
$m_{pe}$	Masse d'une section i de la paroi externe de l'armoire de séchage	$kg$
$m_{pi}$	Masse d'une section i de la paroi interne de l'armoire de séchage	$kg$
$m_{pr}$	Masse du produit par claie	$kg$

$M_s$	Masse du produit sec	kg
$m_{v,e}$	Masse de la vapeur d'eau	kg
$N_u$	Nombre de Nusselt	
$P_m$	Pression de vapeur à la surface mouillée du solide	Pa
$P_r$	Nombre de Prandtl	
$P_{s,\theta}$	Pression de saturation de la vapeur d'eau à la température $\theta$	Pa
$P_v$	Pression de la vapeur d'eau dans l'air	Pa
$R_e$	Nombre de Reynolds	
$S_p$	Surface du produit	$m^2$
$S_{pr}$	Surface d'échange par convection air produit	$m^2$
$\Delta S_p$	Elément de surface de l'armoire de séchage	$m^2$
$T_H$	Température humide	$^{\circ}C$
$T_{s,p}$	Température à la surface du produit	$^{\circ}C$
$T_{a,a}$	Température de l'air asséchant	$^{\circ}C$
$T_p$	Température du produit	$^{\circ}C$
$T_a$	Température ambiante	$^{\circ}C$
$T_v$	Température de la vitre	$^{\circ}C$
$T_p$	Température d'absorbeur	$^{\circ}C$
$T_f$	Température du fluide caloporteur, air	$^{\circ}C$
$T_{Al}$	Température de la plaque d'aluminium près de l'isolant (plan inférieur de l'écoulement De veine d'air mobile)	$^{\circ}C$
$U_{av1}$	Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre	$W/m^2$
$U_{ar}$	Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur	$W/m^2$
$h_{r,p-v}$	Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre	$W/m^2$
$h_{c,p-v}$	Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre	$W/m^2$
$h_{c,p-f}$	Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide	$W/m^2$
$h_{r,p-Al}$	Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium	$W/m^2$
$h_{c,p-Al}$	Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium	$W/m^2$
$X$	Humidité absolue ou Teneur en eau	(kg d'eau/kg matière sèche)
$X_{eq}$	Humidité absolue d'équilibre	(kg d'eau/kg matière sèche)
$X_r$	Humidité réduite $X_r = X/X_i$	
$X_s$	Humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère saturée en humidité	(kg d'eau/kg matière sèche)
$dX/dt$	Vitesse de séchage	(Kg eau / kg

		matière sèche.
		min)
Y	Masse de la vapeur d'eau à $\theta$ °C	kg
$\Phi$	Humidité relative	%
$\varphi_{eq}$	Humidité relative d'équilibre	%
$\Psi$	Degré de saturation	
$\Theta$	Température	°C
A	Coefficient d'échange convectif	W m <sup>-2</sup> C <sup>-1</sup>
$\Lambda$	Conductivité thermique du produit	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
$\rho_c$	Capacité calorifique équivalente	J/m <sup>3</sup> K
S $\rho$	Masse volumique de la phase solide	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_L$	Masse volumique de la phase liquide	kg/m <sup>3</sup>
cond $\varphi$	Quantité de chaleur transférée au produit par conduction par unité de temps	W
conv $\varphi$	Quantité de chaleur transférée au produit par convection par unité de temps	W
$\varepsilon_v$	Emissivité de la vitre	
$\varepsilon_p$	Emissivité de l'absorbeur	

#### Indices

A	Air
Ab	Air ambiant
C	Ciel
P	Paroi
Pe	Paroi extérieure
Pi	Paroi intérieure
Pp	Isolant entre les parois
Pr	Produit
V	Vent extérieur



## **Abstract**

This work presents the results of an experimental study concerning the drying of tomato in a solar dryer under forced convection. The objective of this work is to study on one hand a solar air heater designed with vegetable materials as insulating material (date palm wood). The study focuses on the comparison of the thermal performance of this collector and another collector identical in design, fabrication and operating under the same conditions, using glass wool as heat insulation.

On the other hand, it aims to study the drying of tomato in a solar dryer; the first part is based on the creation of a heat storage reservoir at the absorber by adding a layer of blackened sand. The second part investigates the effectiveness of adding a flat-plate solar reflector on the right and the left sides of the solar crop dryer built from locally available materials. Reflectors solar panels improve the process of solar drying of tomatoes. The drying experiments have been carried out by both dryers with and without the flat concentrating solar panels (witness). The aim of this study is to obtain a novel system of drying which gives a lower moisture value and less drying time.

Lastly, the obtained moisture ratio values have been applied to ten different moisture ratio models in the literature. The model having the highest correlation coefficient ( $R^2$ ) and the lowest Chi-square ( $\chi^2$ ) value has been determined as the most relevant one for each tomato drying status.

**Keywords:** Solar collector, Thermal isolation, Energy efficiency, Flat plate reflector, Drying, Solar drying, Tomato, Mathematical models.

## Résumé

Ce travail présente les résultats expérimentale concernant le séchage de la tomate dans un séchoir solaire fonctionnant par convection forcée. L'objectif de ce travail est d'étudier d'une part le capteur solaire conçu avec un matériau végétal comme isolant, le bois de palmier dattier. L'étude se concentre sur la comparaison des performances thermiques de ce capteur et d'un autre capteur identique dans la conception, la fabrication et le fonctionnement dans les mêmes conditions, en utilisant de la laine de verre comme isolation thermique.

D'autre part, vise à étudier le séchage de la tomate dans un séchoir solaire, la première partie est basée sur la création d'un réservoir de stockage de chaleur interne au niveau de l'absorbeur par l'ajout d'une couche de sable noirci. La deuxième partie étudie l'efficacité par l'ajout d'une plaque plane de réflecteur solaire à droite et à gauche du séchoir solaire, construite à partir de matériaux disponibles localement. Les plaques solaires à réflecteurs améliorent le processus de séchage solaire des tomates. Les essais de séchage ont été effectués par le séchoir à plaque réflecteur solaire et les autres sans réflecteurs (témoin). Le but de cette étude est d'obtenir un nouveau système de séchage offrant une valeur d'humidité inférieure et un temps de séchage réduit.

Enfin, les valeurs de taux d'humidité obtenues ont été appliquées à dix modèles différents de taux d'humidité dans la littérature. Le modèle ayant le coefficient de corrélation le plus élevé ( $R^2$ ) et la valeur la plus faible du ( $\chi^2$ ) a été déterminé comme étant le plus pertinent pour chaque état de séchage des tomates.

**Mot clés :** Capteur solaire, Isolant thermique, Rendement, Plaque plan réflecteur, Séchage, Séchage solaire, Tomate, Modèle mathématique.

## ملخص

يقدم هذا العمل النتائج التجريبية المتعلقة بتجفيف الطماطم في مجفف شمسي يعمل بالحمل القسري. الهدف من هذا العمل هو دراسة المجمع الشمسي المصمم من مادة نباتية كعازل ، خشب نخيل التمر. تركز الدراسة على مقارنة الأداء الحراري لهذا المجمع مع مجمع آخر مماثل في التصميم والتصنيع والتشغيل تحت نفس الظروف ، باستخدام الصوف الزجاجي كعازل حراري.

من ناحية أخرى ، يهدف إلى دراسة تجفيف الطماطم في مجفف شمسي ، الجزء الأول يعتمد على إنشاء خزان حرارة داخلي على مستوى الممتص بإضافة طبقة من الرمال المطلي بالأسود. يدرس الجزء الثاني تأثير إضافة لوحة عاكسة شمسية مسطحة إلى يمين ويسار المجفف الشمسي ، مصنوعة من مواد متوفرة محلياً. تعمل الألواح العاكسة الشمسية على تحسين عملية التجفيف الشمسي للطماطم. تم إجراء اختبارات التجفيف بواسطة المجفف ذو الألواح العاكسة للشمس والأخرى بدون عاكسات (تحكم). الهدف من هذه الدراسة هو الحصول على نظام تجفيف جديد يقدم قيمة رطوبة أقل ووقت تجفيف أقل.

أخيراً، تم تطبيق قيم نسبة الرطوبة التي تم الحصول عليها على عشرة نماذج مختلفة لنسبة الرطوبة في الأدبيات. تم تحديد النموذج الذي يحتوي على أعلى معامل ارتباط ( $R^2$ ) وأقل قيمة ( $K^2$ ) ليكون الأكثر ملائمة لكل حالة من حالات تجفيف الطماطم.

**الكلمات المفتاحية:** اللواقط الشمسية، العازل الحراري، المرود، العاكس المسطح، التجفيف، التجفيف الشمسي، الطماطم، نموذج رياضي.

---

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

---

## Introduction générale

L'énergie a toujours constitué un enjeu vital pour l'homme et les sociétés humaines. Les comportements humains sont fortement induits par sa disponibilité ou sa non-disponibilité, son abondance ou sa pénurie. De ces comportements vont découler de nouveaux enjeux, en particulier pour l'environnement et les équilibres socio-économiques. La prise de conscience de l'importance de ces enjeux (réchauffement climatique, épuisement des ressources, augmentation des coûts de la santé, ...) devrait, nous l'espérons, permettre de tendre vers une utilisation plus rationnelle de l'énergie, une optimisation des processus énergétiques que nous mettons en œuvre tous les jours [1].

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2% des émissions de gaz à effet de serre des pays riches sur la période 2002-2012 par rapport à 1990 [2].

Les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air (Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre qui sont responsables du réchauffement de la terre). Pour répondre aux besoins humains en énergie les scientifiques comme les gouvernements s'orientent vers le développement et l'exploitation des ressources des énergies renouvelables, où l'énergie solaire se trouve au premier rang. Les principaux avantages qui rendent cette source d'énergie renouvelable très intéressante sont les points suivantes: Energie gratuite, disponibilité sur une grande partie du globe (Gisement solaire), absence des risques d'épuisement (au moins à l'échelle humaine), pas de rejets polluants, pas de danger radioactif et déchets encombrants.

L'Algérie suite à sa situation géographique dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. L'énergie solaire est transmise principalement à la terre au moyen des rayonnements électromagnétiques dont la longueur d'onde approximativement varie de 10<sup>-8</sup> à 10<sup>-16</sup> μm (Spectre électromagnétique du soleil) [3].

Cette énergie peut être exploitée dans plusieurs domaines tels que, le séchage des produits agricoles et du bois, distillation de l'eau de mer, climatisation des locaux, production de l'eau chaude, production de l'électricité, la réfrigération solaires,.....etc.

Toutes ces applications ne peuvent être réalisées qu'avec des dispositifs qui nous permet de concentrer le rayonnement solaire qui arrive sur terre, tels que, les panneaux photovoltaïques, les capteurs solaires thermiques plans et/ou concentrateurs, ...etc.

Dans notre cas, en première étape nous sommes intéressés par le capteur thermique plan, Ce dernier est un système qui peut intercepter le rayonnement solaire pour le transformer en énergie calorifique utilisable directement ou après stockage.

En raison de l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur il est intéressant d'apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique.

Le rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique dépend de sa forme, de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci. L'amélioration des performances des capteurs solaires plans consiste à limiter les pertes thermiques entre l'absorbeur et l'environnement.

Les matériaux tels que la laine de verre, de roche, de bois et l'amiante couvrant une variété large de produits d'usage courant comme des isolants thermiques et/ou acoustique [4]. Cependant, suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, ou pour des raisons économiques relatives aux quelques fibres (fibre de verre, fibre d'acier,...), plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les matériaux végétaux en raison de leur disponibilité et leur faible impact environnemental [5]. En effet, l'utilisation des ressources renouvelables devient de plus en plus fréquente de nos jours. Quoique l'Algérie soit parmi les pays qui possèdent une multitude de matériaux végétaux (le palmier dattier, le coton, le chanvre, le liège) [5,6], la valorisation de ces matériaux dans le domaine de la construction reste insuffisante.

Dans la deuxième étape nous sommes intéressés par le procédé de séchage solaire. Le séchage est une opération unitaire qui consiste à éliminer totalement ou partiellement un liquide imprégnant un matériau par apport d'énergie thermique. Il permet de réduire considérablement la masse et le volume des produits ce qui facilite leur transport, stockage et manutention. Il sert aussi à stabiliser, transformer et à donner une texture ou une

fonctionnalité particulière au produit. Le séchage est utilisé pour des produits très différents comme les matériaux granulaires, les produits liquides, les matériaux pâteux, etc. Le choix d'une technologie de séchage résulte d'un compromis technique et économique [7].

Le séchage est l'une des méthodes de conservation des produits agro-alimentaires parmi tant d'autre ex: congélation, manipulation génétique du produit mais cette dernière est coûteuse et demande une haute technicité; quant à la congélation elle consomme beaucoup d'énergie car elle est alimentée en courant électrique d'une façon permanente ce qui se répercute sur le coût du produit.

De nos jours l'accroissement incessant de la population mondiale exige un accroissement parallèle de la production alimentaire. Cet indispensable surplus peut, dans un certain pourcentage, être récupéré dans la réduction des pertes après récoltes: un séchage correct, bien adapté, est un remède envisageable.

Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle (exposition direct ou soleil) sans l'aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maints problèmes, parmi ces derniers, le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, l'incertitude du temps, le coût de la main d'œuvre élevé, la nécessité de zones vastes, l'infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires.

Pour parer aux inconvénients du séchage en pleine air des séchoirs solaires ont été conçus. En plus de l'aspect purement énergétique il faut prendre en considération l'aspect économique et l'aspect qualité du produit séché. Au fait la philosophie générale est la suivante: Compte tenu des conditions météorologiques et des contraintes biologiques du produit à sécher .Quelle est l'installation solaire qui séchera une production donnée dans les meilleurs délais et à moindre coût tout en gardant les propriétés organoleptiques du produit?! [8]. Il faut prendre l'opération de séchage en vitesse c'est-à-dire pouvoir sécher rapidement pour éviter le pourrissement du produit mais pas trop vite une croûte risque alors de se former en surface empêchant l'eau de sortir; ni à trop haute température le produit se dénature et noircit. Il faut prendre aussi en considération les propriétés et les caractéristiques du produit à sécher.

Le choix d'un type de séchoir et de ses dimensions est encore empirique et trop rudimentaire pour traduire la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Cette thèse s'inscrit dans une optique d'étude et d'optimisation du séchage solaire des produits agro alimentaires en mettant l'accent sur la conception et la réalisation au niveau du laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) Université de Ouargla de prototypes de séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée.

L'objet de première approche expérimentale consiste à apporter une contribution à la valorisation des ressources renouvelables et locales (le bois de palmier dattier), afin de les intégrer dans le domaine de l'isolation thermique des capteurs solaires. Nous souhaitons analyser la possibilité d'utiliser certaines parties renouvelables du palmier dattier pour réaliser des isolants thermiques.

La deuxième approche porte sur l'amélioration d'un séchoir solaire. Dans cette étude, un séchoir a été développé pour le séchage de tomate. Le système de séchage solaire mis au point comprend une plaque d'absorption couvert avec du sable qui est considéré comme matériau de stockage. Des expériences de séchage ont été réalisées avec et sans matériel de stockage. De l'autre côté, un séchoir solaire équipé de réflecteurs plats gauche-droit, pour maximiser l'énergie solaire incidente sur le séchoir. Les courbes de taux d'humidité obtenues avec ces expériences ont été comparées aux dix différentes équations du rapport d'humidité dans la littérature et le modèle présentant le résultat le plus approprié a été déterminé.

Ce travail est subdivisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'isolation thermique et les composites naturelles. La première partie s'intéresse à, l'isolation thermique, ses avantages et les différents types des matériaux isolants. La deuxième partie est consacré à une revue sur le bois du palmier dattier; la morphologie, les localisations en Algérie et les travaux qui ont été réalisés sur ce matériau.

Le deuxième chapitre traite le gisement solaire et l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement émis par le soleil avant d'arriver au niveau du capteur et une étude théorique du capteur solaire plan, ses différents composants, ses classifications, son fonctionnement et les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur et les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système.



Dans le troisième chapitre on en trouve: les notions théoriques de base pour la compréhension du phénomène de séchage (les isothermes de sorption et désorption, cinétique de séchage....etc.), les différents types de séchoir solaires actifs et passifs sont énumérés, système d'équations mathématiques régissant le phénomène de séchage au sein de la chambre de séchage est étudié.

Dans le quatrième chapitre: L'approche expérimentale du capteur solaire consiste à l'utilisation des parties renouvelables de palmier dattier (la fibre et le pétiole) pour élaboration des composites à base de ces fibres, afin de les intégrer dans le domaine de l'isolation thermique des capteurs solaires.

Dans le cinquième chapitre: L'approche expérimentale du séchage solaire (types de séchoir, appareillage de mesure, protocole du séchage de la tomate) on a fait une analyse des résultats expérimentaux qu'on a confrontés avec les modèles mathématiques existants. Suite aux paramètres statistiques calculés ( $R^2$  et  $\chi^2$ ) le modèle approprié pour décrire les cinétiques de séchage pour ce type de produit (tranche de tomate mince) dans ces conditions est le modèle de Midilli.

On a terminé notre travail par une conclusion rassemblant l'ensemble des résultats et par l'énoncé de perspectives qui pourraient constituer une suite favorable pour l'optimisation de notre séchoir.

En fin, la partie annexe comprend notamment, les instruments de mesure utilisées dans la parti expérimentale, et les modèles théoriques appropriés pour le processus de séchage.

---

**CHAPITRE I**

**SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET**

**PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX LOCAUX**

---

## I.1. Introduction

Le palmier dattier est l'un des arbres fruitiers le plus anciennement cultivé. La famille des Palmae existe depuis le crétacé supérieur (sénonien) et les phœnix depuis le tertiaire (Eocène) les fossiles rencontrés aussi bien en Amérique du Nord qu'en Europe plaident pour une origine antérieure à la séparation des continents. Le genre Phoenix ne compte des représentants actuels que dans le vieux Monde. Les noyaux de dattes trouvés près des points d'eau de gisements néolithiques semblent confirmer la cueillette. Elle a précédé la domestication qui remonte aux premières civilisations (6000 à 4500 ans avant J.C). Celle-ci est attestée par les représentations picturales et graphiques (Mésopotamie, Egypte, Libye, Tassili...). La pollinisation par l'homme est décrite au 3<sup>ème</sup> siècle avant J.C. par Théophraste [9].

Les documents les plus anciens en Mésopotamie (Irak actuellement) montrent que sa culture se pratique depuis 3500 ans avant J.C. Depuis, elle progressa vers le Nord du pays et gagna la région côtière du plateau Iranien puis la vallée de l'Indus [10]. Depuis l'Egypte, les techniques culturales du dattier gagnèrent la Libye puis se propagèrent d'abord vers les autres pays du Maghreb comme la Tunisie, l'Algérie et le Sud Marocain et arrivèrent ensuite dans l'Adrar Mauritanien. Actuellement la culture du dattier s'étend dans l'Hémisphère Nord préférentiellement dans les régions arides et semi-arides chaudes [11].

Selon la littérature [12-14], il existe environ 100 millions de palmier dattier dans le monde. Les palmes sèches et fraîches sont découpées chaque année. Une estimation annuelle des palmes découpées est évaluée à 1 130 000 tonnes.

En Algérie, le nombre de palmier dattier est plus de 10 millions arbres [9, 11, 12], avec plus de 800 variétés [13], qui représentent 169361 ha produisant 7.8 millions tonnes de palmier dattier et approximativement 25 millions tonnes de biomasse annuellement.

Une moyenne approximative de 210.000 tonnes de pétiole, 73.000 tonnes de feuilles et 52000 tonnes des grappes sont produites en Algérie [15], sans oublier que 30 % des palmiers dattiers algériens ont dépassé l'âge de production [16], qui veut dire 300 milliers d'arbres.

En parallèle cette biomasse n'est pas exploitée efficacement en dehors de quelques produits artisanaux. Après la récolte cette biomasse est brûlée ou bien jetée dans la nature qui a un effet néfaste sur l'environnement.

Le tonnage de la partie consommable des palmes sèches est environ de 135 103 tonnes de palmes sèches / an, les pédicelles de dattes est environ de 5 103 tonnes de pédicelles / an, avec 67500 tonnes de rebuts de dattes [11, 14].

L'objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse bibliographique sur l'isolation thermique et les composites naturelles. La première partie s'intéresse l'isolation thermique, ses avantages et les différents types des matériaux isolants. La deuxième partie est consacré à une revue sur le bois du palmier dattier; la morphologie, les localisations en Algérie et les travaux qui ont été réalisés sur ce matériau.

## I.2. Isolation thermique

L'isolation thermique joue un rôle principal dans la réduction des consommations énergétiques. Une bonne isolation thermique est également plus économique [17]. Selon la littérature [18], l'isolation thermique est une technique ou un moyen matériel (un matériau ou combinaison de matériaux) de limiter les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement entre l'extérieur et l'intérieur.

## I.3. Avantages d'isolation thermique

L'intérêt principal de l'isolation thermique c'est qu'elle permet de réduire la dépendance sur les systèmes (mécanique/ électrique) et, par conséquent, conserve l'énergie et les ressources naturelles associées. Il existe également plusieurs autres avantages de l'utilisation d'isolation thermique qui peuvent être résumées comme suit [18]:

- ✓ **Avantage économique:** Des économies d'énergie importantes peuvent être atteints à l'aide d'utilisation d'isolants thermiques, avec peu de dépenses en capital. Il réduit les coûts d'exploitation de l'énergie.
- ✓ **Avantage environnemental:** L'utilisation d'isolation thermique non seulement réduit les coûts d'exploitation de l'énergie, mais entraîne également des avantages environnementaux comme la valorisation des déchets rejetés qui causent des émissions polluantes.

## I.4. Classification des matériaux isolants

Les matériaux d'isolation peuvent être classés en trois groupes essentiels; à savoir : les matériaux inorganique (isolants minérales), organiques (isolants synthétique, végétales et animales) et les matériaux combinés (comme la laine de bois) [19].

### I.4.1. Matériaux inorganique

#### - Les isolants minéraux

Les isolants minéraux sont fabriqués à partir de matières naturelles inorganiques. Ils regroupent : le verre cellulaire, la laine de verre, la laine de roche (basalte en particulier), la perlite, la vermiculite [20,21].

Elles présentent de bonnes performances thermique, très résistant au feu, ils sont stables et solides, ils sont couramment utilisés dans tous les domaines de construction; et peuvent être

fabriqués sous différentes formes (matelas ou panneaux) [20]. La laine de roche et la laine de verre sont les isolants les plus communément utilisés [21].

#### **I.4.2. Matériaux organiques**

##### **- Les isolants synthétiques**

Les isolants synthétiques sont généralement utilisés pour l'isolation extérieure. Cabeza et al. [22] ont étudiés les propriétés d'isolation des panneaux de polyuréthane, polystyrène, en vue de les utiliser comme isolant extérieur dans le bâtiment. Ils ont montré que ces matériaux présentent des caractéristiques thermiques intéressantes. Néanmoins, il existe plusieurs types des isolants synthétiques; on peut citer le polystyrène, le polyuréthane, les mousses uréformol, les mousses phénoliques, les mousses de polychlorure de vinyle, les polyesters [20, 23].

##### **- Les isolants d'origine végétale**

Les isolants d'origine végétale sont de plus en plus utilisés dans le domaine d'isolation grâce à leurs caractéristiques intéressantes et leurs disponibilités. Parmi les matériaux isolants disponibles et les plus répandues, on trouve: Les laines de bois, laine de coton, laine de lin, laine de coco, cellulose, la paille, le torchis, le liège expansé et le chanvre (laines et bétons de chanvre) [20]. Nous allons décrire quelques isolants, les plus répandus, dans cette partie.

##### **- Liège expansé**

Cette matière est réduite en granules puis expansée à la vapeur à haute température (300°C) en four autoclave, durant cette opération, les granules se dilatent et s'agglomèrent entre elles par l'effet de la résine qu'ils contiennent. L'aggloméré est ensuite découpé selon les épaisseurs souhaitées. Il se présente en granules, en panneaux, ou en éléments composites préfabriqués [20].

##### **- Chanvre**

A la fin des années 80, le chanvre devient un matériau de construction et d'isolation, en France. Un maçon Italien, M. Rasetti, eut l'idée de soumettre les particules issues de la partie centrale de la tige (la chènevotte) qui sont entourées par les fibres longues, a traitement d'imprégnation par les silicates. Il existe en granules de chènevotte, en granules et fibres longues, en fibre longues seules (laines de chanvre) [20].

### **- Cellulose**

La laine de cellulose provient du papier recyclé, obtenu à partir de journaux non utilisés. Le papier est défibré et réduit en flocons, puis stabilisé par incorporation de divers agents de texture, variable selon les fabricants : gypse, sel de bore, sel de Sodium, de Calcium,..., etc.

Elle se présente en panneaux isolants texture ou en panneaux d'agencement. Elle est utilisée comme isolant depuis les années 30 aux Etats-Unis et en Scandinavie (région en Europe) [20, 23].

### **Les isolants d'origine animale**

#### **- Laine de mouton**

Depuis 1990, dans les pays germaniques, la laine de mouton a été conditionnée industriellement pour devenir un matériau homologué du bâtiment. Elle peut être utilisée comme isolant de remplissage à disposer manuellement [20, 23].

#### **I.4.3. Matériaux combinés**

##### **- Laine de bois**

Les panneaux de laine de bois sont élaborés à partir de fibre de bois, le liant étant la lignine de bois. Ce matériau naturel possède une conductivité thermique similaire aux autres laines isolantes, une structure rigide à assemblage rainuré garantissant une très grande longévité [17].

Ils sont utilisés comme isolant ou comme panneaux techniques complémentaires d'isolation [23].

### **I.5. Propriétés et performances d'un matériau isolant**

La conductivité thermique n'est pas la seule propriété à prendre en compte dans le choix d'un isolant. En effet, les propriétés d'un matériau isolant sont subdivisées en deux groupes essentiels [19, 23]:

#### **I.5.1. Propriétés physiques :**

Elles décrivent le comportement du matériau en termes de densité, de la résistance mécanique, de la capacité d'isolation thermique, de l'absorption acoustique, la résistance à l'humidité et au feu, stabilité dimensionnelle, etc.

### **I.5.2. Propriétés de l'hygiène et de la santé :**

Le deuxième groupe s'intéresse à la santé publique durant la production, l'utilisation et l'étape finale de disposition des matériaux (par rapport aux besoins en oxygène, à l'élimination des odeurs, fumées et gaz nocifs divers). Chaque matériau peut avoir des conséquences sur la santé, à titre d'exemple le rejet de poussières ou particules (comme la laine de verre).

### **I.6. Matériaux composites à base de fibres naturelles**

Face aux inquiétudes environnementales mentionnées, dans la section II.1, le choix des matériaux adéquats est une bonne solution pour limiter leur impact sur l'environnement et assurer un milieu intérieur confortable. Pour cela, l'utilisation des matériaux composites à base de fibres végétales (le chanvre, la paille, le lin, le bois, le palmier dattier, etc.) est une bonne réponse dans le souci de préserver la santé de l'homme, de répondre à ses besoins de bien-être et de confort et de réduire les impacts environnementaux [24].

Par ailleurs, l'utilisation des matériaux à base de produits végétaux a les avantages suivants :

- Ce sont des ressources abondantes, renouvelables, recyclables et durables. Les végétaux se renouvellent périodiquement et par conséquent assurent une ressource abondante sachant que les autres ressources (charbon, pétrole, gaz) seront épuisées d'ici quelques décennies.

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.

- Faible énergie grise: L'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et enfin à la démolition du matériau ou à son élimination enfin de sa vie.

### **I.7. Généralité sur le palmier dattier**

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est l'un des arbres fruitiers le plus anciennement cultivé dans le monde [25, 26], il est rustique s'adaptant aux régions les plus arides du monde et constitue la principale source de vie de la population saharienne [27]. Cette espèce se trouve principalement dans la région afro-asiatique [25], est une composante essentielle de l'écosystème oasien; grâce à son adaptation aux conditions climatiques, la haute valeur nutritive de ses fruits et les multiples utilisations de ses produits [28]. Le Phoenix est une



plante dioïque, on en trouve donc deux organismes avec des palmiers mâles et femelles [25, 28].

Beaucoup d'auteurs considèrent le palmier dattier comme source de matières premières pour des applications industrielles [25, 29, 30]. C'est dans cette logique que cette étude s'inscrit.

On distingue dans la littérature cinq parties du bois de palmier, il s'agit de folioles, du rachis, du bois de tronc, de pétioles et de la grappe [25, 31].

### I.7.1. Etude morphologique du palmier dattier

Le palmier dattier appartient à la classe des monocotylédones (une feuille embryonnaire dans la graine). Les monocotylédones ont une organisation différente, ils n'ont pas de cambium (une couche mince située entre le bois et l'écorce), alors que le bois de palmier présentant une structure et des propriétés bien différentes de celle des autres arbres [32].

En effet, Le palmier est une herbe géante de 20 à 30 m de hauteur, au tronc cylindrique (Le stipe), portant une couronne de feuilles, les feuilles sont pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7 m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles [26].

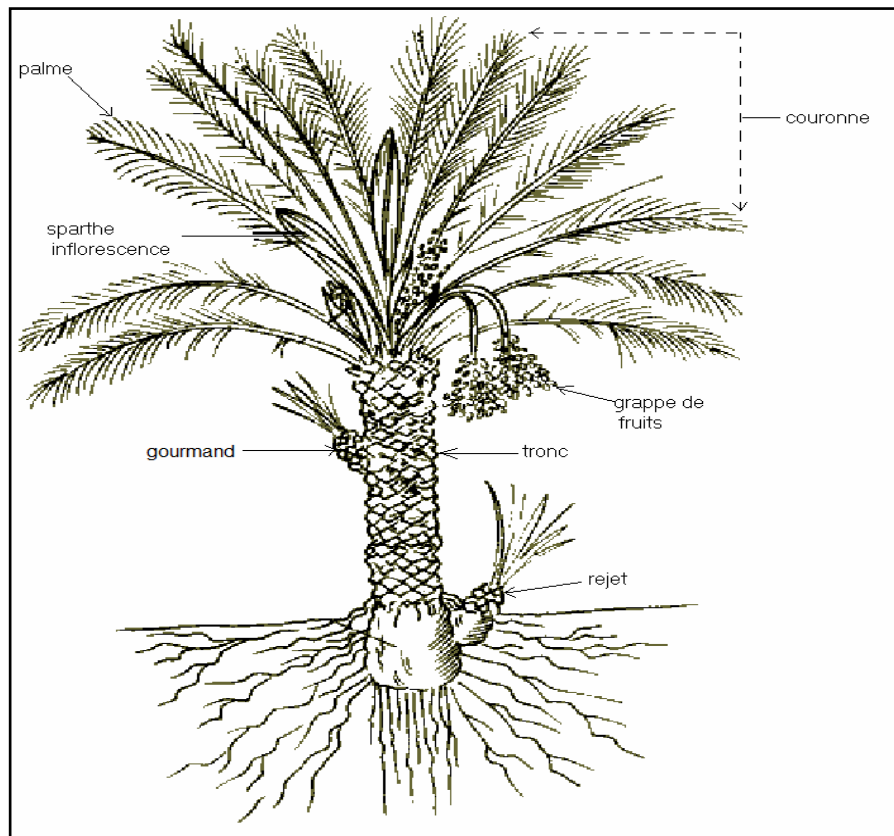


Figure.I.1 : Schéma de palmier dattier

### I.7.1.1. Parties de palmier dattier

Selon la littérature [26], on distingue les parties de palmier dattier suivantes:

- **Le tronc**

Le palmier dattier a un tronc unique colonnaire sans branche appelé stipe. Le stipe se termine par un bourgeon terminal unique produisant des feuilles appelées palmes (frondes), il est généralement cylindrique. L'enveloppe extérieure, l'écorce, n'est qu'une expansion de la base des pétioles des feuilles [33]. Les fibres des pétioles ne forment point un tissu comme dans le bois ordinaire. Ce tissu présente des couches assez semblables à des toiles d'araignées (ils sont placés sans ordre, les uns à côté des autres). Le tronc n'est composé que des fibres pétiolaires superposées les unes sur les autres de l'intérieur à l'extérieur [34]. Ceci explique pourquoi le bois est plus dur à l'extérieur qu'à l'intérieur [35].

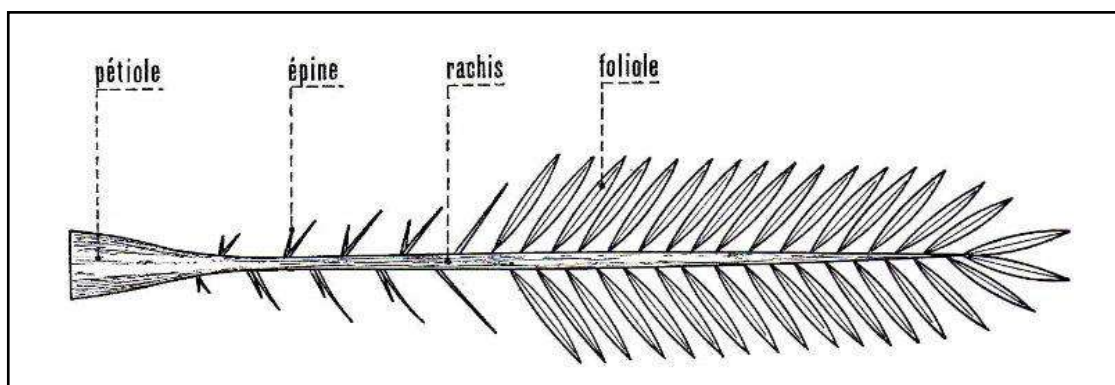
- **La couronne**

On appelle la couronne, l'ensemble des palmes vertes. Le nombre des palmes chez un palmier dattier adulte peut atteindre de 50 à 200 palmes. Elles sont émises par le bourgeon terminal ou « phyllophore ».

- **Palme**

La palme ou « Djérid » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide [36].

Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeon et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement [36, 37].



**Figure.I.2:** Schéma d'une palme de palmier dattier.

### I.7.1.2. Fibres de palmier dattier

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant quatre types de fibre [29]:

- ◆ Fibres de bois de tronc.
- ◆ Fibres de feuilles au niveau des pédoncules.
- ◆ Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe).
- ◆ Fibres de surface autour de son tronc ou de bases de palmes (pétiole).
- ◆ Fibres de liffe (entre les kornaf, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le liffe).

## I.8. Estimation du tonnage du palmier dattier et de leurs sous-produits

### I.8.1. Variétés de palmier dattier en Algérie

On distingue dans la littérature plusieurs variétés de palmier dattier; les variétés les plus connues sont: Deglet Nour, El Ghers, Mech Degla, Degla Baida [25, 26, 5]. Les autres variétés sont présentées dans le Tableau I.1.

La région de Tolga à Biskra se présente comme l'une des plus importantes régions phoenicicoles en Algérie. Elle est connue mondialement, notamment par la variété Deglette Nour [38].

**Tableau I.1:** Différentes variétés de palmier dattier en Algérie.

Variétés	Nombre de palmiers	Localisation
El Ghers	2.500.000	Oued Righ, Zibens, Oued Souf, Ouargla, M'zab, El Golia, Biskra (Tolga)
Deglet Nour	1.500.000	Oued Righ, Zibens, Oued Souf, Ouargla, M'zab, El Golia, Biskra (Tolga)
Mech Degla	1.500.000	Oued Righ, Zibens, Oued Souf, Biskra (Tolga, )
Tilemson	500.000	Touat, El Boléa, Gourara, Tidikelt
Tin-Nacer	400.000	Touat, El Golia, Tidikelt
Degla Beida	300.000	Oued Righ, Zibens, Oued Souf
Tazerzait	100.000	M'zab, Tidikelt, Saoura.
Tegaza	70.000	Tidikelt, Touat, El Golia, Hoggar
Temjouhart	50.000	El golia, Gourara, M'zab
Takerboucht	42.000	Tidikelt, Touat
Tafezouine	35.000	M'zab, Oued Souf, Oued Righ
Tanteboucht	10.000	Oued Righ, Ouargla, Tidikelt
Timedouel	8.000	M'zab, El Golia

### I.8.2. Sous-produits de palmier dattier et leurs applications

En plus de sa production de dattes pour l'alimentation humaine, le palmier dattier offre une large gamme de sous produits exploités par la production saharienne, à savoir [27, 39]:

Le vinaigre, l'alcool et les levures, par fermentation microbiologiques des dates communes;

- ◆ Farine de dattes utilisées dans la panification;
- ◆ Jus de dattes, par extraction, utilisé comme sucrerie;
- ◆ Tronc d'arbre, utilisé dans l'ébénisterie traditionnelle, bois de chauffage et charpentes de bâtiments;
- ◆ Palmes sèches, utilisées comme clôtures, brises vent, dans la confection de couffins, de chapeau; etc., ils peuvent même servir en industrie de papier;
- ◆ Les régimes de dattes, comme balais traditionnels, et comme combustibles;
- ◆ Le liffe pour la confection des semelles de sandals;
- ◆ Le lacmi, boisson très recherchée par la population locale, représentant la sève qui s'écoule du stipe.

#### I.8.2.1. Sous – produits de palmier

##### - Les palmes

Palmes sèches, utilisées comme clôtures, élément décoratif, brises vent, dans la confection de couffins (Figure I.3); de chapeau (Figure I.5); les plats et plateaux ( Figure I.4); ils peuvent même servir en industrie de papier [40].



Figure I.3 : Couffins et cordage



Figure I.4 : Plats et plateaux



Figure I.5 : Chapeaux

### - Les bases de rachis

Les bases de rachis étaient largement utilisées en toiture de maisons (Figure I.6). Ils sont alors placés en travers des stipes l'une en face de l'autre. Ils étaient, dans le passé, très utilisés comme combustible pour les foyers (Figure I.7) [40].



**Figure I.6 :** Utilisation du stipe de palmier et de kernef dans la toiture d'une maison.



**Figure I.7 :** Combustible de rachis.

### - Les stipes du palmier

- Le stipe de palmier, utilisé dans l'ébénisterie traditionnelle, fabrication des portes, bois de chauffage et charpentes des maisons; les poutres. Ils sont réputés comme étant solides et résistants.

- Les stipes de palmiers fournissent un matériau de construction solide ou utilisés dans la construction de bateaux de pêche dans certains pays.

- Les stipes sont également utilisés à d'autres fins comme pour fabriquer des enclos pour les animaux [40].

## I.9. Synthèse des travaux réalisés sur le bois de palmier

Djoudi et al. [41] qui ont étudié l'utilisation d'un nouveau matériau composite de construction de plâtre, sable, gravier concassé et les fibres de palmier dattier, Les résultats montrent également une diminution de la conductivité thermique et la densité, ainsi qu'un changement et de comportement mécanique du matériau.

Chikhi et al. [42] ont étudié un nouveau matériau composite à base de gypse et de fibres de palmier dattier (FPD), afin de l'utiliser pour l'isolation thermique dans le bâtiment. Ils ont étudié expérimentalement l'effet des fibres de palmier dattier sur la conductivité thermique, l'absorption de l'eau et les propriétés mécaniques des matériaux à base de gypse. Les résultats

montrent que la conductivité thermique des composites diminue avec l'augmentation de la concentration de FPD. Les résistances de compression et de flexion des biocomposites peuvent être améliorées en ajoutant la teneur en fibres Adéquat. Ce nouveau genre de biocomposites montre les bonnes performances thermiques et mécaniques qui lui permettent d'être appliqué en tant que matériau d'isolation thermique.

Ahmad Alawar et al. [43] déterminent les propriétés mécaniques, de fibres de surface du tronc de palmier dattier, avant et après le traitement chimique avec différentes concentrations de NaOH. L'amélioration de la résistance à la traction du palmier dattier a été observée lorsque le traitement chimique a été appliqué. La résistance maximale a été observée à la valeur de 1% NaOH, puis il y a une diminution de résistance lorsque la concentration de NaOH augmente.

Agoudjil et al.[31] ont étudié les propriétés thermodynamiques, chimiques et diélectriques de trois variétés de bois de palmier dattier des oasis de Biskra en Algérie, afin d'utiliser ce matériau naturel dans l'isolation thermique des bâtiments. Une détermination simultanée de la conductivité thermique et le coefficient de diffusion a été déterminé et a montré que le palmier dattier est un bon isolant thermique pour le développement de matériaux isolants efficaces.

KARECHE Abdelhak [44] ce travail est de fournir une réflexion à la fois très appliquée mais aussi fondamentale sur les procédés de l'isolation thermique dans le but d'améliorer les conditions de confort dans les bâtiments. Cette étude est consacrée à (i) la conception et le développement de nouveaux composites à base du palmier dattier et du mortier, (ii) l'étude de la microstructure des matériaux élaborés, (iii) l'étude de la durabilité et de la dégradation du bois de palmier utilisé. Il a été démontré dans ce travail que les composites à base de bois de palmier dattier est un bon candidat pour être utilisé comme isolant thermique dans le bâtiment. Par ailleurs, les expositions prolongées des composites biosourcés à des ambiances hygrothermiques conduisent inévitablement à la dégradation des fibres végétales.

Nadia BENMANSOUR [45] ce travail consiste à contribuer à la valorisation des ressources naturelles et locales, tels que le bois de palmier dattier et le mortier, afin de les intégrer dans le domaine de l'isolation thermique des bâtiments.

Ce mémoire porte donc sur l'étude expérimentale des propriétés thermophysiques et mécaniques du mortier chargé du bois de palmier dattier en vue de l'utiliser dans les applications de l'isolation thermique des bâtiments.

Trois types de fibres de palmier dattier ont été utilisés, ce qui permettra de mettre en évidence l'effet de la taille des fibres. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de fibres de palmier dattier réduit la conductivité thermique et la résistance à la compression des matériaux composites, tout en réduisant le poids. En outre, la conductivité thermique des composites est fortement affectée par l'absorption de l'eau. L'influence de la concentration des FPD sur les propriétés mécaniques et thermiques du composite est plus significative que la taille des fibres. En effet, pour un pourcentage de fibres inférieur à 15%, les composites satisfont aux exigences thermiques et mécaniques des matériaux de construction et ils pourraient être utilisés comme nouveaux matériaux biocomposites pour l'efficacité énergétique dans les bâtiments.

## I.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'étude bibliographique sur l'isolation thermique et nous avons présenté une description de palmier dattier, défini leurs différentes parties. D'après les travaux qui ont été réalisés sur le bois de palmier dattier, on conclut points:

L'Algérie est riche en matière fibreuse, chaque année après la récolte, cette matière est soit jeté ou brûlée ce qui a une influence sur l'écosystème et l'environnement, il n'y a uniquement qu'un faible pourcentage qui est exploité par la production artisanale.

En Algérie, l'implantation du palmier dattier est en pleine croissance et constitue l'un des secteurs économiques les plus importants en Algérie. La valorisation des déchets agricoles est de ce fait un enjeu majeur. De plus, la possibilité d'utiliser ces déchets pour la fabrication de panneaux de particules contribuerait dans une certaine mesure à limiter les importations de bois.

Le choix des matériaux naturels pour l'isolation thermique est justifié par plusieurs critères physiques, environnementaux, ...etc. Par ailleurs, l'étude bibliographique présentée dans ce chapitre montre que les caractéristiques thermophysiques et mécaniques intrinsèques des constituants du composite étudié dans ce travail, représentent des propriétés adéquates pour application comme isolant thermique.

En effet, le palmier dattier avec ses différentes variétés est plus abondant dans plusieurs régions en Algérie et provenant d'une source renouvelable ce qui permet de la mise en œuvre dans plusieurs domaines.



---

**CHAPITRE II**

**ETUDE THÉORIQUE DE GISEMENT SOLAIRE**

**ET DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN**

---

## II.1. Introduction

L'utilisation des énergies renouvelables suscite de plus en plus un intérêt certain dans le monde. La diminution des réserves mondiales en pétrole et en gaz, les problèmes environnementaux ont amené beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables et propres, telles que l'énergie solaire. Cette énergie est l'une des plus facilement exploitables.

Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité (nous y reviendrons), sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

On s'est vite aperçu que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergie conventionnelles et nombre d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir prévu un budget pour la maintenance des équipements.

Toutefois, sans être totalement gratuite, l'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduits et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront) mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement: pas de rejets polluants (fumées contenant du CO<sub>2</sub> par les centrales thermiques), pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires).

La production de l'énergie thermique à partir de l'énergie solaire est aujourd'hui une des techniques les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux [46].

La plus grande part de recherche est consacrée au développement des capteurs solaires du point de vue performance thermique en général tenant en compte de tout les paramètres qui influent sur leur comportements, nous entendons ici les paramètres de conception (géométriques, thermo-physiques et optiques).

Dans ce chapitre, nous consacrerons à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire. En suite nous procéderons à l'étude théorique d'un capteur solaire plan à air, ses différents composants, ses classifications, son fonctionnement et les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur.

## II.2. L'astre solaire :

Il est utile d'effectuer un bref aperçu sur l'astre solaire qui est à l'origine de toute vie sur terre. La machine soleil est considérée comme étant une grande centrale nucléaire fournissant de l'énergie et gardant ses déchets (centrale nucléaire idéale). Cette machine nous délivre une énergie propre (non polluante), gratuite, disponible, silencieuse, et elle ne tombe jamais en panne. On ne fournit aucun effort pour produire cette énergie mais on conçoit seulement des appareils pour la capter.

### II.2.1. Paramètres physiques de l'astre solaire :

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphère dont le rayon est égale à 695980 km soit 109 fois le rayon de la terre. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 km de la terre. Le diamètre angulaire du soleil, vu par un observateur terrestre a pour valeur moyenne 32' soit 0,5° environ. Le soleil est formé d'une masse gazeuse de 1.9891 1030 kg composée des éléments essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium. Hydrogène, ces composantes sont dans des proportions respectives de 80%, 19%. Sa densité est de 1,41 celle de la terre est égale a 5,5 [47]. Le soleil est le siège de réactions de fusions nucléaires.

## II.3. Le rayonnement solaire :

La connaissance du rayonnement solaire dans tous ses aspects est nécessaire dans toute application de l'énergie solaire. Ce rayonnement est perturbés à la traversée de l'atmosphère (absorption, réflexion, réfraction), chose qu'on doit prendre en considération, ainsi que la répartition spectrale en fonction de la longueur d'onde car les récepteurs d'énergie sont généralement sélectifs et fonctionnent dans une bande de fréquence appropriée. Pour cela on a vu utile de définir ci-dessous quelques notions essentielles pour le rayonnement solaire.

### II.3.1 Spectre solaire :

Le rayonnement solaire est constitué par un flux de particule appelé photons émise par le soleil et se déplaçant à la vitesse de  $3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ . Ces photons composants le rayonnement électromagnétique sont porteur d'une énergie d'après la loi de Louis de Broglie  $E=h.v= h. c / \lambda$  où:

h: Est la constante de Plank.

v: Est la fréquence.

c: Est la vitesse de la lumière.

$\lambda$ : Longueur d'onde.

Le spectre du rayonnement solaire c'est sa décomposition en longueur d'onde ou "couleurs".

La lumière solaire est composée de toute sorte de rayonnement de couleur différente, Caractérisées par leur gamme de longueur d'onde qui s'étend en hors atmosphère pratiquement de 0.1  $\mu\text{m}$  à 0.4  $\mu\text{m}$ , répartie comme suit:

Zone spectrale de 0.1  $\mu\text{m}$  à 0.38  $\mu\text{m}$  rayonnement ultra-violet;

de 0.38  $\mu\text{m}$  a 0.78  $\mu\text{m}$  " visible;

de 0.78  $\mu\text{m}$  a 2.78  $\mu\text{m}$  " infra-rouge.

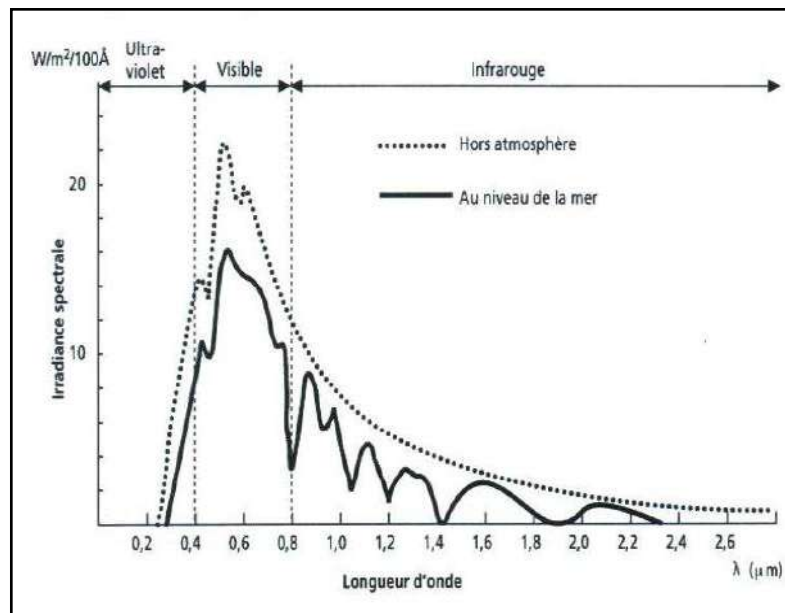


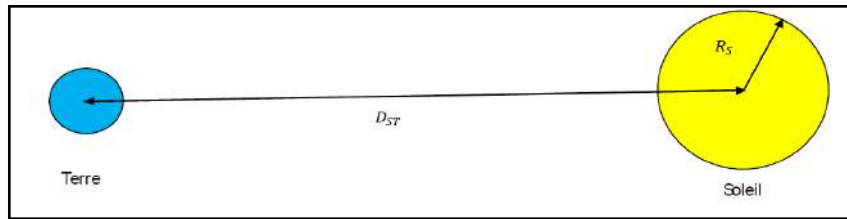
Figure II.1 : Le spectre solaire.

### II.3.2. Constante solaire :

La constante solaire représente le flux du rayonnement solaire reçu par une surface unitaire disposée perpendiculairement aux rayons solaires.

Supposons que toute l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre (absence de l'atmosphère) on aura alors [48]:

$$\text{Constante solaire} = S_0 = \sigma T_s^4 \left( \frac{R_s}{D_{sT}} \right)^2 \quad (\text{II.1})$$



$R_S$ : Rayon du soleil (m)

$D_{ST}$ : Distance terre-soleil (m)

$\sigma$ : La constante de Stéphane-Boltzmann  $=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$T$ : Température à la surface du soleil (K).

### II.3.3. L'Albédo :

L'albédo d'une surface c'est le rapport de la puissance réémise à la puissance reçue du rayonnement solaire. Une surface blanche est caractérisée par un albédo voisin de 1 tandis qu'une surface noire son albédo est très faible et avoisine le zéro. L'albédo du sol intervient souvent; il varie avec sa nature, son couvert végétal et son état d'humidité. Pour un même sol l'albédo varie selon qu'il est nu ou couvert de verdure sec ou saturé d'humidité.

## II.4. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

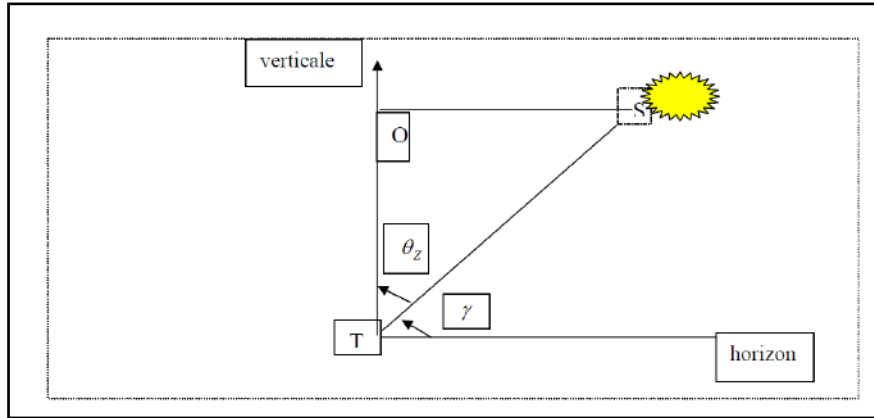
Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dus principalement aux phénomènes d'absorption et/ou de diffusion causée par les aérosols (poussière de diverses origines), ainsi que par les molécules d'eau et les différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...etc.) présents dans la couche atmosphérique enveloppante. Ces modifications apportées au rayonnement dépendent de plusieurs facteurs variables avec le lieu et le temps (composition de l'atmosphère, épaisseur...). La référence spectrale pour un éclaircissement donné est obtenue en regroupant ces facteurs en un seul paramètre représentant l'épaisseur de l'atmosphère traversée.

L'atmosphère est constituée des couches suivantes :

1. Une couche inférieure (la stratosphère) allant de 10 à 15 km.
2. Une couche intermédiaire (la mésosphère) entre 15 à 100 km.
3. Une couche supérieure (l'ionosphère) allant de 100 à 800 km.

### II.4.1. Air-masse

Pour traduire l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire (Figure II.2), on introduit la notion de l'air masse définie, en supposant que la pression au milieu est d'environ (1atm) par :



**Figure II.2 :** Masse atmosphérique ou air masse

$$\text{Air mass} = \frac{\overline{TS}}{\overline{TO}} = \frac{\text{trajet du rayon solaire}}{\text{épaisseur de l'atmosphère}}$$

On appelle "masse d'air"  $m$  ou air mass en anglais, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, par rapport à une traversée verticale.

La longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère est [47] :

$$TS = \frac{TO}{\sin \gamma}, \text{ d'ou } m = \frac{1}{\sin \gamma} = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

$\gamma$ : Hauteur du soleil.

$\theta_z$ : Angle du zénith.

## II.5. Interaction des rayonnements électromagnétiques avec l'atmosphère:

Le rayonnement solaire avant d'atteindre le sol traverse les différentes couches atmosphériques où il subit le phénomène de diffusion et d'absorption [8].

### II.5.1. Phénomène de diffusion :

La diffusion est, en fait, la résultante des phénomènes de réflexion, réfraction et de diffraction par les particules et les gaz existant dans l'atmosphère. La diffusion varie d'un lieu à un autre, d'une saison à une autre. Le niveau de diffusion est corolé à la longueur d'onde du

rayonnement solaire, de l'épaisseur des couches atmosphériques traversées, ainsi que de la densité des particules et des molécules existantes dans ces couches [8].

### II.5.2. Phénomène d'absorption :

L'ozone, dont la teneur est prépondérante vers l'altitude de 25 km, absorbe les rayonnements ultraviolets qui sont néfastes à la santé des êtres vivants. La vapeur d'eau existante en grande proportion dans la troposphère absorbe les infra rouges. Le bioxyde de carbone est un gaz à effet de serre qui absorbe beaucoup de rayonnement dans la portion infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère [8].

### II.6. Interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière:

Les capteurs thermiques (séchoir, chauffe-eau, etc.) sont plus sensibles aux rayonnements infra rouges, de plus, lorsque l'énergie solaire incidente ( $\varphi_i$ ) atteint le capteur (Figure II.3), la surface peut absorber l'énergie ( $\varphi_a$ ), réfléchir ( $\varphi_r$ ) ou transmettre l'énergie incidente ( $\varphi_t$ ) de telle façon que [8]:

$$\varphi_i = \varphi_a + \varphi_r + \varphi_t \quad (\text{II. 2})$$

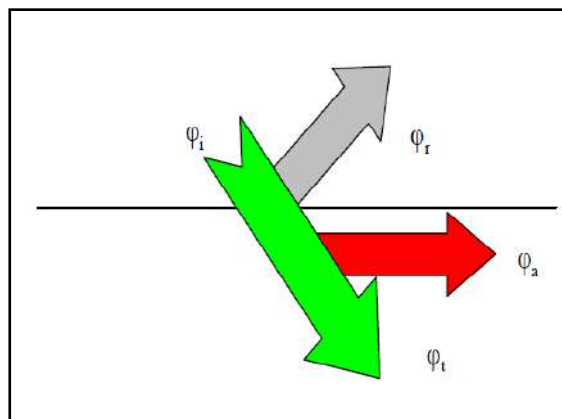


Figure II.3 : Phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission

### II.7. Composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire arrivant au niveau de notre capteur est la somme de deux rayonnements : rayonnement direct (I) provenant directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère et rayonnement diffus (D) qui est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère et provenant des différents obstacles (nuages, aérosols, végétation, terre.....etc.) et n'ayant pas une direction privilégiée. La somme du rayonnement direct (I) et du rayonnement diffus (D) constitue le rayonnement global (G) [8].

$$G = I + D \quad (\text{II. 3})$$

## II.8. Eclairement ou densité de puissance :

Les éclairements s'expriment en  $\text{W.m}^{-2}$ . La constante solaire qui représente l'éclairement moyen du rayonnement solaire hors atmosphère est voisine de  $1370 \text{ W.m}^{-2}$ .

L'éclairement global moyen au niveau de notre capteur à air incliné à la latitude d'Ouargla avoisine les  $950 \text{ W.m}^{-2}$ [8].

## II.9. Irradiation ou densité d'énergie :

Représente l'énergie correspondante à l'éclairement sur une durée déterminée, elle s'exprime en  $\text{Wh m}^{-2}$  ou en  $\text{J. m}^{-2}$ [8].

## II.10. Le capteur solaire plan

Le capteur plan à air est les éléments chargés de capter l'énergie solaire en la transformant en énergie thermique. Il joue aussi le rôle d'échangeur en cédant cette énergie captée au fluide colporteur (air) qui les traverse. Les usages sont multiples; à savoir; le chauffage des locaux, le séchage, ....etc. Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la Figure II.4 [49].

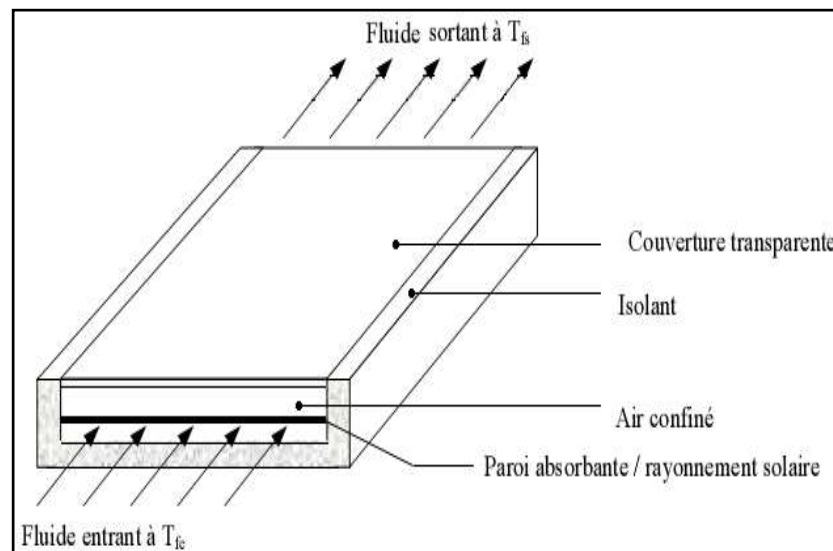


Figure II .4: Composants d'un capteur solaire plan

### II.10.1. Principe de Fonctionnement :



Le principe de fonctionnement est dit de l'effet de serre. Les rayons du soleil (d'une longueur d'onde visible,  $\sim 0.5 \mu\text{m}$ ) traversent la couverture transparente supérieure, en verre ou en plastique, puis frappent l'absorbeur. Celui-ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe. En effet, tout corps chaud émet des rayonnements aux températures usuelles, celui-ci se trouve dans le domaine de l'infrarouge. A cette longueur d'onde, le verre est parfaitement opaque et réfléchit donc tout cet infrarouge. La chaleur reste ainsi prisonnière du capteur [50,51].

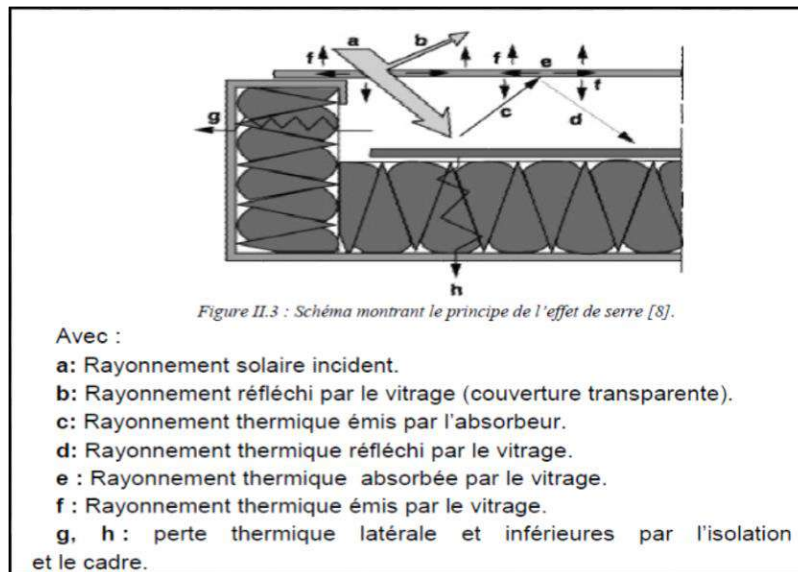


Figure II.5 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.

## II.10.2. Constituants d'un capteur solaire plan

Le capteur plan est une boîte constituée de trois parties principales [ 52 ]:

### II.10.2.1. Partie avant

C'est la couverture transparente constituée du verre ou du plastique et qui peut être simple, doublée ou triplée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles :

- 1- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- 2- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- 3- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

### **II.10.2.2. Partie absorbante**

C'est au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique, et qui doit assurer les fonctions suivantes :

- 1- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.
- 2- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- 3- N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie.

### **II.10.2.3. Partie arrière**

Elle est généralement constituée d'une couche isolante, qui diminue les pertes par convection et ralentit ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Le choix du matériau à utiliser dépend de :

- 1- Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- 2- La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- 3- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie....etc.

## **II.10.3. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire**

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la forme, des dimensions, de la disposition du capteur et des conditions environnantes. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

### **II.10.3.1. Les paramètres internes**

#### **a. La vitre**

La plus part des capteurs solaires couverts utilisés sont à couverture simple, à double ou triple. S.Youcef-Ali (2005) [53] a montré dans une étude expérimentale que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers l'extérieur. Turhan. Koyuncu (2006) [54], a aussi étudié expérimentalement l'influence du nombre de couvertures et il a trouvé que ce facteur influence fortement sur l'efficacité du capteur. Le verre est tout à fait intéressant comme couverture pour les dispositifs solaires, puisque il absorbe presque tout le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ayant pour résultats une amélioration de l'efficacité thermique du capteur. Mais son utilisation possède aussi des inconvénients qui sont, son coût élevé et sa fragilité

pendant le transport et en service, c'est la raison pour laquelle, pendant plusieurs années des couvertures en plastique transparent ont été appliquées largement pour construire des capteurs solaires de coût modéré et rigides. Dans ce cadre, Donation Njomo (1998) [55] a souligné d'après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente (ici la couverture extérieure est en pléxiglace et celle intérieure est en verre) a des performances meilleures qu'un capteur a deux vitres de même matière.

### **b. L'absorbeur**

L'augmentation de la surface du capteur accroît le taux du rayonnement solaire intercepté et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (augmentation de la surface d'échange), mais aussi elle augmente le coefficient des pertes thermiques entre la couverture et l'extérieur (Ho-Mig Yeh et Tong-Tshien Lin (1995)) [56].

De ce fait, des chercheurs ont proposé d'augmenter le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (sans toucher les dimensions du capteur) par l'ajout des obstacles (ailettes) jointes à la face inférieure de l'absorbeur (N. Moumami et al (2004) [57], A. Abene et al. (2004) [58], A. Ucar et M. Inalli (2006) [59], Hikmet Esen (2008) [60], Ho-Ming yeh et Chii-Dong Ho (2009)) [61], selon ces auteurs, les obstacles peuvent augmenter la surface d'échange, réduire les zones mortes et créer la turbulence.

### **c. La circulation du fluide caloporteur**

Selon M. N. Bargach et al. (2004) [62], C. D. Ho et al. (2005) [63], l'augmentation de la circulation du fluide caloporteur augmente la puissance du capteur solaire.

De même M. Augustus Leon et S. Kumar (2007) [64] ont montré que le débit d'air a l'effet le plus fort sur l'efficacité d'échanges thermiques et par conséquent sur le rendement.

D'après le travail expérimental et numérique de Marwa. M. Hassan et Yvan Beliveau (2007) [65], la diminution du débit massique augmente la température du fluide et décroît les gains globaux de la chaleur, au dessus d'un débit de  $0.06 \text{ m}^3/\text{h}$ , la température du fluide n'augmente plus.

La façon de passage de l'air a une influence considérable sur l'efficacité du capteur solaire. Plusieurs travaux ont été faits dans le but de vérifier la faisabilité d'augmenter le nombre de passage de l'air d'une seule passe à un double passes et même a multi passes (K. Sopian et al. (1999) [66], K Sopian et al. (2009) [67], Ho. C. D et al. (2009)) [68].

La réutilisation (recyclage) de l'air accroît la vitesse du fluide ce qui peut améliorer l'efficacité du capteur plus de 80% comme a été souligné par H. M. Yeh et C. D. Ho (2008) [69] qui ont montré théoriquement et expérimentalement que l'élévation du débit de l'air recyclé augmente l'efficacité, et la dissipation d'énergie se produit aussi.

#### **d. L'isolant**

Limiter les pertes de transmission vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur.

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation des capteurs, les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et les mousses polyuréthanes. Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.

- Un bon isolant doit les qualités suivantes :
- Une faible conductivité thermique.
- Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- La chaleur massique doit être basse.
- Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de service.

#### **e. L'orientation et l'inclinaison du capteur**

L'influence de l'orientation d'un capteur et de son inclinaison avec l'horizontal est due au fait que ces deux dernières changent le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur. La meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud (Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli (2007)) [70].

L'angle optimum d'inclinaison est appliqué à une variété de systèmes, tels que, les capteurs plans ou paraboliques, les panneaux photovoltaïques, maisons solaires et serres installées dans une position fixe. Cet angle joue un rôle important en augmentant la collection d'énergie par les capteurs solaires.

### **II.10.3.2. Paramètres externes**

#### **a. Obstacles**

Il s'agit avant tout des constructions et de la végétation, leur position dans la trajectoire solaire peut créer sur les surfaces captatrices une ombre nuisible au bon fonctionnement de l'installation (Charles (1981)) [71].

#### **b. Rayonnement solaire**

Selon F. Moukhtari et D. Semmar (1999) [72], l'efficacité du capteur solaire est influencée considérablement par le rayonnement solaire, et l'élévation de la température varie presque linéairement avec le rayonnement solaire incident (Suleyman Karsil (2007)) [73].

#### **c. Température**

La température de l'environnement influence fortement sur le fonctionnement du capteur solaire. Runsheng Tang et al (2008) [74] ont montré dans une étude expérimentale que les capteurs peuvent être endommagés par le gel pendant la nuit couverte.

#### **d. Vitesse du vent**

La vitesse du vent apparaît dans le coefficient de convection entre la vitre et l'extérieur qui agit sur la valeur des pertes, c'est pourquoi la connaissance des données météorologiques est importante. Lorsque le coefficient de transfert thermique dû au vent est à son maximum (pour une longueur de 1m d'absorbeur noir installé horizontalement) la réduction maximum de l'efficacité s'avère au plus bas niveau comme souligné par Rajendra Karwa et al. (2007) [75].

## **II.11. Analyse thermique de capteur solaire plan à air**

Le rôle d'un capteur solaire thermique 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,.....).

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur.

Dans ce qui suit on regroupera les équations mathématiques gouvernant le fonctionnement du capteur à air après le bilan thermique de celle-ci [76-78].

### II.11.1. Bilan thermique global de la paroi absorbante :

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit:

$$\varphi_{sa} = \varphi_p + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (\text{II. 4})$$

Où :

$\varphi_{sa}$  : Flux solaire absorbé.

$\varphi_p$  : Flux perdu par la paroi absorbante.

$\varphi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur.

$\varphi_{st}$ : Flux stocké dans le capteur.

Ce bilan se résume ainsi: le flux absorber  $\varphi_{sa}$  reçu par le capteur solaire est exprimé par la somme de l'énergie utile  $\varphi_u$  emportée par le fluide caloporteur, des déperditions thermiques  $\varphi_p$  par les différents modes de transferts vers le milieu ambiant et de l'énergie stockée  $\varphi_{st}$  dans les différents éléments constituant le capteur solaire.

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties du capteur solaire est négligeable, ce qui conduit à:

$$\varphi_{sa} = \varphi_p + \varphi_u \quad (\text{II. 5})$$

Le principe de modélisation consiste à écrire les bilans énergétiques de chaque élément constituant le capteur; absorbeur, vitre, isolant et fluide caloporteur. Avant d'aborder les calculs il est nécessaire de considérer certaines hypothèses:

- Les propriétés physiques et thermiques du fluide caloporteur (air) sont données en fonction de sa température moyenne.
- L'absorbeur étant en métal (acier, cuivre ou aluminium) de faible épaisseur avec une conductivité très élevée.
- Les deux faces de la vitre sont à la même température.
- La température ambiante est la même autour du capteur.

- La température dans le fluide et dans l'absorbeur ne dépend que de la dimension longitudinale (sens de l'écoulement).

### II.11.2. Méthode par tranche

Cette méthode est aussi dite, la méthode de modélisation " pas à pas " la méthode consiste à découper l'isolateur en tranches fictive de longueur dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à écrire les bilans dans chaque tranche. Il est commode pour cela d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert d'électricité.

Les différentes échanges thermiques qui ont lieu , correspond au capteur solaire, en appliquant le bilan énergétique sur chaque composant (Figure II.6), on obtient les équations suivantes :

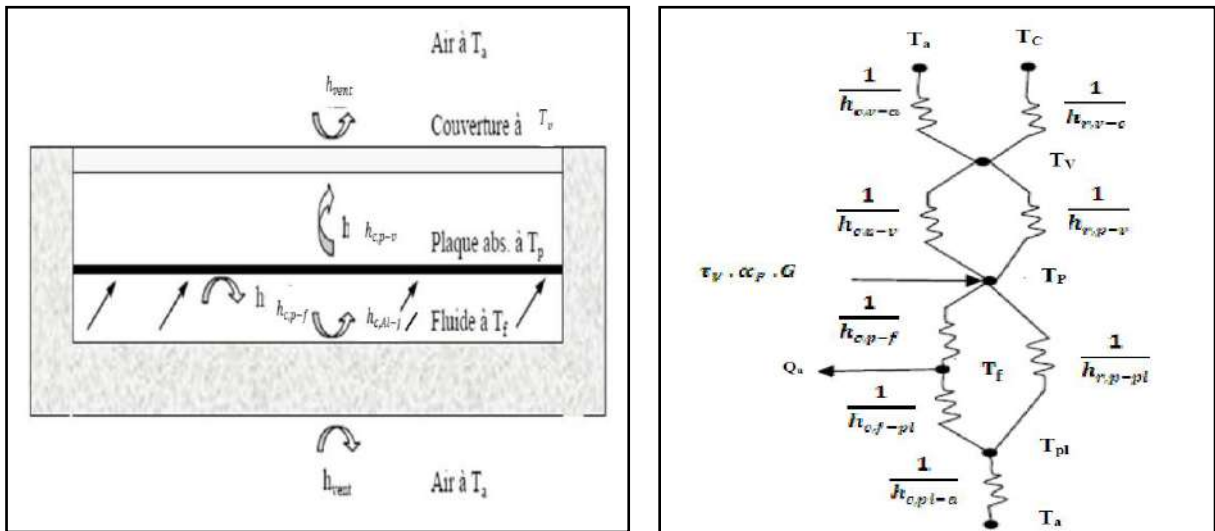


Figure II.6 : Schéma électrique relatif à une section du capteur.

#### II.11.2.1. Bilan thermique de la vitre (indice, v)

$$h_{r,p-v}(T_p - T_v) + h_{c,p-v}(T_p - T_v) = U_{av1} \cdot (T_v - T_a) \quad (II. 6)$$

#### II.11.2.2. Bilan thermique de l'absorbeur (indice, p)

$$(\tau_v \alpha_p) I_g = h_{c,p-f}(T_p - T_f) + h_{c,p-v}(T_p - T_v) + h_{r,p-Al}(T_p - T_{Al}) + h_{r,p-v}(T_p - T_v) \quad (II. 7)$$

#### II.11.2.3. Bilan thermique du fluide caloporteur (indice, f)

$$h_{c,p-f} \cdot (T_p - T_f) = h_{c,f-Al} \cdot (T_f - T_{Al}) + Q_u \quad (II. 8)$$

**II.11.2.4. Dans la plaque inférieure en Aluminium (côté de l'isolant, indice, Al)**

$$h_{c,Al-f} \cdot (T_f - T_{Al}) + h_{r,p-Al} \cdot (T_p - T_{Al}) = U_{ar} \cdot (T_{Al} - T_a) \quad (\text{II. 9})$$

Avec :

$T_a$ : Température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_v$ : Température de la vitre ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_p$ : Température d'absorbeur ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_f$ : Température du fluide caloporteur, air ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_{Al}$ : Température de la plaque d'aluminium près de l'isolant (plan inférieur de l'écoulement De veine d'air mobile) ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$U_{av}$ : Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$U_{ar}$ : Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$h_{r,p-v}$  : Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$h_{c,p-v}$ : Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$h_{c,p-f}$  : Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$h_{r,p-Al}$  : Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$h_{c,p-Al}$  : Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

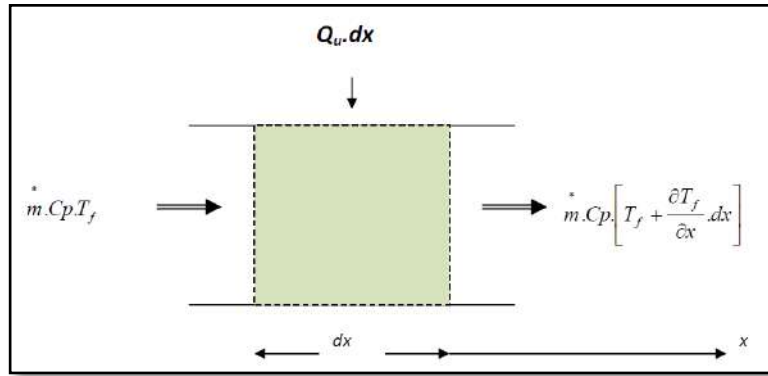
$I_g$ : Flux solaire global reçu par le capteur plan.

$\tau_v$ : Coefficient de transmission des couvertures transparentes.

$\alpha_p$ : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

Pour étudier la distribution de la température suivant la direction de l'écoulement de l'air, on considère la tranche  $dx$  voir Figure II.7, La température de l'air est supposée uniforme au niveau de la section de la veine d'air mobile du capteur.





**Figure II.7 :** Echanges thermiques dans une tranche fictive  $dx$ .

La conservation de l'énergie dans cette tranche nous donne, sachant que  $l_c$  est la largeur du capteur :

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot T_f + Q_u \cdot l_c \cdot dx = \dot{m} C_p \cdot \left( T_f + \frac{dT_f}{dx} dx \right) \quad (\text{II. 10})$$

Après simplification, on obtient :

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{Q_u \cdot l_c}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (\text{II. 11})$$

On suppose que la température du fluide  $T_f$  est uniforme tout le long de la veine fluide du capteur de longueur  $L$ . Par conséquent l'intégration de équation (II-7), on obtient :

$$T_f(x) = \left[ \frac{Q_u \cdot l_c}{\dot{m} C_p} \right] \cdot x + T_{fe} \quad (\text{II. 12})$$

D'où,

$$T_{fs} = \left[ \frac{Q_u \cdot l_c}{\dot{m} C_p} \right] \cdot L + T_{fe} \quad (\text{II. 13})$$

Où,  $T_{fe}$  est la température d'entrée du fluide dans le capteur,  $T_{fs}$  est sa température à la sortie.

D'autre part, nous supposons aussi que la température du fluide varie linéairement tout le long du capteur, la valeur moyenne de la température est égale donc à la moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie.

$$T_f = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} \quad (\text{II.14})$$

Des deux dernières équations, on déduit :

$$Q_u = \frac{2\dot{m}C_p(T_f - T_{fe})}{A} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Où, } A = Ll_c$$

$$(h_{r,p-v} + h_{c,p-v} + U_{av1})T_v - (h_{r,p-v} + h_{c,p-v})T_p = U_{av1} \cdot T_a \quad (\text{II.16})$$

$$(h_{c,p-v} + h_{r,p-v})T_v + (h_{c,p-f} + h_{c,p-v} + h_{r,p-Al})T_p + h_{c,p-f}T_f + h_{r,p-Al}T_{Al} = \tau_v \cdot \alpha_p \cdot I_g \quad (\text{II.17})$$

$$h_{c,p-f} \cdot T_p - \left( h_{c,p-f} + h_{c,f-Al} + \frac{2\dot{m}C_p}{A} \right) T_f + h_{c,f-Al}T_{Al} = \frac{2\dot{m}C_p}{A} T_{fe} \quad (\text{II.18})$$

$$h_{r,p-Al}T_p + h_{c,Al-f}T_f - (h_{c,Al-f} + h_{r,p-Al} + U_{ar})T_{Al} = -U_{ar}T_a \quad (\text{II.19})$$

Ce système d'équation peut être mis sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} T_v a_{11} + T_p a_{12} + T_f a_{13} + T_{Al} a_{14} = b_1 \\ T_v a_{21} + T_p a_{22} + T_f a_{23} + T_{Al} a_{24} = b_2 \\ T_v a_{31} + T_p a_{32} + T_f a_{33} + T_{Al} a_{34} = b_3 \\ T_v a_{41} + T_p a_{42} + T_f a_{43} + T_{Al} a_{44} = b_4 \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_v \\ T_p \\ T_f \\ T_{Al} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

Les températures peuvent être déterminées par:  $[T] = [A]^{-1} \cdot [B]$  en connaissant les valeurs des coefficients d'échanges thermiques ainsi que les pertes à l'avant et à l'arrière, les valeurs des coefficients des pertes globales par l'avant du capteur  $U_{av1}$  et par l'arrière  $U_{ar}$  définis par les expressions:

$$U_{av1} = h_{c,v-a} + h_{r,v-c} \quad , \quad h_{r,v-a} = h_{r,v-c} \quad \text{et} \quad U_{ar} = \frac{1}{\left[ \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{vent}} \right]} \quad , \quad h_{vent} = h_{c,v-a} \quad (\text{II.20})$$

$e_{is}$ : Épaisseur de l'isolant placé à l'arrière du capteur (m)

### II.11.3. Méthode globale

Les méthodes globales traitent l'insolateur dans son ensemble, en utilisant les valeurs moyennes de résolution. La méthode développée par Hottel, Whillier et Bliss (Duffie et Beckman, 1980) se caractérise par sa simplicité et a donné des résultats satisfaisants. Elle est basée sur les hypothèses suivantes:

- Le régime est permanent.
- Chacun des éléments de l'insolateur se trouve à une température moyenne et l'absorbeur joue un rôle important dans le bilan thermique.
- L'écoulement est unidimensionnel.
- La conduction dans le fluide est négligée.

La puissance utile apportée par l'air sortant de l'insolateur s'écrit [79] :

$$P_u = A_c (\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{pm} - T_{ab}) \quad (\text{II.21})$$

Où  $I_t$  est le rayonnement global incident et  $U_L$  le coefficient global de perte thermique entre l'absorbeur et l'air extérieur. Si le transfert était idéal, on aurait  $T_{fm} = T_{pm}$ , et on pourrait écrire :

$$\dot{P}_u = A_c (\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{fm} - T_{ab}) \quad (\text{II.22})$$

En fait la condition  $T_{fm} = T_{pm}$  n'est jamais satisfaite. On est donc amené à définir un coefficient d'efficacité local de transfert air-absorbeur :

$$F' = \frac{(\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{pm} - T_{ab})}{(\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{fm} - T_{ab})} \quad (\text{II.23})$$

Soit:

$$Pu = A_c \dot{F}' [(\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{fm} - T_{ab})] \quad (\text{II.24})$$

On utilisera cette expression dans la suite de l'étude car elle est une fonction de  $T_{fm}$  qui est une donnée du problème, alors que  $T_{pm}$  est une inconnue.

Il est pratique d'exprimer cette puissance utile en termes de conditions d'entrée en définissant un autre coefficient global de transfert air-absorbeur par:

$$F_R = \frac{(\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{pm} - T_{ab})}{(\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{fe} - T_{ab})} \quad (\text{II.25})$$

D'où :

$$P_u = A_c F_R [(\tau \cdot \alpha) I_t - U_L (T_{fe} - T_{ab})] \quad (\text{II.26})$$

Comme le coefficient  $F_R$  tient compte de  $F'$  et que la température du fluide  $T_{fm}$  est toujours supérieure à  $T_{fe}$ ,  $F_R$  est inférieur à  $F'$  et varie tout au long du conduit. À l'aide d'une intégration dans le sens de la longueur de l'insolateur on aboutit à la relation suivante [80] :

$$F_R = \frac{\dot{m}C_{pa}}{A_c U_L} [1 - \exp(-\dot{F} U_L A_c / \dot{m} C_{pa})] \quad (\text{II.27})$$

## II.12. Rendement instantané du capteur solaire

L'analyse faite dans ce domaine par Hottel, Willier, Wortz et Bliss permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport de l'énergie utile à l'énergie solaire incidente et s'exprime par [81] :

$$\eta_h = \frac{P_u}{A_c I_t} \quad (\text{II.28})$$

## II.13. Conclusion

Dans cette partie, on a présenté un récapitulatif de quelques notions de bases relatives au gisement solaire, qui nous permis par la suite d'exploiter l'énergie solaire.

Fait que l'énergie solaire est disponible en abondance à Ouargla, avec un nombre d'heures moyennes d'ensoleillement annuel entre 3200 et 3600 (Marif. Y, 2015) [82], elle devient très intéressante dans plusieurs domaines en apportant des solutions réellement économiques et écologiques.

L'utilisation de l'énergie solaire thermique redevient d'actualité grâce à son formidable impact sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et à des installations performantes.

Ainsi pour les installations collectives, la mise en œuvre de la garantie de résultats solaires est une donnée incontournable.

Pour exploiter ou stocker cette énergie solaire il faut la convertir en une autre forme d'énergie, pour cela on utilise les capteurs solaires.

On retiendra que lorsque deux corps sont à des températures différentes, il y a transfert thermique d'énergie du plus chaud vers le plus froid. On distingue trois modes de transfert thermique chacun régi par des lois bien spécifiques : la conduction, la convection et le rayonnement.

Dans cette partie nous avons conclu que les études théoriques du capteur solaire a air et perforé est ancien, et nous avons présentés quelle que travaux effectué sur la théorie de transfert de chaleur et les paramètres important qui influes sur les performances thermique du capteur.

---

## **CHAPITRE III**

### **NOTION GENERALE SUR LE SECHAGE**

---

### III.1. Introduction

Par définition, le séchage est l'opération qui permet l'enlèvement d'une plus ou moins grande partie d'un solvant présent dans un matériau; ce solvant est généralement de l'eau [83,84]. Le séchage permet de traiter certains problèmes d'environnement, comme c'est le cas par exemple du séchage des déchets. Il permet aussi d'envisager certaines solutions concernant la conservation des denrées et leur stockage [85].

Le séchage par le biais du chauffage électrique est préférable à celui qui consiste à faire circuler les gaz chauds, issus de la combustion d'énergie fossile, directement sur les produits. Cette dernière technique, qui persiste encore lorsque le séchage requiert des quantités importantes d'énergie, apporte souvent un produit chargé de pollution par les carburants, vapeurs et suie non brûlée. Ceci étant, le séchage électrique est un procédé très onéreux et non utilisable dans les secteurs ruraux des pays en voie de développement. Le séchage par le biais de l'énergie solaire est une alternative raisonnable, en particulier dans les pays en voie de développement dont le degré d'ensoleillement est élevé tout au long de l'année [86,87].

Pour comprendre cette problématique, il est indispensable de commencer par faire un bilan des connaissances sur le séchage, définir le terme 'milieux poreux' et les phénomènes intervenants lors du séchage de ces matériaux. Ceci fera l'objet de la première et la deuxième partie de ce chapitre. Une synthèse sur description et formulation mathématique du séchage, et quelques exemples de modèles de séchage en couche mince seront présentés dans la troisième partie de ce chapitre.

## III.2. Les milieux 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, la partie solide encore appelée matrice se présente sous deux formes:

- **Non consolidée:** La matrice solide est alors formée de grains ou fibres non soudés entre eux (graviers, sable, ...).
- **Consolidée :** Dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en grains ou fibres (roche, tissus végétaux et animaux.).

Dans les conditions naturelles, le volume poreux est généralement occupé par une phase gazeuse (mélange air + vapeur d'eau) et de l'eau liquide [88].

### III.2.1. Répartition de l'eau dans les milieux poreux

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états: eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau [89].

- L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire.
- L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle est 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.

### III.2.1. Propriétés du milieu poreux

#### III.2.1.1. La porosité

La porosité totale est le rapport entre le volume des vides et le volume total du milieu poreux [90]:

$$\varepsilon = \text{Volume des vides} / \text{volume total}$$

Une partie de l'eau contenue dans le milieu poreux est liée à celui-ci. Elle ne peut pas circuler. D'un point de vue hydrodynamique, elle peut être considérée comme une partie du



solide. Cela nous conduit à définir une porosité cinématique ou porosité efficace,  $\varepsilon_c$ , liée à la circulation des fluides donc la porosité efficace est le rapport du volume d'eau mobile, par opposition à l'eau liée à la matrice par des forces d'attraction moléculaire, qu'un milieu poreux peut contenir à son volume total [90].

$$\varepsilon_c = \text{volume d'eau mobile} / \text{volume total}$$

### III.2.1.2. La perméabilité

La perméabilité intrinsèque  $k$  [ $L^2$ ] est une propriété intrinsèque du milieu poreux, indépendamment des caractéristiques du fluide. Il caractérise l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de charge, elle est donnée par [90]:

$$K = \frac{\varphi \cdot \mu}{S(\Delta p / \Delta x)} \quad (\text{III.1})$$

Avec:

$\varphi$  : Débit du fluide [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ].

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide [ $M L^{-1} T^{-1}$ ].

$S$ : L'aire de la section traversée par le fluide [ $L^2$ ].

$\Delta P / \Delta x$  : La variation de la charge par l'unité de longueur [ $ML^{-2}T^{-2}$ ].

Le coefficient de perméabilité  $K$  [ $L/T$ ] (ou la conductivité hydraulique) est le paramètre reliant la vitesse d'écoulement au gradient hydraulique dans la loi de Darcy. Elle dépend de la perméabilité intrinsèque  $k$  mais aussi de la viscosité dynamique  $\mu$  [ $M L^{-1} T^{-1}$ ] et de la masse volumique du fluide  $\rho$  [ $M L^{-3}$ ] qui circule :

$$K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

## III.3. Caractéristiques des solides humides :

### III.3.1. Humidité absolue

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 [90].

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{III.2})$$

### III.3.2. Humidité relative

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 [90].

$$\varphi = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{III.3})$$

### III.4. Activité de l'eau dans les aliments :

L'activité de l'eau  $A_w$  est une grandeur classique, utilisée pour évaluer la capacité avec laquelle un produit dans une atmosphère donnée se dégrade d'un point de vue biologique. Elle correspond au rapport entre la pression de la vapeur d'eau de l'aliment (pression de la vapeur d'eau à la surface du produit) et la pression de la vapeur d'eau pure à la même température  $T_0$ .

$$A_w = \frac{\text{pression partielle de l'eau dans l'aliment à } T_0}{\text{pression partielle de l'eau pure à } T_0}$$

L'activité de l'eau dans un produit représente aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit (lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre eux).

La valeur de l'activité de l'eau varie entre 0 (produit sec au point que toute l'eau est liée à l'aliment, et donc sans qualité réactive) et 1 (eau pure et sans soluté, difficile à atteindre et surtout à maintenir). La valeur optimale pour la conservation des produits biologiques, sans additif ni réfrigération, correspond à une activité de l'eau située entre 0.25 et 0.35; la croissance des bactéries est généralement limitée lorsque l'activité de l'eau descend en dessous de 0.90 de même les moisissures et les levures sont inhibées respectivement vers une activité de 0.70 et 0.80 [91,92].

### III.5. Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz

Considérons un solide mouillé, d'humidité  $X$ , soumis à l'action d'un courant gazeux constant, renfermant sous forme vapeur, une certaine quantité du liquide associé au solide.

Sous pression constante, et à une température déterminée, le mélange gazeux est caractérisé par son humidité relative  $\varphi$  qui est le quotient de la pression partielle  $P_v$  de la vapeur dans le mélange à la même température  $T$  par la pression de saturation  $P_s$ .

Si la tension de vapeur  $P_m$  (pression de vapeur à la surface mouillée) du liquide associé au solide est différente de  $P_v$  il s'établit entre deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque  $P_v = P_m$ .

\* Si  $P_v > P_m$  ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide et correspond à un phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à un mouillage du solide.

\* Si  $P_v < P_m$  le transfert de matière s'effectue du solide vers les phases gazeuse et correspond à une désorption, c'est-à-dire à un séchage du solide.

\* Lorsque  $P_v = P_m$  l'état d'équilibre est atteint et il n'y a pas de transfert de matière pour une température donnée, la pression restant constante, à chaque valeur de l'humidité relative  $\phi$  de l'atmosphère correspondant une valeur de l'humidité à l'équilibre  $X_{eq}$  du solide, et on peut construire une isotherme d'équilibre, relative au solide considéré (Figure III.1).

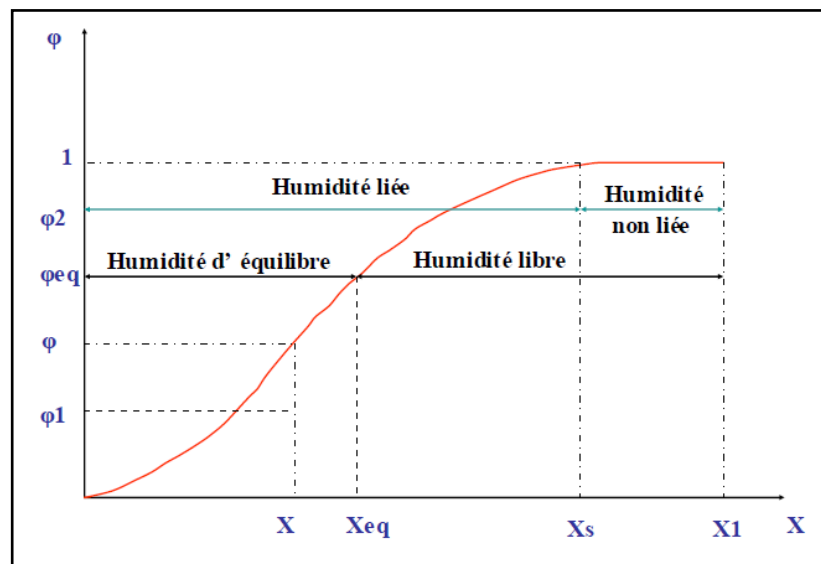


Figure III.1: Isotherme d'équilibre

On voit sur la Figure II.1, que l'humidité  $X$  d'un solide ne peut être en équilibre qu'avec une atmosphère dont l'humidité relative est  $\phi_{eq}$ . Si l'humidité relative de l'atmosphère est :

- 1-  $\phi_1 < \phi_{eq}$  il y'a désorption c'est-à-dire séchage du solide.
- 2-  $\phi_2 > \phi_{eq}$  il y'a adsorption c'est-à-dire mouillage.

Soit  $X_s$  l'humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère saturée en humidité ( $\phi=1$ ).

Si un solide d'humidité  $X_1 > X_{eq}$  est soumis à un courant gazeux constant, d'humidité relative, il perd son humidité jusqu'à ce que celle-ci devienne égale à  $X_{eq}$  qui est l'humidité à

l'équilibre du solide correspondant à  $\varphi_{eq}$ . Un séjour, même prolongé dans cette atmosphère ne diminue pas son humidité au dessous de  $X_{eq}$ . La différence  $(X_1 - X_{eq})$  représente l'humidité libre qui seule peut être évaporée.

Lorsque l'humidité d'un solide est inférieure à  $X_s$ , elle exerce une pression de vapeur inférieure à celle du liquide pur à la même température ; elle est appelée humidité liée au solide, elle consiste au liquide contenu dans les capillaires fins ou en solution retenu dans les parois cellulaires du solide, ou adsorbé à la surface du solide.

Si au contraire, l'humidité du solide est supérieure à  $X_s$ , elle est appelée humidité non liée : la tension de vapeur qu'elle exerce est celle du liquide pur à la température où l'on opère. Cette humidité peut se lire sur le diagramme, elle est égale à  $(X_1 - X_s)$  [8].

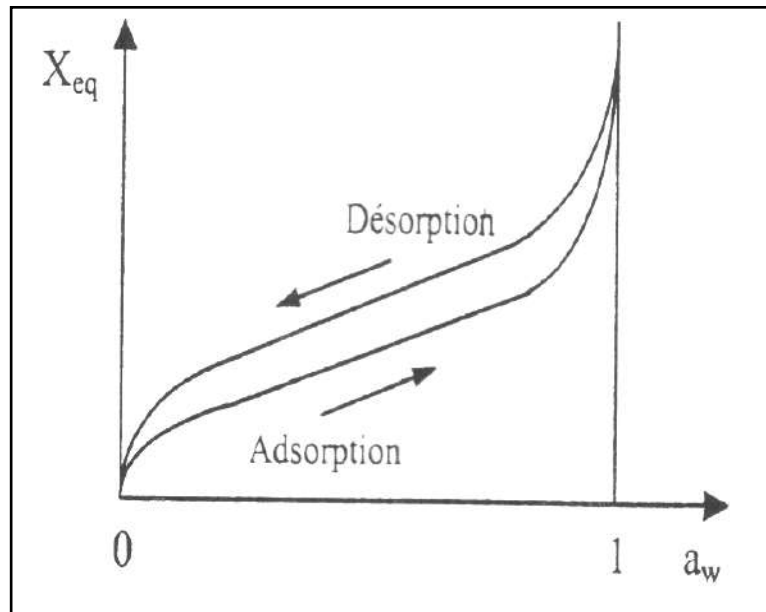
### **III.6. Isotherme d'adsorption et de désorption :**

Dans chaque opération de séchage, il y a un équilibre d'humidité air-produit que nous devons prendre en compte. Cet équilibre où plus exactement la valeur de l'humidité d'équilibre est déterminée pratiquement par les isothermes de sorption du produit.

L'isotherme de sorption est habituellement décrite par une courbe, qui illustre l'évolution de la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  d'un produit en fonction de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative de l'air qui l'entoure  $H_r$  pour une température  $T$  [93, 94]. Cette courbe fournit donc des informations valables au sujet de l'équilibre hygroscopique du produit.

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit. Elle permet de calculer la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau  $X$  du produit à la fin du séchage. La détermination de cette courbe consiste à placer un échantillon du produit dans une atmosphère à humidité relative connue jusqu'à l'équilibre (masse de l'échantillon inchangée) à ce moment on relève la valeur de l'humidité absolue d'équilibre du produit, ce qui représente un point de la courbe. La méthode utilisée est la méthode des sels saturés qui consiste à suspendre un échantillon du produit dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante. Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentration différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme. Cette méthode est très longue : l'équilibre air/produit n'est parfois

atteint qu'après plusieurs semaines, elle ne convient donc pas à la détermination des points de l'isotherme correspondants aux valeurs élevées de  $H_r$  pour des produits biologiques qui subiraient des dégradations dues aux moisissures avant que l'équilibre ne soit atteint. La cinétique peut toutefois être accélérée de manière importante en créant un vide dans les récipients ce qui peut alors étendre le champ d'application de la méthode en réduisant la durée de la mesure [91].



**Figure III.2:** Isotherme d'adsorption et de désorption

Les isothermes d'adsorptions/désorption se composent de trois zones, chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit.

\* Zone 1 ( $a_w < 0.3$ ) : correspond à l'eau "fortement liée" dite aussi eau de constitution. L'eau est intimement liée aux composantes biochimiques par des liaisons covalentes; cette eau n'est pratiquement pas disponible comme solvant ou réactif et correspond à la première couche (monocouche) qui entoure la matière sèche d'aliment.

\* Zone 2 ( $0.3 < a_w < 0.7$ ): correspond à l'eau "faiblement liée", sous forme de couche polymoléculaire (multicouche) recouvrant partiellement la surface du substrat sec.

\* Zone 3 ( $a_w > 0.7$ ): correspond à l'eau "libre" ou eau "liquide" qui n'est retenue à la surface du substrat sec que par des liaisons hydrogènes. Cette eau est disponible tant comme solvant que réactif. C'est uniquement sous cette forme que l'eau est utilisée par les micro-organismes et peut permettre les réactions enzymatiques.

**III.6.1. Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption :**

De nombreux modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques ont été proposés pour décrire le comportement des courbes de sorption/désorption déterminées expérimentalement. Toutefois deux modèles sont plus particulièrement utilisés par les chercheurs: le modèle de BET (Brunauer-Emmet-Teller) particulièrement intéressant pour l'étude de la partie des courbes relative aux faibles teneurs en eau et le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) qui lui représente les courbes de sorption/désorption jusqu'à une activité de 0,80 à 0,85 [91].

**Tableau III.1:** Modèles des courbes de sorption, désorption.

Auteurs	Equation du modèle	Références
Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T)	$X_{eq} = (A + BT)(C a_w)/(1 - a_w)(1 - a_w + C \cdot a_w)$	Iglesias & Cherifie [95]
Oswin	$X_{eq} = (A + BT)(a_w/1 - a_w)^c$	Oswin [96]
Halsey	$X_{eq} = \exp[-\exp(A + BT)/X_{eq}^C]$	Iglesias & Cherifie [95]
Henderson	$1 - a_w = \exp[-K \cdot (T + n) \cdot X_{eq}^C]$	Thompson [97]
Chung-Pfost	$a_w = \exp[(-A/(T + B))\exp(-CX_{eq})]$	Pfost [98]
Langmuir	$X_{eq} = 1/[A + B \cdot a_w^{C-1}]$	Langmuir [99]
Peleg	$X_{eq} = A \cdot a_w^{K1} + B \cdot a_w^{K2}$	Peleg [100]
Guggenheim-Anderson-de Boer (G.A.B)	$X_{eq} = A \cdot B \cdot C \cdot a_w/[1 - B \cdot a_w][1 - B \cdot a_w + B \cdot C \cdot a_w]$	Van den Berg [101]

**III.7. Cinétique du séchage**

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau (kg d'eau/m<sup>2</sup>.s) en fonction du temps. Ces courbes sont

généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération de séchage en fonction du temps. Les courbes de cinétique de séchage varient suivant le produit à sécher et contiennent de une à trois principales périodes de la cinétique de séchage, tout dépend du produit, Figure III.3.

On obtient la courbe de séchage expérimentale en suivant la variation de l'humidité absolue du produit par des pesées successives au cours du séchage jusqu'à atteindre l'humidité absolue d'équilibre du produit. Pour chaque produit il existe une valeur d'humidité optimale d'équilibre pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses propriétés organo-leptiques et nutritionnelles [91]. On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de  $\varphi_{eq} = 13\%$  [102].

### III.7.1. Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide

L'expérience permettant de caractériser la cinétique de séchage consiste à soumettre une couche mince d'un produit à l'action d'un courant d'air de température, humidité et vitesse fixées et de mesurer la masse du produit en fonction du temps.

Dans la courbe ci-dessus est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps. Souvent on construit aussi la courbe de la vitesse de séchage en fonction de l'humidité restant dans la matière au cours du séchage. Dans la Figure (III.3) on distingue trois périodes :

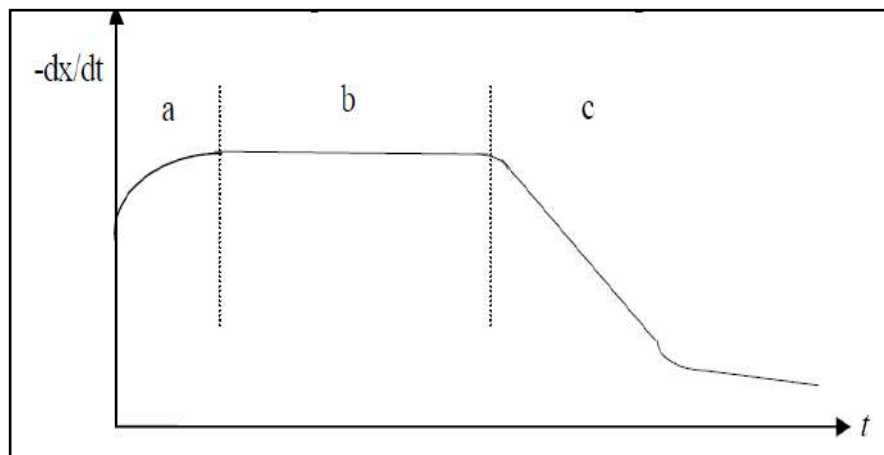


Figure III.3: Périodes du séchage.

### III.7.1.1. Période de mise en température (région a)

Quand un produit d'une température de surface  $T_s$  et d'une pression partielle de vapeur d'eau  $P_s$  est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage jusqu'à atteindre la température du bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global.

### III.7.1.2. Période à allure constante (région b)

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation du liquide superficiel. Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et compenser l'évaporation. Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le produit est entièrement utilisé pour l'évaporation de l'eau. Cette période est identique au séchage isenthalpe d'un film d'eau et dépend donc essentiellement des conditions aérauliques entourant le produit à sécher. Lorsque l'humidité superficielle du solide n'est pas renouvelée à une allure suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse cesse d'être constante. Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit [91].

### III.7.1.3. Période de ralentissement (région c)

Au cours de cette période la surface du produit n'est plus saturée en vapeur d'eau et le transfert de masse est contrôlé par les mécanismes complexes du déplacement de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit [103]. Cette période représente souvent le quasi totalité du séchage. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

\* **Disparition de l'eau libre en surface de produit:** La zone d'évaporation "front de séchage" qui se trouvait en surface se déplace vers l'intérieur du produit. En amont de cette zone, il y a migration de l'eau libre, tandis qu'en aval c'est l'eau liée et la vapeur d'eau qui sont évacués.



La brusque réduction de la surface effective de transfert due à une alimentation insuffisante en eau libre est la cause de ce ralentissement.

\* **L'épaisseur du produit:** si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.

\* **La diffusivité de l'eau dans le produit :** elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

\* **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes:** Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

\* **Le croutage:** Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

### III.8. Classification des systèmes de séchage à énergie solaire

Les systèmes de séchage à énergie solaire sont classés principalement selon leurs modes de chauffage et la façon en la quels la chaleur solaire est utilisée. De façon générale, ils peuvent être classés dans deux groupes principaux, à savoir [104-106] :

- ✓ Systèmes de séchage à énergie solaire actifs (dont la plupart des types se nomment souvent les dessiccateurs solaires hybrides);
- ✓ Systèmes de séchage à énergie solaire passifs.

Trois classes secondaires distinctes des systèmes de séchage solaires actifs ou passifs peuvent être identifiées (qui changent principalement dans l'arrangement de conception des composants de système et le mode de l'utilisation de la chaleur solaire), à savoir :

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

### **III.8.1. Séchoir solaire passif ou à convection naturelle :**

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance à monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher. L'écoulement de l'air asséchant ici se fait par effet de cheminée. L'énergie solaire seule en assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de toute sorte de distribution d'énergie. L'un des inconvénients de ce type de séchoir c'est le risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes [104-106].

### **III.8.2. Séchoir solaire actif ou à convection forcée :**

Le fluide asséchant est forcé par un ventilateur, ce qui permet une augmentation du pouvoir évaporateur du séchoir. Généralement la convection forcée l'emporte largement sur la convection naturelle qui ne permet pas encore, étant donné l'état des recherches en cette matière, de contrôler le déroulement du séchage.

Cette classe de séchoir solaire permet un meilleur contrôle de l'opération de séchage et une bonne amélioration du temps de séchage par rapport au séchoir passif, car l'air asséchant est évacuée en vitesse et d'une façon continue. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité conventionnelle ou photovoltaïque pour faire fonctionner le ventilateur [104-106].

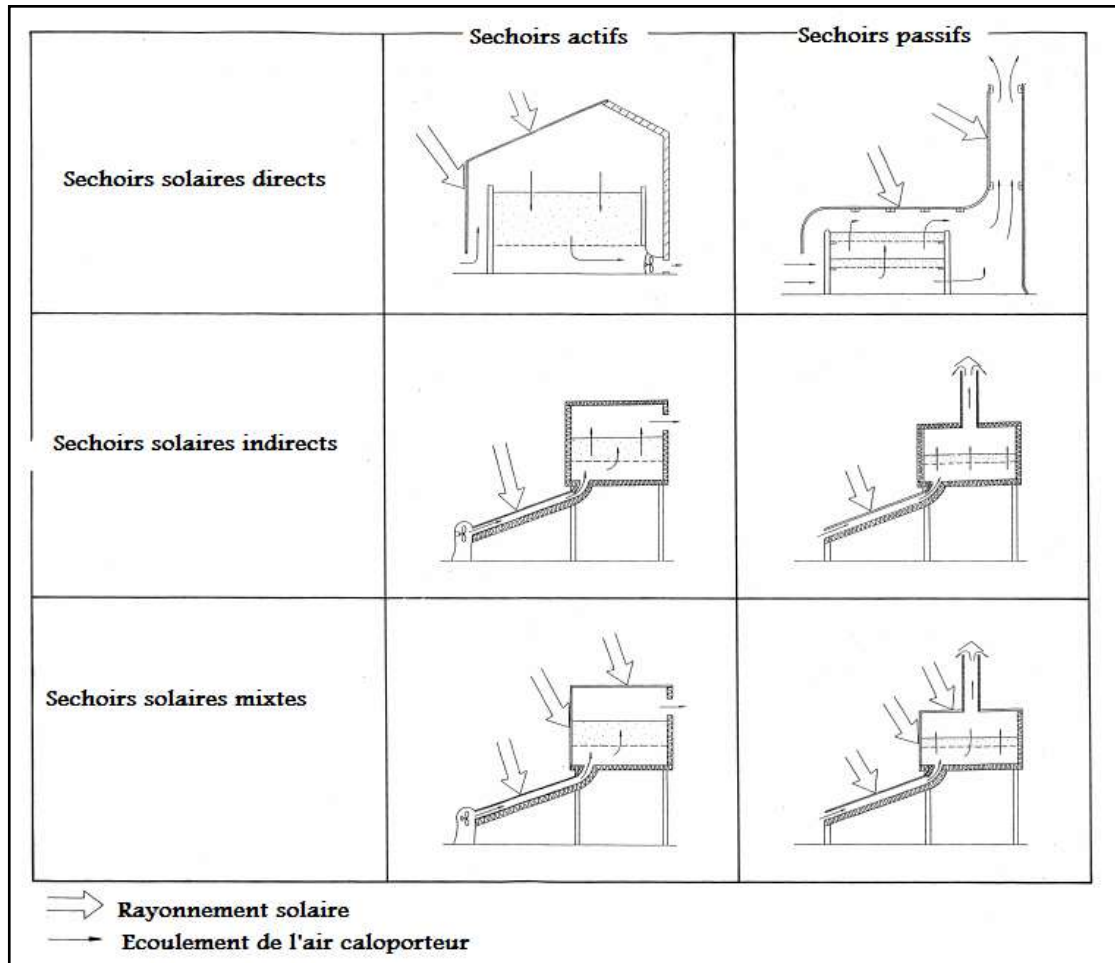


Figure III.4: Différents types de séchoirs solaires.

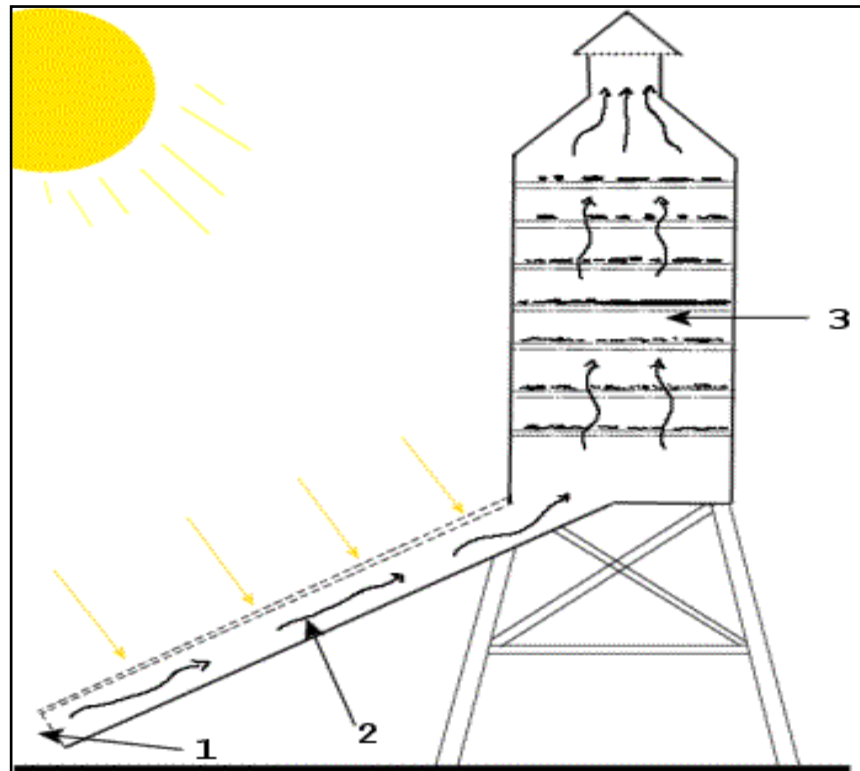
### III.8.3. Séchoir solaire direct :

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l'interaction directe rayonnement solaire – produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments [107,7].

### III.8.4. Séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire indirect (Figure. III.5) se compose essentiellement de deux parties: en amont un insolateur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur où l'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de dessiccation contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert

de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. Ce dernier sort vers l'extérieur de la chambre de dessiccation par le biais d'une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits. Ces systèmes possédant des insolateurs plans en amont sont plus performants et plus répandus que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive.....etc) [108]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires.



1. Entrée d'air
2. L'air asséchant
3. Claie

**Figure III.5 :** Séchoir solaire indirect.

### **III.8.5. Les séchoirs solaires mixtes**

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage. La Figure (III.6) montre un type de séchoir solaire mixte.

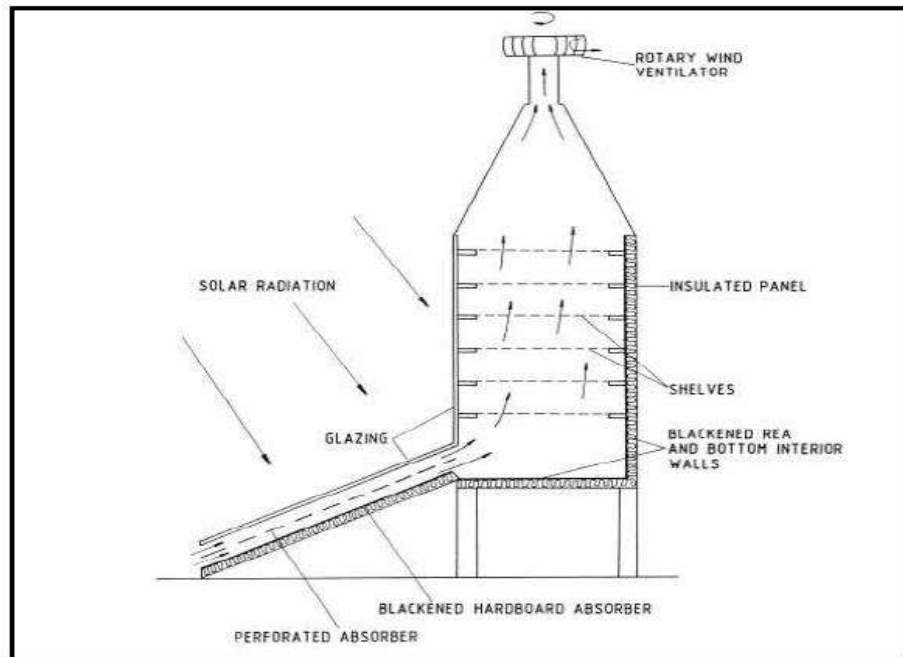


Figure III.6 : Séchoir solaire mixte à circulation forcé.

### III.8.6. Séchoirs solaires hybrides

Dans ce type de séchoir hybride (Figure.III.7) on utilise une des sources d'énergies auxiliaires (électrique, gaz, fuel, bois, biomasse.....) pour parer aux aléas climatiques et ajuster la température de l'air asséchant à la température fixe de consigne moyennant des thermorégulateurs. Les séchoirs solaires hybrides sont plus performants que les séchoirs solaires passifs, car ils peuvent fonctionner par temps couvert ou pendant la nuit. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité, gaz, pièce de rechange et demande un personnel qualifié pour la maintenance.

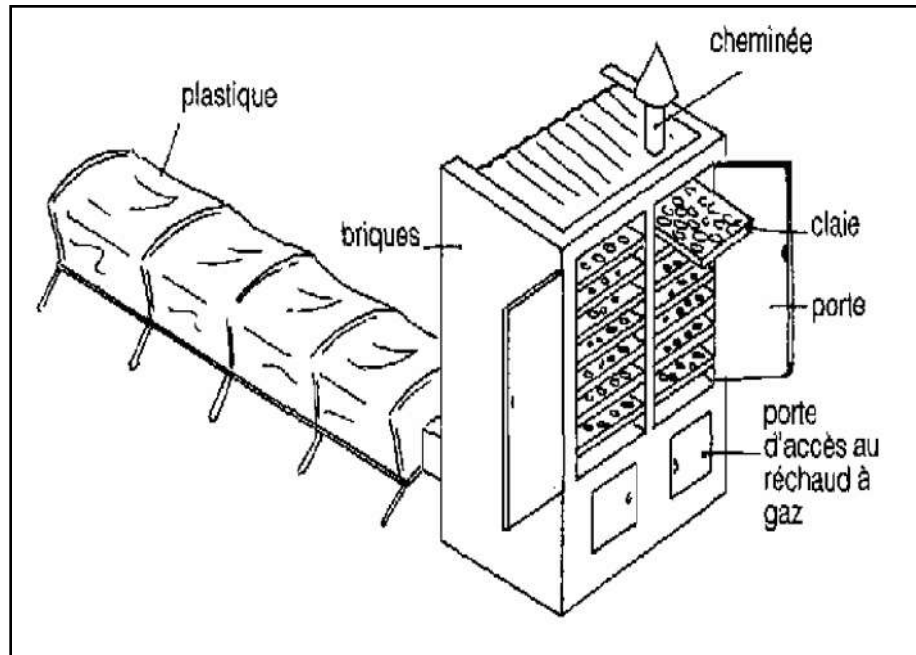


Figure III.7: Séchoir solaire hybride solaire gaz.

### III.9. Mode de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage

Le séchage (Figure.III.8) est caractérisé par un transfert de chaleur et de masse (l'eau sous forme de vapeur). L'eau est transférée de l'intérieur du produit vers l'interface produit-air par le phénomène de diffusion et de l'interface vers l'air asséchant par le phénomène de convection.

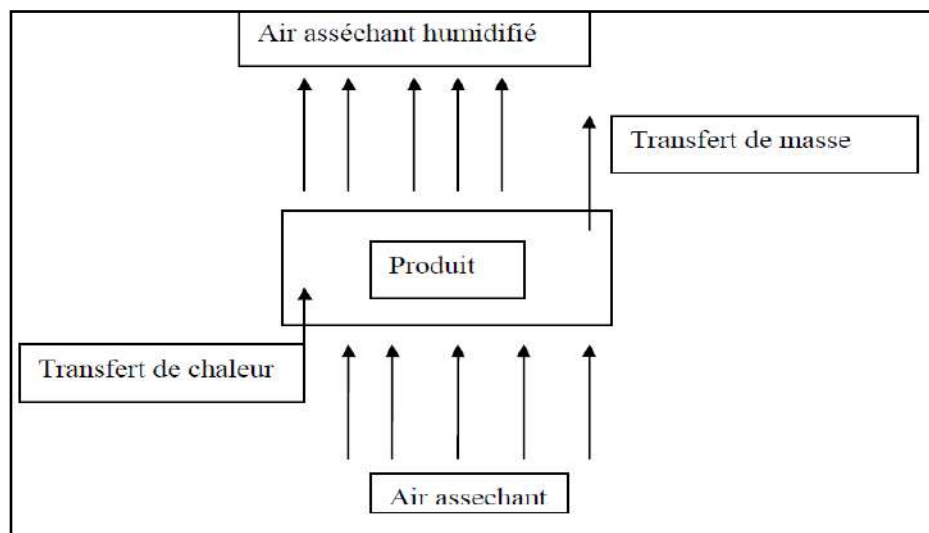


Figure III.8: Mode de transfert lors du séchage.

Apportant l'énergie nécessaire à l'activation et la libération des molécules d'eau, ce transfert de chaleur se fait en deux étapes différentes:

\*Transfert par convection:

L'air asséchant alimente la surface du produit en chaleur d'après la loi de Newton:

$$\Phi_{conv} = \alpha S_p (T_{a,a} - T_{s,p}) \quad (\text{III.4})$$

\*Transfert par conduction:

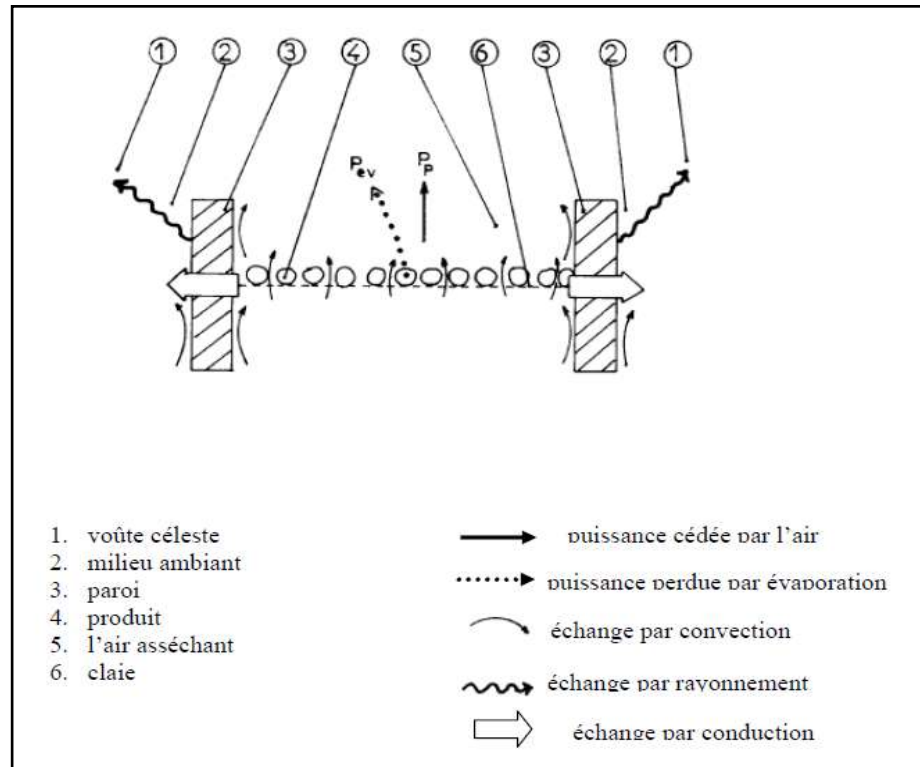
La surface du produit chauffée par l'air asséchant, cette chaleur énergie est transmise vers les couches internes du produit par conduction. Ce phénomène est régi par la loi de Fourier [8]:

$$\Phi_{cond} = -\lambda S_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \quad (\text{III.5})$$

### III.10. Description et formulation mathématique du séchage

#### III.10.1. Description et modélisation du caisson de dessiccation

Puisque nous procédons à un séchage à température, à débit, et à humidité d'air constants à l'entrée du séchoir hybride indirect, nous nous contentons de simuler le comportement de l'unité de séchage muni du chauffage d'appoint. Le modèle élaboré tient compte des phénomènes de transfert air produit d'une manière globale et les grandeurs physiques utilisées sont des grandeurs macroscopiques et non pas des grandeurs locales. Ce modèle global permet de simuler la cinétique de séchage de la tomate dans l'hypothèse des conditions constantes. Deux modes de transferts sont mis en jeu: thermique et massique. Leur étude nécessite la connaissance des coefficients et des surfaces d'échange. La modélisation du système se réduit à une étude unidimensionnelle, grâce à la configuration du caisson de dessiccation composée des claies horizontales, contenant des tranches minces de tomate traversées perpendiculairement par un air asséchant chaud. On découpe le séchoir dans le sens de l'écoulement de l'air en tranches fictives d'épaisseur  $dZ$ , où la température et l'humidité sont supposées constantes. Néanmoins, ces grandeurs varient suivant le mode pas à pas, d'une tranche à l'autre. Pour chaque tranche, on écrit les bilans thermiques et massiques dans les différents milieux en présence d'air, du produit et des parois voir figure (III.9); en notant que dans chacune des tranches, les échanges se font avec l'air pris dans des conditions de sortie de la tranche précédente.



**Figure III.9:** Echange thermique et massique dans une tranche du caisson de dessiccation

### III.10.2. Hypothèses simplificatrices

Vu la complexité du problème, nous avons utilisé quelques hypothèses simplificatrices. Plusieurs travaux entamés sur le séchage des produits agroalimentaires ont montré que ces hypothèses sont réalistes et les simplifications n'ont pratiquement pas d'influence sur les résultats (A.Belghit 1997 [109], L. Benamoune & A. Belhamri 2006 [110]).

Pour simplifier l'étude des transferts de chaleur et de masse couplés au niveau des claies de séchage on suppose les hypothèses suivantes :

- Les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligeables.
- Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligeables.
- La température et la teneur en eau à l'intérieur du produit sont supposées uniformes.
- Les variations temporelles de la température de l'air sont négligeables devant celle du produit.
- Le produit est coupé en rondelles de couche minces.
- La variation du volume du produit au cours du séchage est négligée.
- Pour chaque claie, le problème est unidimensionnel dans la direction de l'écoulement de l'air asséchant.



### III.10.3. Equations du modèle

On suppose que le caisson de dessiccation est découpé en un certain nombre de tranches fictives dans la direction Z de l'écoulement, définies par le volume délimité par deux claies et les parois de l'armoire de séchage, voir Figure (III.9).

- Bilan au niveau de la paroi isolante extérieure

$$m_{pe} \cdot C_{ppe} \cdot \frac{\partial T_{pe}}{\partial t} = h_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) - h_{ce} \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_{ab}) - h_r \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_c) \quad (III.6)$$

- Bilan au niveau de la paroi isolante intérieure

$$m_{pi} \cdot C_{ppi} \cdot \frac{\partial T_{pi}}{\partial t} = h_{ci} \cdot \Delta S_p \cdot (T_a - T_{pi}) - h_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) \quad (III.7)$$

- Bilan au niveau de l'air caloporteur

$$\dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta Z \cdot \frac{\partial T_a}{\partial Z} = -h_{cp} \cdot S_{pr} \cdot (T_a - T_{pr}) - h_{ci} \cdot \Delta S_p \cdot (T_a - T_{pi}) \quad (III.8)$$

- Bilan au niveau des tranches minces de tomate: siège de transfert de chaleur et de masse

$$m_{pr} \cdot C_{ppr} \cdot \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{cp} \cdot S_{pr} \cdot (T_a - T_{pr}) - m^* L_v \quad (III.9)$$

Où  $m^* = dm/dt = m_{ps} (dX/dt)$  avec  $m_{ps}$  : Matière sèche dans le produit (Kg), et  $(dX/dt)$  la vitesse de séchage exprimée en (kg d'eau par kg de matière sèche/s) et  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $J.kg^{-1}$ ).

### III.10.4. Détermination des coefficients d'échange

#### a) Par conduction

- A travers les parois de l'armoire de séchage :

$$h_d = \frac{1}{\frac{e_{pi}}{\lambda_{pi}} + \frac{e_{pp}}{\lambda_{pp}} + \frac{e_{pe}}{\lambda_{pe}}} \quad (III.10)$$

Avec :

$\lambda_{pi}$  : Conductivité thermique de la paroi interne.

$\lambda_{pp}$  : Conductivité thermique de l'isolant entre les parois.

$\lambda_{pe}$  : Conductivité thermique de la paroi externe.

$e_{pi}$  : Epaisseur de la paroi interne du séchoir.  $e_{pp}$  = épaisseur de l'isolant entre les parois.

$e_{pe}$  : Epaisseur de la paroi externe du séchoir.

**b) Par rayonnement**

- Entre la face externe de la paroi de l'armoire de séchage et la voûte céleste

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon_p (T_{pe} + T_c)(T_{pe}^2 + T_c^2) \quad (III.11)$$

Où

$\sigma$  : Est la constante de Stefan Boltzmann.

$\varepsilon_p$  : Est l'émissivité de la paroi du séchoir.

$T_c$  : Est la température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de Swinbank(1963) [111] :

$$T_c = 0.0552T_{ab}^{1.5} \quad (III.12)$$

**c) Par convection**

- Entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage (Mc Adams,1954) [112]:

$$h_{ce} = 5.67 + 3.86V_v \quad (III.13)$$

- Entre la face interne de la paroi de l'armoire de séchage et l'air asséchant :

$$h_{ci} = \frac{N_u \cdot \lambda_a}{\Delta Z} \quad (III.14)$$

$$\text{Où } N_u = 0.35Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad (III.15)$$

$Pr$  : Est le nombre adimensionnel de Prandtl et  $\Delta Z$  : la hauteur d'une tranche (pas d'espace) (Saccadura, 1978) [78].

- Entre le produit et l'air asséchant:

$$h_{cp} = \frac{N_u \cdot \lambda_a}{D_{pr}} \quad (III.16)$$

Avec :

$D_{pr}$  : Diamètre moyen du produit.

Nu : Nombre de Nusselt égale à  $0.37 Re^{0.6}$  d'après la relation de Charm 1963 [113].

$Re$  : Nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho_a \cdot V_a \cdot D_{pr}}{\mu_a} \quad (III.17)$$

$V_a$  : Vitesse de l'air au niveau du produit.

### III.10.5. Méthode de résolution

Pour déterminer les différentes températures (des parois du séchoir, de l'air asséchant et du produit au niveau de chaque claie) et teneurs en eau du produit au niveau de chaque claie, nous devons discrétiser les équations (III.6) à (III.9) Ceci conduit à un système de quatre équations à quatre inconnues que l'on peut mettre sous forme condensée suivante:

$$[A] X_n = B_n$$

Où [A]: Matrice des coefficients.

X : Vecteur des inconnues.

B: Vecteur connu lié aux coefficients de l'équation initiale.

## III.11. Démarche à suivre pour bien mener une opération de séchage solaire

### III.11.1 Détermination des contraintes du produit

Il faut dégager le genre de produit à sécher, ainsi que ses caractéristiques, afin de bien dimensionner le séchoir et déterminer les conditions opératoires optimales de l'opération de séchage. La construction d'un prototype de séchoir doit tenir compte de plusieurs critères énumérés ci-dessous.

- 1- Nature du produit (fruits, légumes, viandes, céréales, poissons.....) qui nous détermine le type de séchoir et les conditions opératoires.
- 2- La quantité de produit à sécher journalièrement et la durée de séchage qui conditionne le dimensionnement de l'installation.
- 3- Diminuer l'intervalle entre l'époque de récolte et celle du séchage pour éviter la détérioration du produit par l'air environnant.
- 4- La préparation à effectuer: lavage, égouttage, épluchage, décorticage.....

5- Pre-traitements: blanchiment, salage, soufrage, trempage dans des solutions caustiques,.....

6- Degré de séchage souhaité, plus l'humidité d'équilibre du produit est très basse, plus le temps de séchage est long.

7- Les fourchettes des températures requises pour effectuer le séchage. Leur connaissance est indispensable à double titre, d'abord pour choisir le mode de captation du rayonnement solaire, ensuite pour contrôler la conduite du séchage. Si les températures de séchage ne doivent pas dépasser 70°C (cas de la majorité des produits agricoles), les capteurs plans relativement bon marché suffisent pour capter le rayonnement solaire. Au-delà, il faut le concentrer ou employer des surfaces absorbantes sélectives. Il s'agit là des techniques sophistiquées dont le surcoût forcément trop élevé doit être, d'une manière générale, soigneusement étudié et qui, par suite ne conviennent pas à des produits courants. En fait il faut respecter ces valeurs critiques si non le produit se détériora et ne gardera pas ses propriétés organoleptiques.

8- Croutage: Il faut éviter le croutage en séchant moins vite à des températures plus ou moins basse pour que l'eau ne reste pas emprisonnée à l'intérieur du produit suite à la fermeture des pores en surface du au croutage.

### **III.11.2. Caractéristiques du site**

#### **III.11.2.1. Facteurs climatiques :**

La connaissance du gisement solaire du site pour l'implantation d'un séchoir solaire est une condition nécessaire. Les données relatives à la température et l'humidité de l'air, vitesse du vent sont disponibles au niveau des stations météorologiques; néanmoins, les données relatives aux rayonnements direct,diffus et global généralement ne sont pas disponible au niveau de ces stations, il faut donc faire appel aux formules empiriques reposant sur le traitement statistique des données météorologiques existantes.

Des températures ambiantes trop basses sont de toute évidence une contre indication l'implantation d'installations complètement solarisées, le séchage s'effectuant trop lentement, dans ce cas, une autre source de chaleur est nécessaire pour élever la température de sorte que le solaire n'est plus alors qu'un appoint dont il faut étudier la rentabilité avec soin.

Inversement, des températures extérieures trop élevées notamment dans les zones arides exigent que des précautions soient prises pour éviter que la température de l'air asséchant ne

dépasse la valeur supportable par le produit. La nécessité d'une ventilation convenable s'impose pour diminuer la température dans le cas du besoin. Le paramètre degré d'humidité de l'air est important et le séchage ne peut se réaliser avec un air saturé ou contenant plus de 80% d'humidité car son pouvoir évaporatoire est très faible. La direction et la vitesse des vents dominants sont utiles car ces derniers peuvent réduire le gain de chaleur utile d'un capteur à air solaire ou augmenter les pertes de chaleur de l'enceinte de séchage. L'orientation du séchoir et la localisation des conduits intérieurs d'air doivent être étudiées relativement aux vents dominants.

D'autres questions générales peuvent être posées sur certaines commodités du site :

- Existence ou pas de l'électricité dans le site
- Espace disponible
- Existence ou pas de combustible pour le chauffage d'appoint
- Disponibilité ou pas de l'eau pour lavage et prétraitement des produits à sécher
- Matériaux de constructions nécessaires (verre, aluminium, plexiglas, laine de verre.....) existent –ils localement ou peut on leur trouver des substituts locaux?
- Moyens de stockage, leur capacité, leur emplacement?

#### **III.11.2.2. Facteurs humains**

- Existence ou pas sur place d'une main d'oeuvre compétente
- Intervention de la main d'oeuvre locale (artisans, forgerons) pour la construction des petits séchoirs simples et rustiques pour traiter de petite quantité de produit à usage domestique; ou peuvent aussi fabriquer des systèmes de séchage solaire comportant des organes de captation, de stockage, de gestion et de contrôle, capables de traiter des quantités plus importantes et destinées au secteur industriel.

#### **III.11.3. Réalisation du séchoir**

##### **- choix du type de séchoir**

Le choix du type de séchoir est corollé au type de produit à sécher. Pour les produits volumineux les séchoirs serres sont tout indiqués d'un point de vue technico-économique. Si on a des produits à haute valeur commerciale (fruits, légumes, poisson....etc.) les séchoirs tunnels conviennent mieux. Dans tout les cas de figure il est conseillé d'assurer la ventilation par convection forcée afin de pouvoir contrôler le débit de l'air asséchant et par suite sa

température. La ventilation par convection naturelle ne garantissant pas un bon déroulement du séchage, peut convenir, à la rigueur, pour un usage individuel aux exigences réduites.

L'utilisation de l'appoint dépend des conditions atmosphériques et de l'objectif du manipulateur est ce qu'il veut sécher d'une façon continue le jour et la nuit, dans ce cas le système d'appoint s'impose, ou seulement pendant le jour?

- Modélisation et simulation du comportement du séchoir en fonction des différents paramètres (débit, température, humidité de l'air,...etc.).
- Construction du séchoir.
- Expérimentation du séchoir à vide et sous charge.
- Ajustement et mise au point du séchoir avec une optimisation technico-économique.

### **III.12. Modèle de séchage en couche mince**

La modélisation des courbes de séchage solaire à définir une fonction vérifiant l'équation :  $X_r = f(t)$  dite équation caractéristique de séchage.

On relève dans la littérature une abondance de modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes de cinétiques de séchage.

Les diverses équations donnent l'évolution au cours de séchage de la teneur en eau réduite en fonction du temps. Ces équations contiennent des constantes qui sont ajustées pour concorder avec les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'étude expérimentale pour lequel elles ont été établies (S. Lahsasni et al., 2004 [114] et S.Simal et al. 2005 [115]).

Le Tableau III.2 regroupe quelques équations caractéristiques de séchage trouvées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche mince d'un produit [116,117].

**Tableau III.2 :** Différents modèles mathématiques de séchage.

Nom du modèle	Expression du modèle	Références
Newton	$X_r = \exp (-kt)$	Lewis [118]
Page	$X_r = \exp (- kt^n)$	Diamante and Munro [119]
Henderson and Pabis	$X_r = a \exp ( - kt)$	Zhang and Litchfield [120]
Modified Page	$X_r = \exp ( - (kt)^n)$	Overhults et al. [121]
Logarithmique	$X_r = a \exp ( -kt) +c$	Yagcioglu et al. [122]
Two – terme	$X_r = a \exp ( -k_0 t) + b \exp (-k_1t)$	Henderson [123]
Two – terme exponential	$X_r = a \exp (-kt) + (1-a) \exp( -kat)$	Sharaf-Eldeen et al. [124]
Approximation of diffusion	$X_r = a \exp (-kt) + (1-a) \exp (-kbt)$	Yaldiz and Ertekin [125]
Verma et al.	$X_r = a \exp (-kt) + (1-a) \exp ( -gt)$	Verma et al. [126]
Midilli et al.	$X_r = a \exp ( -kt^n) +bt$	Midilli et al. [127]

### III.12.1. Paramètres statistiques utilisés

Le modèle approprié à la description de l'allure de l'humidité absolue réduite d'un produit est choisi selon les paramètres statistiques suivants:

Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) est l'un des critères pour analyser la précision de l'équation qui décrit les courbes de séchage.

En plus de  $R^2$ , le paramètre statistique  $\chi^2$  – carré réduits ( $\chi^2$ ) est utilisé pour étudier la précision du lissage ( T.L. Togrul, et D. Pehlivan, 2003 [128]).

Ces paramètres statistiques sont calculés comme suit :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{pre,i}^* - \bar{X}_{pre,i}^*)^2}{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i}^* - \bar{X}_{exp,i}^*)^2} \quad (III.18)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i}^* - X_{pre,i}^*)^2}{N-n} \quad (III.19)$$

Où:

$X_{exp,i}^*$  : Représente la  $i^{eme}$  humidité absolue réduite expérimentale.

$X_{pre,i}^*$  : Représente la  $ieme$  humidité prédite selon le modèle approprié.

$N$  : Est le nombre de points expérimentaux.

$n$  : Désigne le nombre de constante de chaque modèle.

Tel que:

Coefficient de corrélation ( $R^2$ ) élevé (tendant vers 1), Ki-carrée ( $\chi^2$ ) minimale (tendant vers 0).



### III.13. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, l'utilisation de l'énergie solaire comme une solution aux différents problèmes liés au séchage : " économie d'énergie, limitation de la pollution, réponse à la dispersion géographique des lieux de séchage, une simplicité des techniques mise en œuvre..."

Malgré ces avantages, nous nous sommes aperçus des fortes contraintes liées à l'actuelle utilisation des séchoirs solaires à convection forcée. Nous avons trouvé, par exemple, que les trous d'aération du séchage solaire à convection forcée, utiles pour le renouvellement de l'air, apportent souvent des risques d'infestation par la saleté de l'air ou par l'entrée des insectes ou la manipulation humaine : en plus, il existe des difficultés de contrôle dans le taux de séchage.

A travers cette étude bibliographique, nous espérons apporter des bases scientifiques et techniques pour l'étude de la conservation des produits végétaux par séchage. La maîtrise de cette technique revêt une importance primordiale pour les industries alimentaires car elle permet un gain d'énergie.

---

**CHAPITRE IV**

**ETUDE EXPÉRIMENTALE DU CAPTEUR**

**SOLAIRE PLAN**

---

## IV.1. Introduction

Les capteurs solaires à air sont importants dans les applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux, et le séchage qui est une opération souvent nécessaire dans de nombreux processus (agro-alimentaire, matériaux de construction, bois...). En raison de l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur il est intéressant à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique.

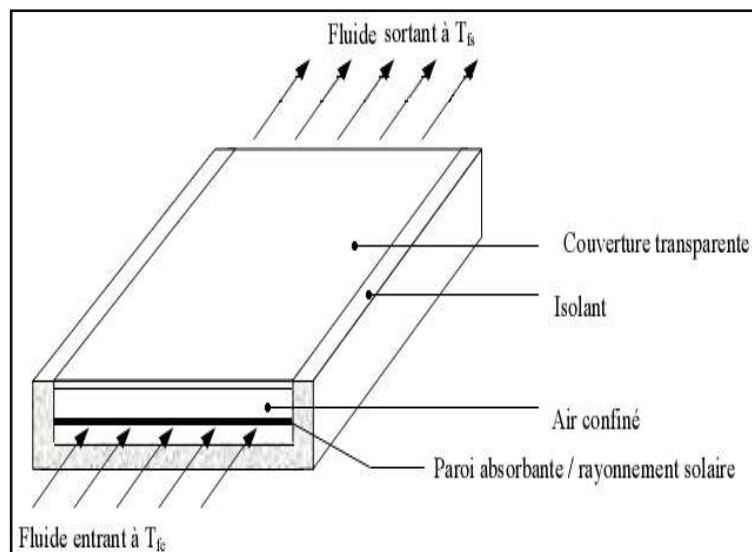
Cette performance peut être atteinte en optimisant d'une part, les coefficients de transfert convectifs entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur et d'autre part, en réduisant les pertes thermiques à travers les différents composants du capteur solaire.

L'objet de ce travail consiste à apporter une contribution à la valorisation des ressources renouvelables et locales, en l'occurrence le bois de palmier dattier, afin de les intégrer dans le domaine de l'isolation thermique des capteurs solaires.

## IV.2. Description de capteur solaire

C'est un capteur solaire plan à air à simple circulation et à simple vitrage dont la configuration est parallélépipédique (0,5 m x 1 m) transforme le rayonnement solaire en énergie thermique. Il est constitué d'un absorbeur en tôle aluminium de (0,003 m) d'épaisseur peinte en noire mate. Il est recouvert aussi d'une plaque de verre d'épaisseur 0,005 m. La hauteur entre la couverture transparente et l'absorbeur est égale à 0,02 m. Les cotés latéraux et les parties inférieures sont isolés thermiquement avec la laine de verre ou matériaux naturel (Bois de palmier dattier), ils sont de 0,03 m et 0,05 m d'épaisseur respectivement. Une plaque arrière mince en acier galvanisé placée sur l'isolant d'une épaisseur de 0,004 m. L'air y circule entre la plaque inférieure et l'absorbeur, la veine d'air dynamique d'une hauteur de 0,025 m.

Le capteur est incliné d'un angle de  $31^\circ$  (latitude de la ville d'Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. La photo et le schéma du capteur solaire est présent sur la Figure (IV.1) et Photo (IV.1).



**Figure IV.1 :** Schématisation du capteur solaire plan à air.



**Photo IV.1 :** Photo des capteurs solaires plans à air.

### **IV.3. Principe de fonctionnement**

Le rôle d'un capteur solaire thermique 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, ...). Le principe de fonctionnement est dit de l'effet de serre. Les rayons du soleil traversent la couverture transparente supérieure puis frappent l'absorbeur. Celui-ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe. En effet, tout corps chaud émet des rayonnements aux températures usuelles, celui-ci se trouve dans le domaine de l'infrarouge ( $\sim 9 \mu\text{m}$ ). A cette longueur d'onde, le verre est parfaitement opaque et réfléchit donc tout cet infrarouge. La chaleur reste ainsi prisonnière du capteur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur.

### **IV.4. Appareillages de mesures**

#### **IV.4.1. Mesure du rayonnement solaire**

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en  $\text{W/m}^2$  à l'aide d'un solarimètre (MGE de type DS 120 avec incertitude  $\pm 5\%$ ) et ceci durant la journée de l'expérience.

#### **IV.4.2. Mesure de la température, et la vitesse de l'air**

Les mesures des températures sont effectuées à l'aide des thermocouples de type K (chromel-alumel) (0,2 mm de diamètre: incertitude  $\pm 2\%$ ) reliés à un appareil électronique de type NI cDAQ -9174 ( incertitude  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ) connecté à un ordinateur pour enregistrer les résultats par le temps nécessaire. Les mesures sont prises dans plusieurs endroits : la température ambiante et entrée, sortie du capteur. La vitesse de l'air est mesurée à l'entrée et à la sortie du capteur. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre (Testo modèle 445: incertitude  $\pm 0,03 \text{ ms}^{-1}$ ). L'appareil Testo 445 à affichage numérique.

Les variables mesurées ont été enregistrées à des intervalles de temps de 15 minutes.

### **IV.5. Matériels**

#### **IV.5.1. Bois de palmier dattier**

Le bois de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) récolté des oasis d' El-Oued - Algérie a été utilisé comme un renfort dans cette étude. Les parties utilisées sont le pétiole et la fibre, les échantillons du palmier dattier de type: Deglet-Nour. Selon les études expérimentales effectuées sur le bois de palmier dattier par Agoudjil et al. [31], il a été constaté que les parties renouvelables de l'arbre de palmier dattier le pétiole possèdent une conductivité thermique plus faible que le tronc du palmier; par conséquent, notre travail est porté sur l'utilisation des parties renouvelables de palmier dattier (la fibre et le pétiole) pour élaboration des composites à base de ces fibres.

#### **IV.5.2. Le sable de dunes**

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolienne. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fin et très serrée. Pour notre étude le sable des dunes utilisé est de la ville d'El-Oued – Algérie; pour une bonne préparation du sable on suit les étapes de traitement ci-dessous:

- ✓ Le tamisage de sable

Le tamisage de sable a été effectué au niveau du laboratoire de génie civil où on a dégagé le diamètre de sable 0.16 mm.

- ✓ Le traitement

On fait le traitement du sable au niveau du laboratoire de chimie. Le traitement consiste à laver le sable avec de l'eau distillée et après avec l'acide chlorhydrique HCl (0.1 mol/l) et finalement avec l'eau distillée pour éliminer les traces de l'acide. Le but de traitement c'est d'éliminer les autres matériaux qui sont collés au sable.

Après le traitement le sable est séché dans un four (marque : Nabertherm, modèle : LE6/11/B150) à une température  $T = 500^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes pour éliminer les matières organiques.

### IV.5.3. Préparation des matériaux locaux

#### IV.5.3.1. La première série

a - Les pétioles de palmiers sont la couche extérieure des palmiers où cette couche joue le rôle de protection du palmier contre les conditions climatiques. On collecte ces pétioles manuellement soit à partir des palmiers ou à partir de celles qui tombent par terre. Après ça on les redimensionne à l'aide de la scie. Les échantillons utilisés sont découpés et rabotés sous forme d'un pavé parallélépipédique d'environ 30 mm d'épaisseur et de 70 mm de côté.

b - Fibres de liffe (entre les kornaf, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le liffe).

Les fibres sont bien lavées à l'eau mélangée avec quelques gouttes de l'eau de javel pour enlever les impuretés et la couche de lignine qui entourent les fibres et qui gêne l'adhérence. Ensuite, elles sont séchées dans des conditions naturelles, et sont coupées à des longueurs voulues. Les échantillons utilisés sont découpés et rabotés sous forme approchés rectangulaire (100-150 mm longueur and 80-100 mm largeur ).



**Photo. IV. 2a.** Photo du capteur solaire avec isolant pétiole (pièce).



**Photo. IV. 2b.** Photo du capteur solaire avec isolant fibres (pièce).

#### IV.5.3.2. La deuxième série

Le bois de palmier dattier (le pétiole et La fibre) a été séché dans des conditions naturelles, puis soumis à un broyage mécanique à l'aide d'un broyeur, afin d'obtenir des petites dimensions. Il a subi deux niveaux de broyage ; le concassage qui permet d'obtenir des particules de taille inférieure au centimètre et le broyage grossier pour obtenir des particules de l'ordre du millimètre.



**Photo. IV. 3a.** Photo du capteur solaire avec isolant pétiole (poudre).



**Photo. IV. 3b.** Photo du capteur solaire avec isolant fibres (poudre).

#### IV.5.3.3. La troisième série

Les composites ont été obtenus en mélangeant du gypse naturel (conductivités thermiques:  $0,449 \text{ W. m}^{-1} .\text{K}^{-1}$  [129]), de l'eau et de la poudre de dattier (pétiole ou fibres). Le poids moyen des panneaux était de 1,3 kg. La composition était de 2000 g de poudre de bois de palmier dattier (50%), 667 g de gupsum (17%) et 1334 g d'eau (33%) utilisés pour dissoudre le gupsum. Ensuite, le mélange était vide dans des moules de dimensions (25 cm x 25 cm x 5 cm) pour s'adapter parfaitement à la taille des cloisons du capteur solaire. Le séchage des échantillons a été effectué à l'air libre pendant 48 h.



**Photo. IV. 4a.** Photo du capteur solaire avec isolant pétiole poudre + plâtre.



**Photo. IV. 4b.** Photo du capteur solaire avec isolant fibres poudre + plâtre.



#### IV.5.3.4. La quatrième série

L'objectif de cette série consistait à laminer la surface de l'absorbeur par de fines couches de sable traitées et noircies en tant que milieu poreux. La masse de la couche de sable sur l'absorbeur était maintenue à 200 g, alors que la taille des grains étaient fixes et celle choisie avait un diamètre de 0,16 mm.

### IV. 6. Résultats expérimentaux

#### IV.6.1. Influence de l'isolation thermique

##### IV.6.1.1. Effet du rayonnement sur la température

Les Figures. (IV.2a), (IV.2b), (IV.2c), montrent la variation journalière de la température de l'air ambiant, et les rayonnements solaires en fonction du temps. On remarque que l'allure des températures est identique à celle du rayonnement solaire.

Comme prévu, le rayonnement solaire augmente le matin à une valeur maximale de 930,28 - 763,84 - 830,99  $\text{W/m}^2$  pour les trois jours de l'expérience respectivement à midi et commence à diminuer dans l'après-midi. Pendant la période d'essai (8h00-17h00), le rayonnement solaire était entre (166,55 - 930,28  $\text{W/m}^2$ ), (149,83 - 763,84  $\text{W/m}^2$ ) et (203,49 - 830,99  $\text{W/m}^2$ ), la température de l'environnement a varié entre (25.94°C - 38.82°C), (29.83°C - 48.5°C) et (26.06°C - 42.39°C).

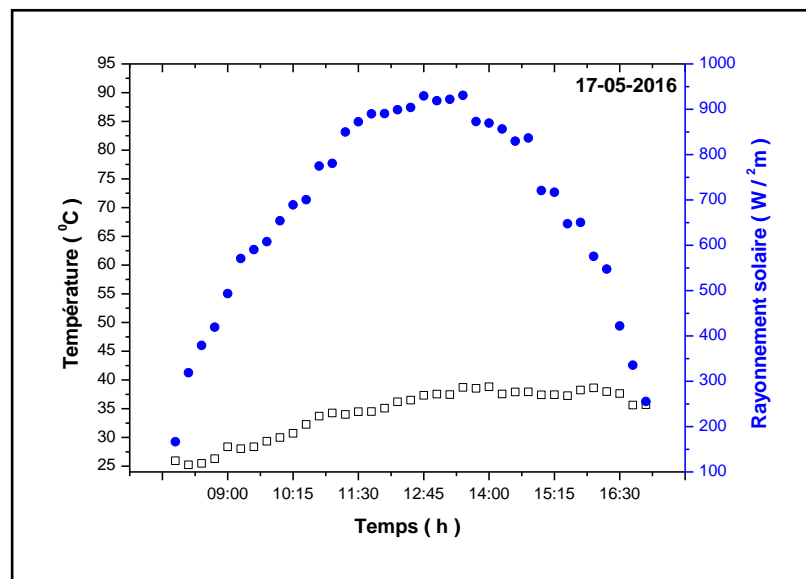


Figure IV.2a : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

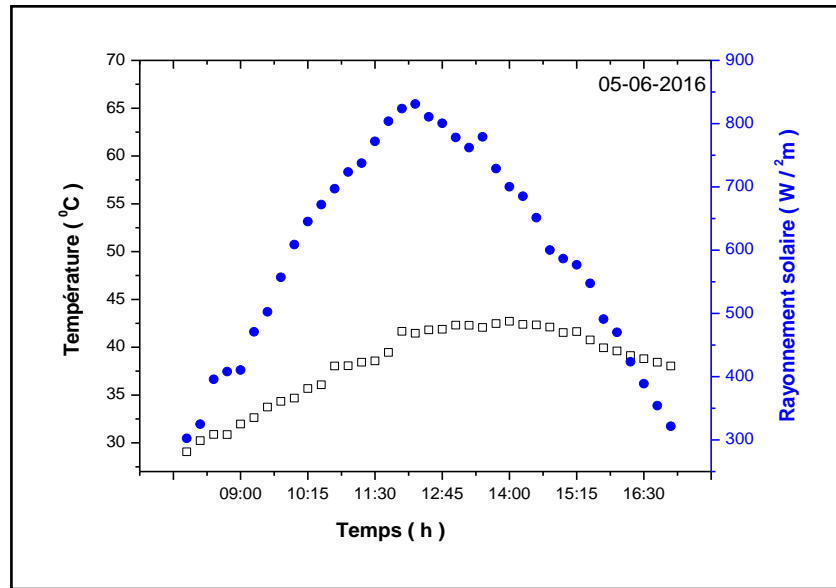


Figure IV.2b : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

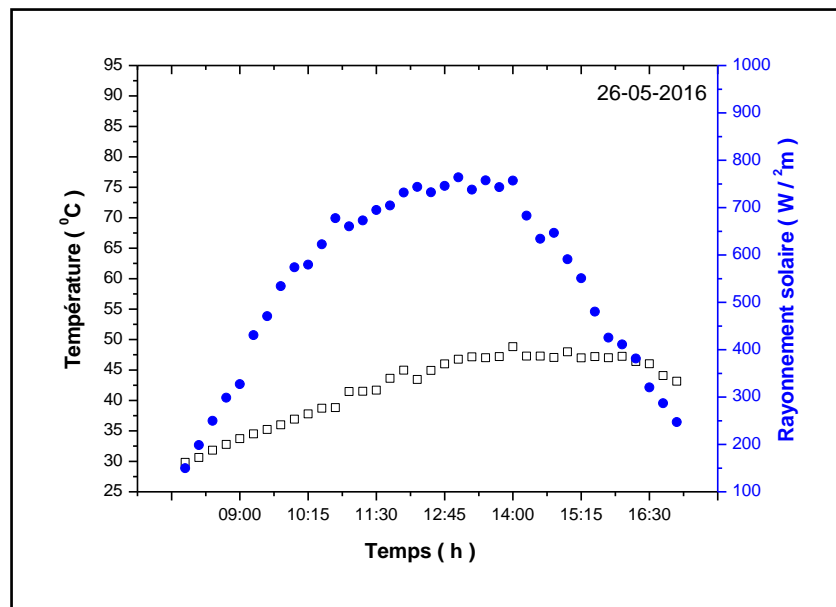


Figure IV.2c : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

#### IV.6.1.2. Effet de la température de l'absorbeur sur la température d'entrée et de sortie.

Les Figures (IV.3a), (IV.3b), (IV.3c), montre la variation de la température de l'absorbeur, les températures de l'air d'entrée et de sortie de capteur solaire pour les différents isolants utilisés dans ce test expérimental. Comme montré, les températures de sortie suivent la même tendance que la température de l'absorbeur.

Au premier lieu, de 07h:00 à 13h:00 une augmentation de la température de l'absorbeur et la température de sortie ceci est très normale, puisque le rayonnement solaire global augmente, et la température de l'absorbeur atteint des valeurs maximales, on constate que la température de l'absorbeur commence à diminuer presque vers (16h:00), malgré cela la température de sortie reste toujours supérieure à la température ambiante, de cette remarque on peut comprendre que ce type de capteur sera mieux amélioré avec des matériaux de stockage.

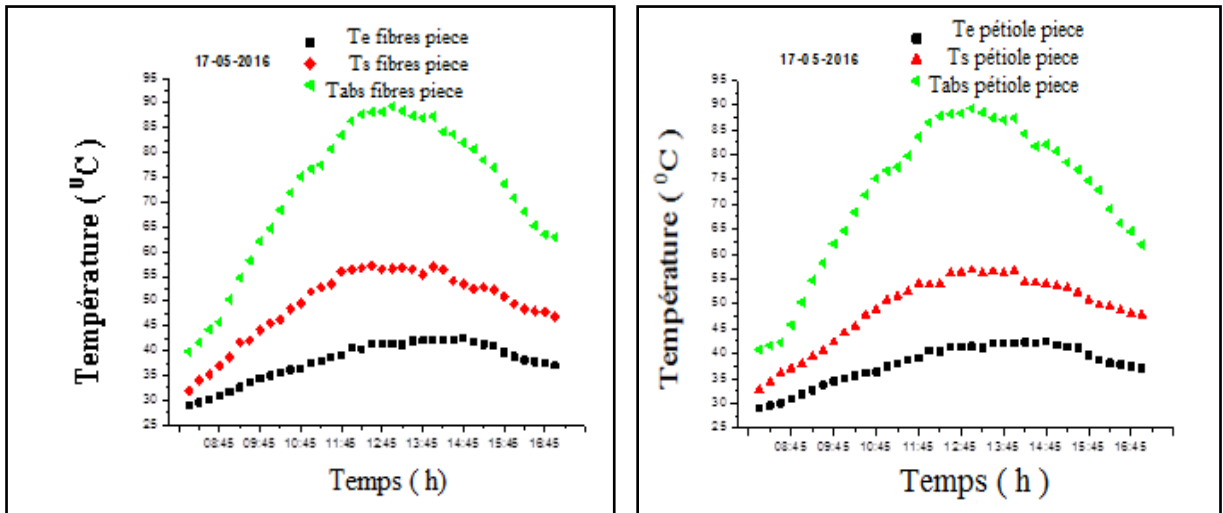
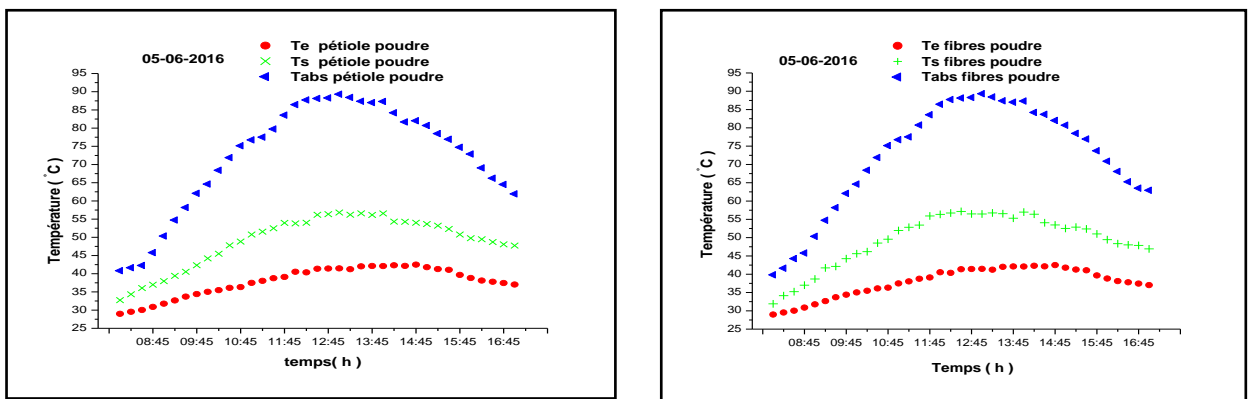


Figure IV.3.a : Variation de la température de l'air d'entrée, et de sortie de capteur solaire et de la température de l'absorbeur avec le temps de tous les capteurs isolants.



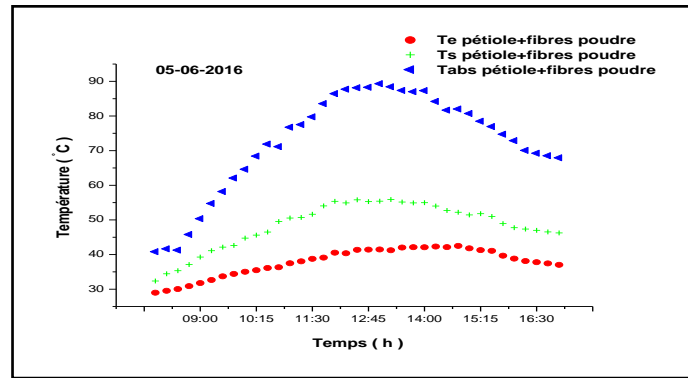


Figure IV.3b : Variation de la température de l'air d'entrée, et de sortie de capteur solaire et de la température de l'absorbeur avec le temps de tous les capteurs isolants.

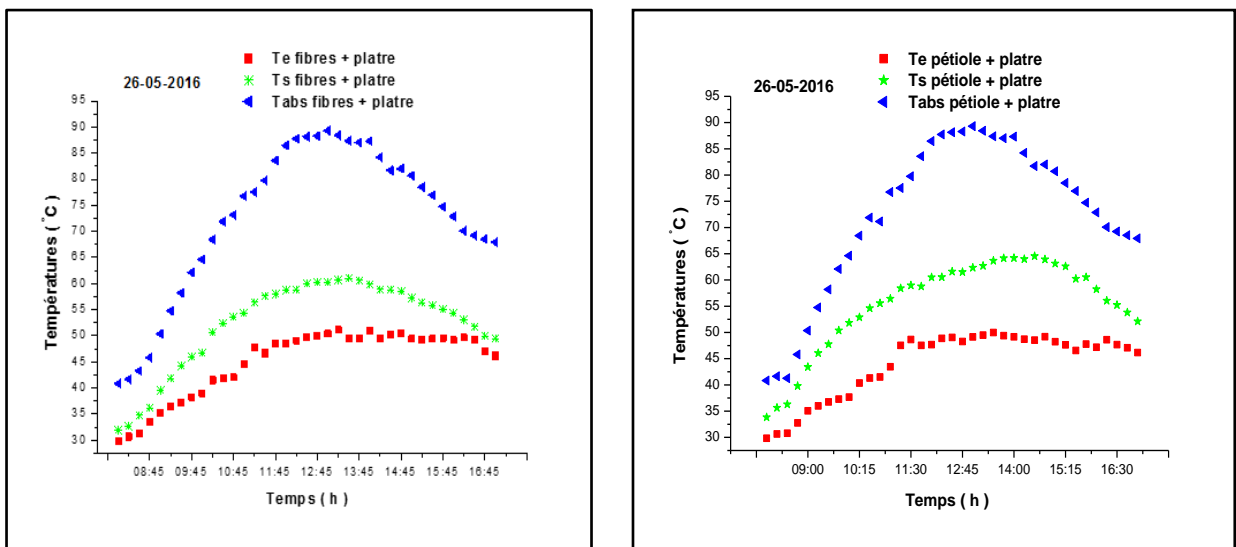


Figure IV.3c : Variation de la température de l'air d'entrée, et de sortie de capteur solaire et de la température de l'absorbeur avec le temps de tous les capteurs isolants.

#### IV.6.1.3. la variation de la température de sortie

Figure (IV.4) montre la variation de la température de sortie pour les septes capteurs. La température dans le capteur isolé avec petiole, fibres en poudre et petiole + gypse était la plus élevée, suivie par un capteur isolant en laine de verre.

La température maximale de l'air à sortie de capteur à isolation petiole + gypse était de  $64,54^{\circ}\text{C}$  à 14 h 30 et le capteur isolant en laine de verre à une température d'air de sortie maximale de  $61,59^{\circ}\text{C}$  à 13h30.

Figure (IV.5) montre la variation de la différence de température entre la température de sortie et la température d'entrée pour les septes capteurs. Pendant les courbes, nous notons que la différence de température lorsque l'utilisation de bois de palme dans les types de fibres

et de pétioles sous forme de pièces un matériau isolant proche de la différence de température de la laine de verre.

Dans le cas des fibres et des pétioles poudre, la différence de température varie entre (2,93-16,36 et 3,75-15,64) respectivement et atteint une valeur maximale de 16,36 - 15,64, où la différence de température pour la laine de verre varie entre (2-13,35) et la valeur maximale était 13,35. Notez que la différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur solaire dans le cas de pétiole et de fibre avec gypse change entre (5.64-20.97) et (4.74-15.62) et atteint la valeur maximale dans les deux cas 20.97-15.62 respectivement. Dans le cas de la laine de verre, la différence entre 4,24 et 16,39 et le maximum était de 16,39.

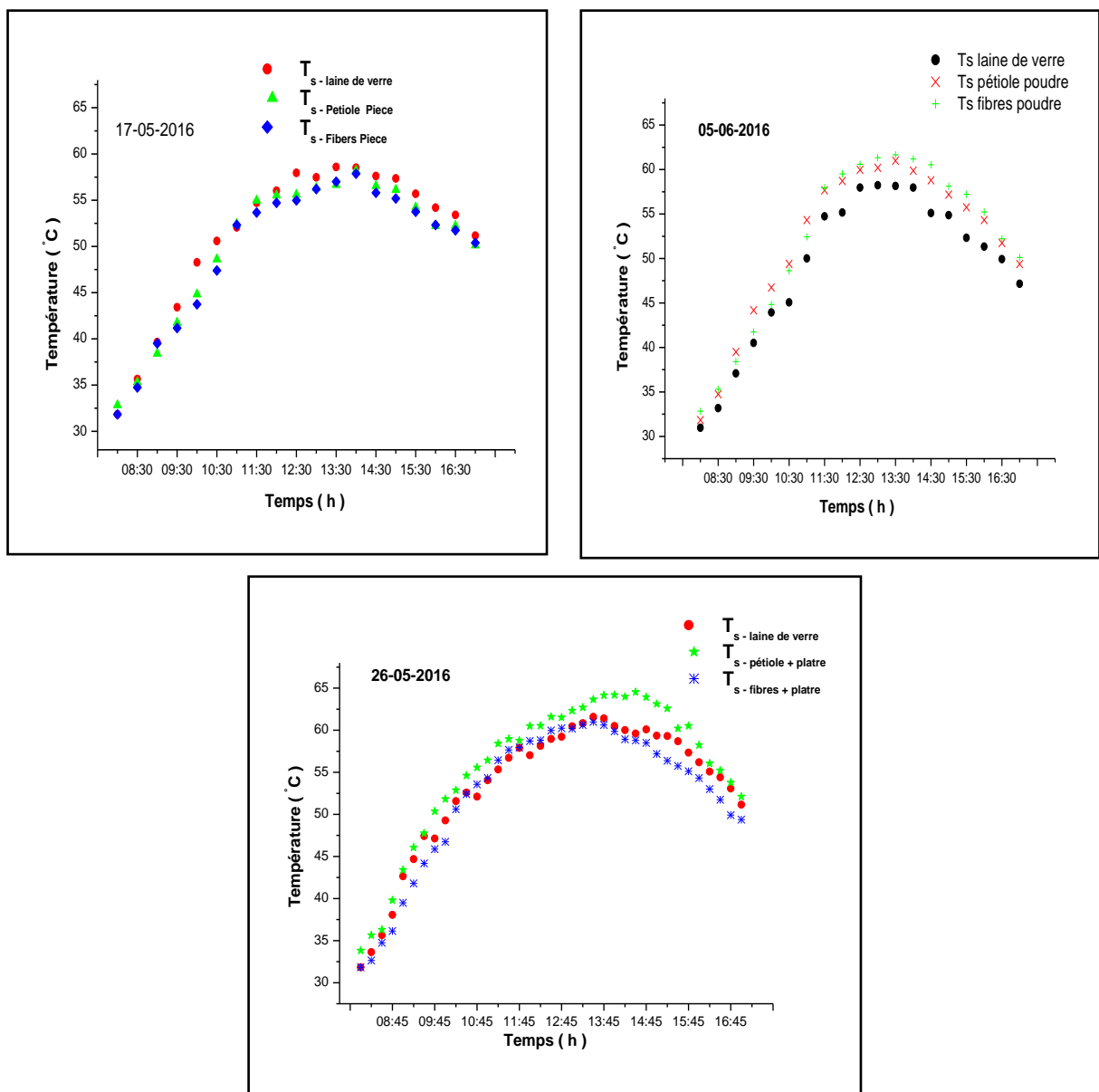
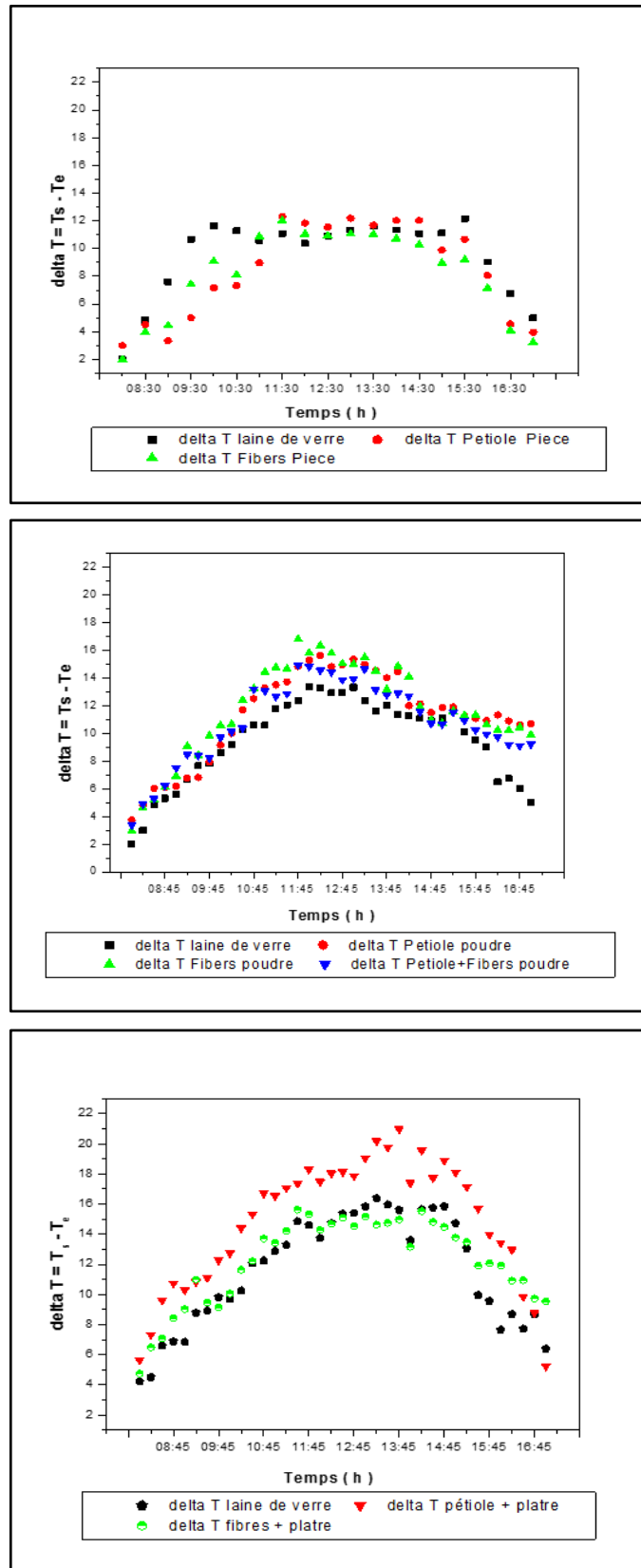


Figure IV.4 : Variation de la température de sortie de capteur solaire avec le temps.



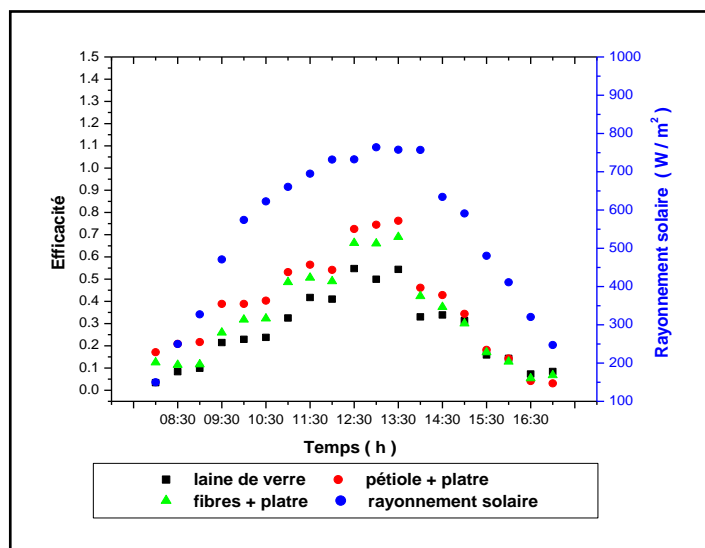
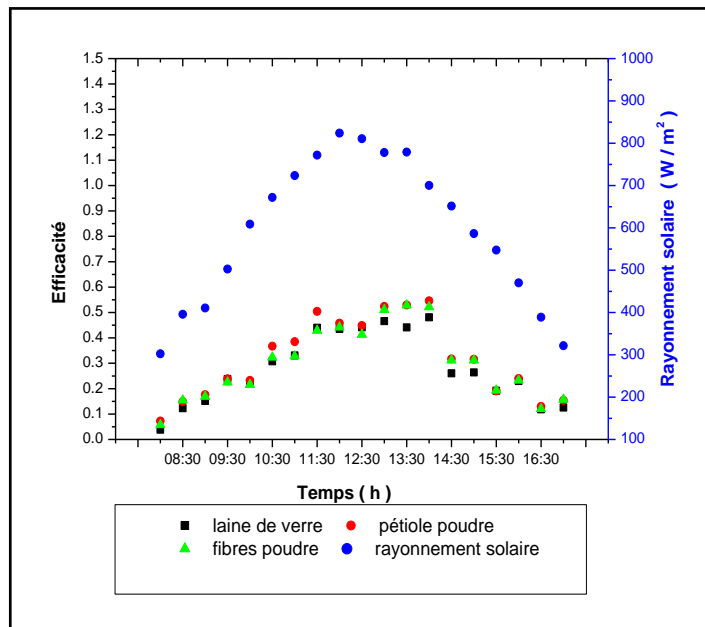
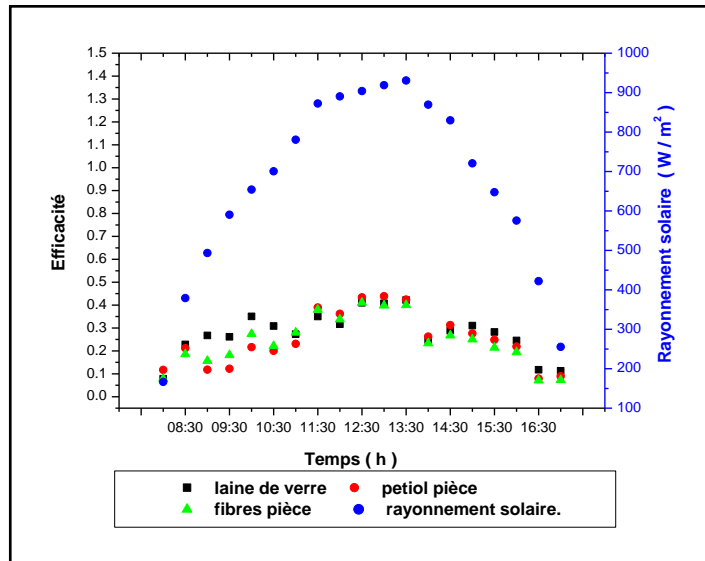
**Figure IV.5 :** La variation de la différence de température entre la température de sortie et la température d'entrée pour les septes capteurs.

#### **IV.6.1.4. Efficacité thermique des capteurs solaires avec isolation de palmier dattier**

Les Figures (IV.6) et (IV.7) montrent l'efficacité thermique des capteurs solaires avec du bois de dattier et de la laine de verre. On peut voir que l'efficacité du capteur solaire dépend fortement de l'isolation. La courbe d'efficacité thermique montre qu'entre 10h00 et 13h30, le rayonnement est élevé, le rendement thermique varie entre (21% et 43,6%) pour la pièce de pétiole (22,12% - 41,04%) pour la pièce de fibres, (36,73% - 54,48%) pour la poudre de pétiole (32,32% - 52,48%) pour les fibres en poudre et (40,32% - 76,25%) pour Pétiole + gypse (32,26% - 68,95%) pour les fibres + gypse. Après midi, l'efficacité thermique augmente fortement à cause du rayonnement solaire. Comme on le voit, les efficacités augmentent jusqu'à atteindre une valeur maximale à 13h30 le midi, avant de commencer à diminuer plus tard dans l'après-midi. L'efficacité la plus élevée a été donnée par le capteur Pétiole + gypse et l'ordre décroissant est: Fibres + gypse, poudre de pétiole, poudre de fibres, puis laine de verre.

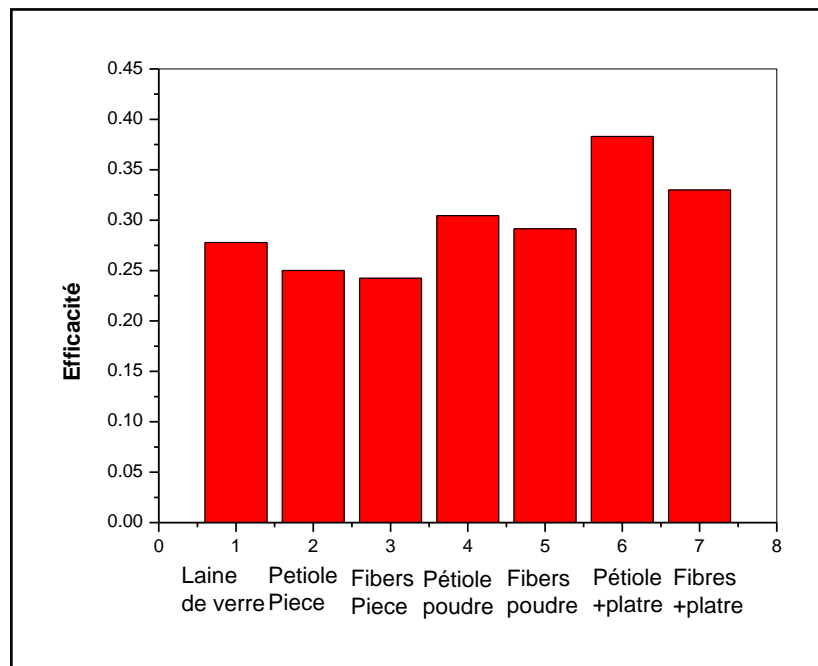
Le rendement thermique maximum pour le capteur isolé par Pétiole + gypse était de 76,25% à 13h30 et la valeur minimale était de 6,03% à 17h00. Le capteur isolant en laine de verre a un rendement thermique maximal de 48,11% à 14h00 et un minimum de 8,44% à 17h00.

L'efficacité thermique moyenne du capteur solaire isolé au Pétiole + gypse était supérieure de 37,7% à celle du capteur solaire isolant en laine de verre. En concevant un meilleur capteur solaire, les résultats peuvent être améliorés de manière significative.





**Figure IV.6 :** Variation de l'efficacité thermique avec le temps et le rayonnement solaire de tous les capteurs isolants.



**Figure IV.7 :** Efficacité thermique de tous les capteurs isolants.

## IV.6.2. Influence de sable

### IV.6.2.1. Variation des différentes températures

Dans les Figures (IV.8a) et (IV.8b) nous avons représenté la variation des différentes températures (températures ambiant, température d'absorbeur, température d'entrée et de sortie de capteur solaire) en fonction de temps. On observe une augmentation de la température pour la matinée jusqu'à 13 h 00 ceci peut s'expliquer par le fait qu'en raison de l'augmentation du flux solaire incident, par contre dans l'après-midi on remarque la diminution progressive de la température d'absorbeur et la température de sortie de capteur solaire. Si on compare les résultats des prototypes on remarque que la température d'absorbeur et la température de sortie de capteur solaire dont le capteur à sable collé sur l'absorbeur est élevée par rapport au simple absorbeur. La température d'absorbeur et la température de sortie de capteur solaire atteint une valeur maximale de 84.35°C, 68.24°C respectivement pour le capteur à sable et atteint une valeur maximale de 68.65°C, 57.84°C pour le capteur sans sable. La température ambiante et la température d'entrée de capteur solaire reste presque constante entre 12 h00 et 14 h00 et diminue plus lentement après 14 h00 malgré la diminution de l'intensité du rayonnement solaire.

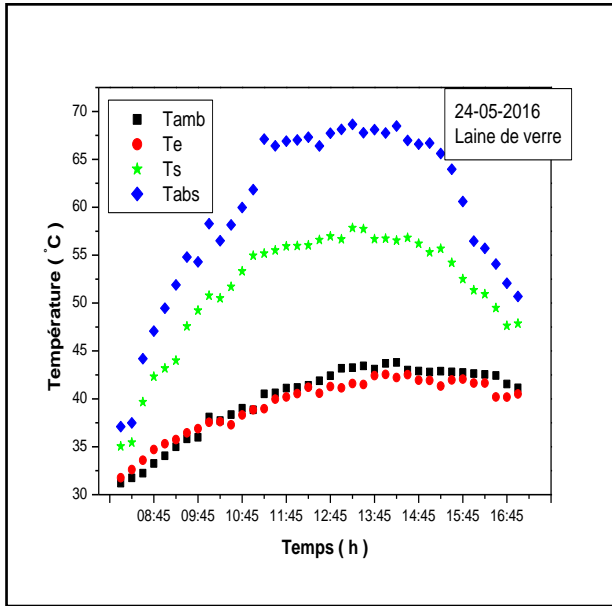


Figure IV.8a : Variation des températures en fonction du temps.

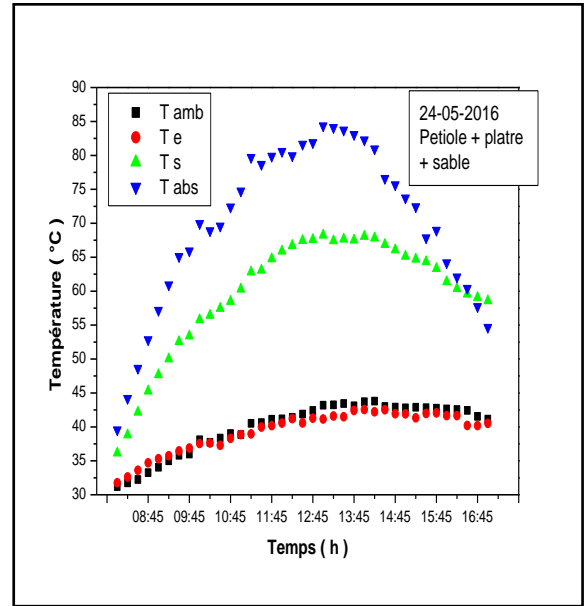


Figure IV.8b : Variation des températures en fonction du temps.

#### IV.6.2.2. Variation de la différence des températures

La Figure (IV.9) représente l'évolution de la différence entre la température de l'entrée et la température de sortie (delta T). Nous remarquons que cette différence varie en fonction de l'intensité du rayonnement solaire incident. Cette variation est très importante dans le capteur muni d'une couche mince de sable sur l'absorbeur par rapport à autre capteur.

Dans le cas de capteur muni d'une couche mince de sable sur l'absorbeur, la différence de température varie entre (4,38 - 27,09) et atteint une valeur maximale de 27,09, où la différence de température pour le capteur sans sable varie entre (2,83 - 16,24) et la valeur maximale était 16,25.

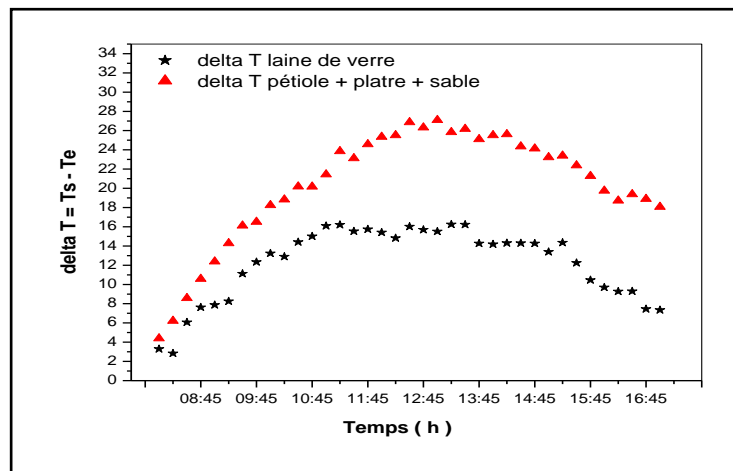


Figure IV.9 : Variation de la différence des températures en fonction du temps.

## IV. 7. Conclusions

La performance d'un capteur solaire utilisant du bois de dattier et de la laine de verre comme isolant thermique a été étudiée. Les données expérimentales ont été analysées pour sept cas et testées dans la région d'Ouargla, au sud de l'Algérie. Ce travail expérimental fait le lien entre l'impact des matériaux végétaux sur l'efficacité énergétique de capteurs solaires plan à air. Il a été conclu de cette expérience que: petiole + gypse pourrait être utilisé comme matériau d'isolation thermique pour le capteur solaire d'air considéré; où la température de l'air de sortie était maintenue dans la plage de 34,42 - 62,72°C. Les performances comparées de l'utilisation de petiole + gypse et de la laine de verre comme isolant thermique pour capteur solaire d'air ont montré que le rendement thermique du capteur à isolation petiole + gypse était supérieur de 37,7% à celui du capteur isolant en laine de verre. Cependant, il est recommandé d'utiliser du bois de dattier car il s'agit d'un déchet naturel et non dangereux. D'un point de vue économique, l'isolation en bois de palmier dattier est préférée, car elle est disponible et pourrait être une gratification par rapport à d'autres matériaux d'isolation thermique coûteux tels que les laines de verre.

---

**CHAPITRE V**

**ETUDE EXPÉRIMENTALE DU SÉCHAGE**

**SOLAIRE**

---

## V.1. Introduction

La tomate (*lycopersicum esculentum* ou *solanum lycopersicum*), est une plante herbacée de la famille des solanacées comme la pomme de terre. C'est une source de vitamines C, le rôle que joue la vitamine C dans l'organisme va au-delà de ses propriétés antioxydants. Elle contribue aussi à la santé des os, des cartilages, des dents et des gencives. La tomate contient également des minéraux et oligoéléments essentiels (potassium, calcium, magnésium, cuivre, manganèse et zinc) qui aident à chasser la fatigue [130]. La tomate doit sa couleur rouge au bêta carotène et au lycopène. Le premier est un pigment caroténoïde qui a la propriété de protéger les cellules contre les attaques des radicaux libres, responsables du vieillissement. Le second est un antioxydant qui aide à réduire les risques de cancer (notamment de la prostate) et maladies cardio-vasculaires [131]. La tomate est le légume le plus généralement commercialisé au monde. La production de tomate au monde a atteint environ 128 millions de tonnes [132], l'Algérie a produit environ 1300 milles tonnes de tomates en 2018 [133].

La surproduction pendant la période de récolte et la surabondance du produit dans le marché engendrent la réduction du prix de la tomate. Cette dernière est très périssable à l'état mûr, ce qui implique une perte assez conséquente pendant la période de récolte d'où un déséquilibre entre l'offre et la demande. Par conséquent, un besoin accru se fait sentir pour augmenter la durée de vie de la tomate en procédant au séchage ou à d'autres procédés de conservation [8].

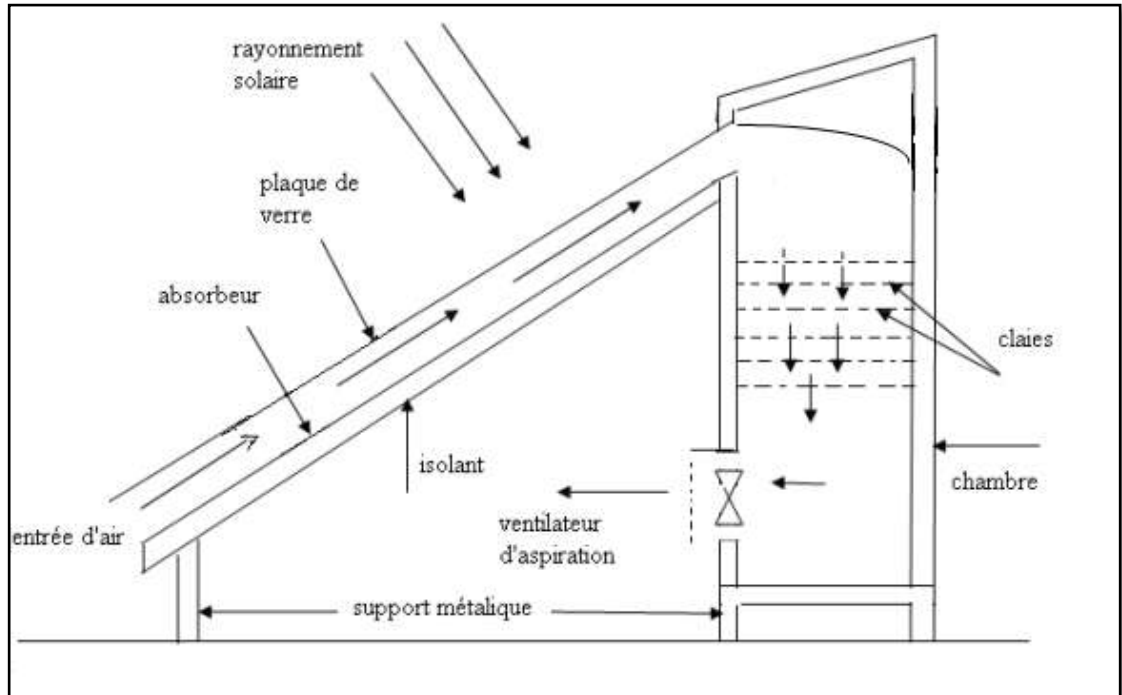
Les méthodes traditionnelles du séchage de fruits et de légumes consistent à exposer les produits au rayonnement direct des rayons solaires. Cette technique est facile et non coûteuse, mais elle a besoin d'un temps de séchage qui peut avoir des conséquences défavorables sur la qualité du produit : le produit final peut être souillé de la poussière et des insectes ou souffrir de l'enzyme et de l'activité microbienne [134]. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, des dispositifs de séchage fonctionnant à partir d'énergies diverses ont été mis au point. Parmi ces dispositifs, les séchoirs solaires s'avèrent être une solution particulièrement intéressante dans les zones rurales en raison de leur relative simplicité d'utilisation.

A cet effet, le séchoir installé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (L E N R E Z A) à l'université de Ouargla est un séchoir solaire indirect à convection forcée.

Dans cette étude, un séchoir a été développé pour le séchage de tomate. Dans le système de séchage mis au point, il a été particulièrement comprenant un matériel de stockage de la plaque d'absorption fin d'améliorer le processus de séchage. Le sable est utilisé comme matériau de stockage. Des expériences de séchage ont été réalisées avec et sans matériel de stockage. De l'autre côté, un séchoir solaire équipé de réflecteurs plats droit - gauche, pour maximiser l'énergie solaire incidente sur le séchoir. Les courbes de taux d'humidité obtenues avec ces expériences ont été comparées aux dix différentes équations du rapport d'humidité dans la littérature et le modèle présentant le résultat le plus approprié a été déterminé.

## V.2. Description du système de séchage

Le dispositif utilisé est schématisé sur la Figure (V-1), c'est un séchoir solaire indirect à convection forcée, a été concocté localement avec des matériaux locaux il est composé de deux parties principales : un capteur solaire et une chambre de séchage.



**Figure V.1** : Schéma descriptif du système de séchage

### V.2.1. Le capteur solaire

C'est un capteur solaire plan à air à simple circulation et à simple vitrage dont la configuration est parallélépipédique (2,45 m x 1 m) transforme le rayonnement solaire en énergie thermique. Il est constitué d'un absorbeur en tôle galvanisée de (0.002 m) d'épaisseur peinte en noire mate. Il est recouvert aussi d'une plaque de verre d'épaisseur 0,005m. Les cotés latéraux et les parties inférieures sont isolés thermiquement avec le polystyrène. L'air y circule entre la vitre et l'absorbeur.

Le capteur est incliné d'un angle de  $31^{\circ}$  (latitude de la ville d'Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud.

### V.2.2. La chambre de séchage

Le caisson de dessiccation est une unité de longueur (1 m), de largeur (0.60 m) et de hauteur (2 m). Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polystyrène. Le caisson contient :

- Un aspirateur de marque (KFA -30A, P= 40 W) de 20 cm de diamètre avec un débit d'air réglable à l'aide d'une vanne, (de vitesse 1400 tours/min, débit volumique  $0,325 \text{ m}^3/\text{s}$ ) est fixé à la sortie du caisson pour évacuer vers l'extérieur l'air humidifié par l'évaporation de l'eau des produits.
- Six claies en grillage galvanisé, chacune de surface  $0,4 \text{ m}^2$  avec possibilité de contenance du caisson jusqu'à huit claies; ces dernières sont distantes les unes des autres de 0,12 m. La masse de produit à sécher contenue sur chaque claie est dans notre cas égal à 2 kg, avec un flux de  $0,0470 \text{ m}^3/\text{s}$ . La masse de produit que peut sécher un séchoir dépend de la densité de produit étalée sur chaque claie [135]. La capacité de notre prototype est de 9,6 jusqu'à 12,8 kg de produit à sécher.

### V.3. Fonctionnement du système

L'air frais capté de l'extérieur est préalablement chauffé dans le capteur solaire, le contact air absorbeur ainsi que le transfert convectif permet d'élever la température de l'air. Ce dernier arrive à l'entrée de l'armoire de séchage et traverse les claies.

L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse les claies superposées et l'évacue vers l'extérieur.

L'étude expérimentale, entreprise sur ce séchoir, consiste en la mesure systématique :

- Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en  $\text{W}/\text{m}^2$  à l'aide d'un solarimètre (MGE de type DS 120 avec incertitude  $\pm 5\%$ ) et ceci durant la journée de l'expérience.
- Des températures à l'aide des thermocouples de type K (chromel-alumel) (0, 2 mm de diamètre: incertitude  $\pm 2\%$ ) reliés à un appareil ((Modèle: NI cDAQ -9174): incertitude  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ). Les mesures sont prises dans plusieurs endroits : à l'entrée, sortie du capteur solaire, du milieu ambiant (extérieur), au niveau du produit à sécher et avant la claie portant le produit à sécher.



- La vitesse de l'air asséchant est mesurée à l'entrée et sortie du capteur solaire, à la sortie du caisson de dessiccation. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre (Testo modèle 445: incertitude  $\pm 0,03 \text{ m.s}^{-1}$ ). L'appareil Testo 445 à affichage numérique.
- Des pesées systématiques des produits séchés à l'aide d'une balance de précision 0.01 g.

### V.3.1. Préparation du sable

Avant toute expérimentation, le sable alluvial utilisé doit être nettoyé de toutes les impuretés et classé en différentes tailles. Ceci a été réalisé suite aux étapes de traitement: Les sables ont été apportés de la région El-Oued (la zone est située dans une zone chaude et sèche à  $33^\circ 30'$  de latitude Nord et  $6^\circ 47'$  Est de longitude). En utilisant des tamis de différentes tailles, le sable a été classé selon sa taille en trois catégories. Le diamètre moyen des grains de sable des variétés de sable utilisées était de 0,16 mm. La catégorie de sable a ensuite été traitée comme suit:

- 1- Lavé à l'eau distillée, puis
- 2- Avec de l'acide chlorhydrique (HCl 10%),
- 3- Ensuite, il est lavé à nouveau avec de l'eau distillée pour éliminer toute trace de HCl,
- 4- Ensuite, mettre dans un four électrique réglé à une température de  $500^\circ\text{C}$  pour éliminer les impuretés restantes,
- 5- Enfin, le sable pur est peint avec de la peinture mate noire et laissé sécher à l'ombre.

### V.3.2. Conception du concentrateur

Le réflecteur solaire plan se compose généralement de : cadre métallique de forme rectangulaire, deux feuilles d'aluminium polies avec une réflectance de 0,8 a été fixée au cadre pour former la surface réfléchissante plane qui ont été montés sur les deux côtés du capteur, comme représenté sur la Photo (V-1). La surface réfléchissante est de  $2,45 \text{ m}^2$  ( $2,45 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ) c'est la même surface que celle du capteur solaire. Les expériences ont été réalisées, avec ou sans réflecteurs, pour analyser le changement d'efficacité dans les deux conditions.



**Photo (V-1):** Photographie du capteur solaire plan avec réflecteur.

## **V.4. Séchage de la tomate**

### **V.4.1. Préparation du produit**

La tomate a été achetée fraîche du marché local et choisie d'une façon homogène pièce par pièce en utilisant trois critères qui sont la dimension (taille moyenne), le degré de maturation (ni crue ni trop mur), et la morphologie externe (surface saine sans fissure).

Une fois lavée manuellement avec de l'eau fraîche pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations; elle est découpée en rondelles de 1 cm d'épaisseur puis étaler sur les claies.

### **V.4.2. Détermination de la masse sèche du produit**

La détermination de la masse sèche du produit s'effectue à l'aide d'un analyseur d'humidité de type SARTORIUS MA. Après la préparation d'un échantillon de tomate de 45 g, on l'introduit dans l'analyseur d'humidité. Cet appareil est réglé à une température de 70°C [136], elle s'arrête automatiquement dès que la masse devient constante. L'analyseur est équipé d'une balance à affichage numérique de précision 0,001 g qui mesure la masse du produit durant le fonctionnement de l'appareil. L'expérience a été refaite trois fois pour chaque échantillon pour minimiser les erreurs. Une valeur moyenne d'humidité relative trouvée est de 93,24% ( $\pm 0,9$ ).

### **V.4.3. Protocole expérimental**

Des expériences de séchage ont été réalisées avec et sans matériaux de stockage de chaleur sur le capteur solaire (le sable est utilisé comme matériau de stockage), la deuxième

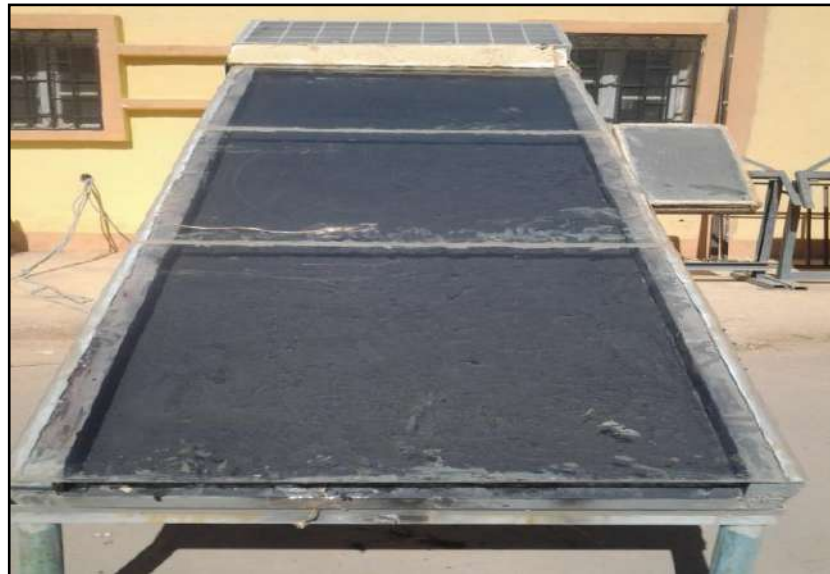
expériences ont été réalisées, avec un séchoir solaire équipé de réflecteurs plats à droite et à gauche du capteur solaire.

✓ **La première série**

La première série consistait à étudier les expériences de séchage sans matériaux de stockage de chaleur sur l'absorbeur et sans réflecteurs.

✓ **La deuxième série**

L'objectif de cette série consistait à laminier la surface de l'absorbeur par de fines couches de sable traitées et noircies en tant que matériaux de stockage de chaleur. La masse de la couche de sable sur l'absorbeur était maintenue à 1000 g, alors que la taille des grains étaient fixes et celle choisie avait un diamètre de 0,16 mm.



**Photo (V-2):** Photographie du capteur solaire plan avec une couche de sable sur l'absorbeur.

✓ **La troisième série**

Dans la troisième série nous avons étudié l'influence du sable et du réflecteur coté droit, sur la performance du séchoir solaire.



**Photo (V-3):** Photographie du capteur solaire plan avec un réflecteur sur le coté droit.

✓ **La quatrième série**

Dans la quatrième série nous avons étudié l'influence du sable et du réflecteur coté gauche, sur la performance du séchoir solaire.



**Photo (V-4):** Photographie du capteur solaire plan avec un réflecteur sur le coté gauche.

✓ **La cinquième série**

Dans la cinquième série, Nous avons comparé les performances d'un séchoir avec du sable sur l'absorbeur avec un autre séchoir identique mais contenant du sable sur l'absorbeur avec réflecteurs à les deux cotés du capteur plan.



**Photo (V-5):** Photographie du capteur solaire plan avec des réflecteurs sur les cotés droit - gauche.

L'épaisseur d'échantillon (Tomate) approximativement égale à 1 cm, et pour une vitesse de l'air de séchage 1,5 m/s. La masse de l'échantillon au niveau de la claie est de 2000 g.

L'humidité initiale mesurée est d'environ 93,24%, le séchage se produit jusqu'à une humidité finale de 13% [136] en prélevant la perte d'humidité chaque 60 minutes, au moyen d'un balance numérique (incertitude  $\pm 0.001$  g). En plus les mesures de température, du rayonnement, et de la vitesse sont effectuées chaque 30 minute.

Les expériences de séchage ont été effectuées pendant les périodes de l'année (Janvier – Février 2016 - 2017) dans les conditions climatiques de Ouargla, chaque expérience commence à 9 h et se termine à 17 h.

Après 17 h, les échantillons sont stockés dans des boîtes en plastique hermétiques et placés dans un réfrigérateur pendant la nuit afin d'empêcher la fermentation et garder leur états pour la continuité de l'opération de séchage le lendemain. A la fin de l'opération, les échantillons secs sont laissés se refroidir à la température ambiante et puis scellés dans des sacs en plastique.

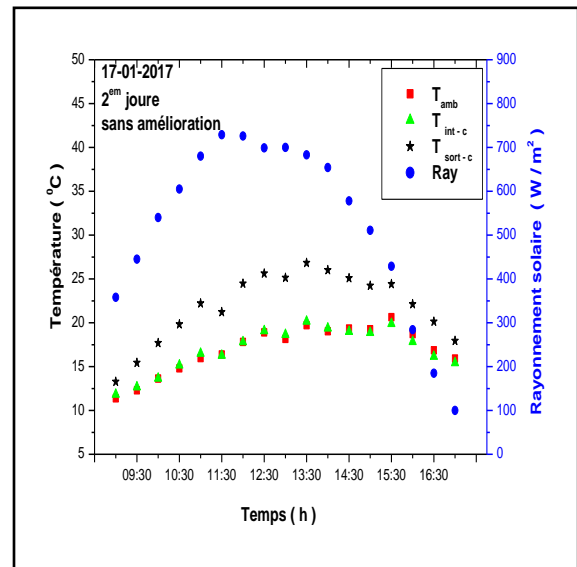
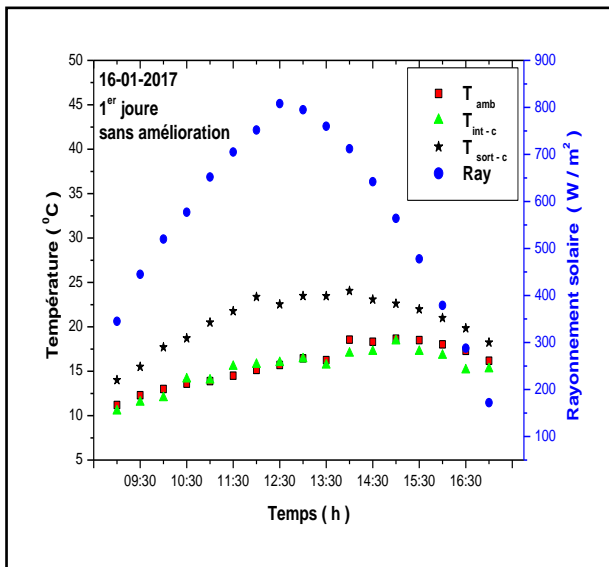
## V.5. Résultats expérimentaux

### V.5.1. Effet du rayonnement sur la température

Les Figures. (V.2), (V.3), (V.4), (V.5) et (V.6) montrent la variation journalière de la température de l'air ambiant, la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, et les rayonnements solaires en fonction du temps. On remarque que l'allure des températures est identique à celle du rayonnement solaire.

Durant un jour de l'expérience à Ouargla, les valeurs moyennes quotidiennes de la température de l'air ambiant, la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur et le rayonnement solaire varient respectivement de 11,37-20,63°C, 11,82-20,16°C, 14 – 24,04°C, 345 – 808 w/m<sup>2</sup>. Elles atteignent des valeurs maximales entre 12 h et 14 h.

En outre, il y avait une différence significative entre les valeurs de la température à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, cette différence de températures varie de 10,04 à 29,26°C durant la durée de l'expérience. L'écart est dû à l'influence du rayonnement solaire sur l'absorbeur et à l'effet de serre qui en résulte entre l'absorbeur et la vitre, jouant un rôle important dans l'échauffement de l'air circulant à l'intérieur du capteur solaire.



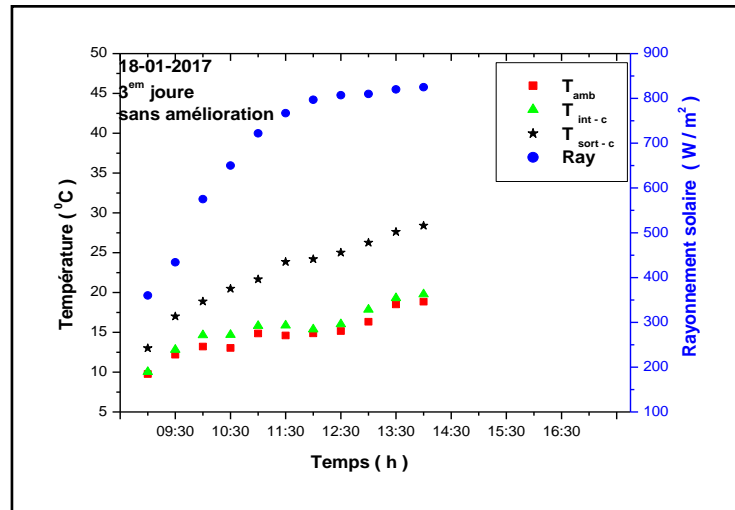


Figure V.2 : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (sans amélioration).

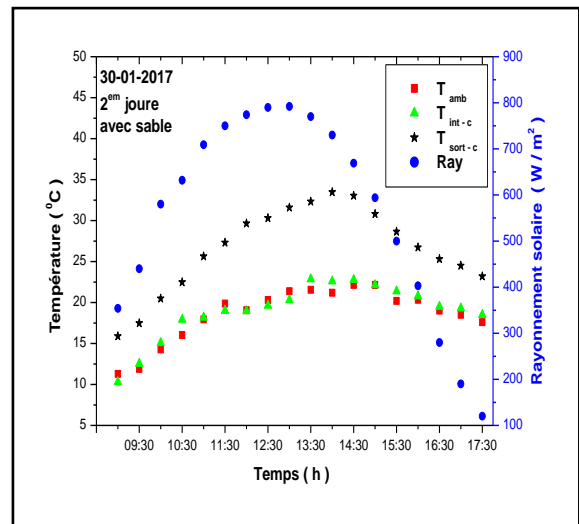
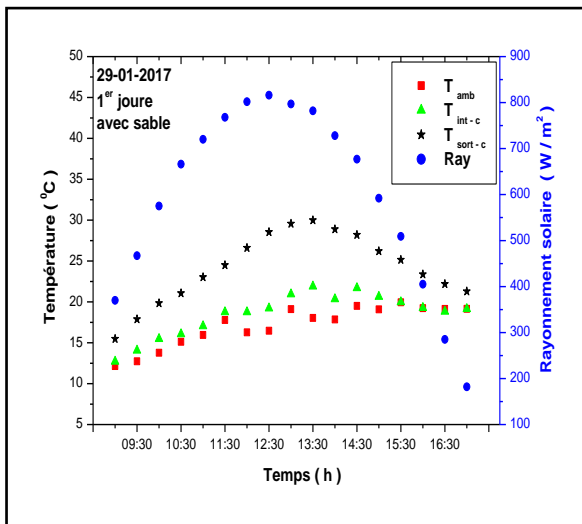


Figure V.3 : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable).

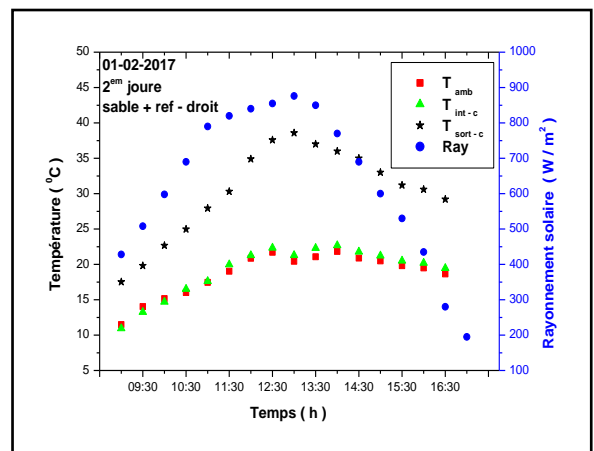
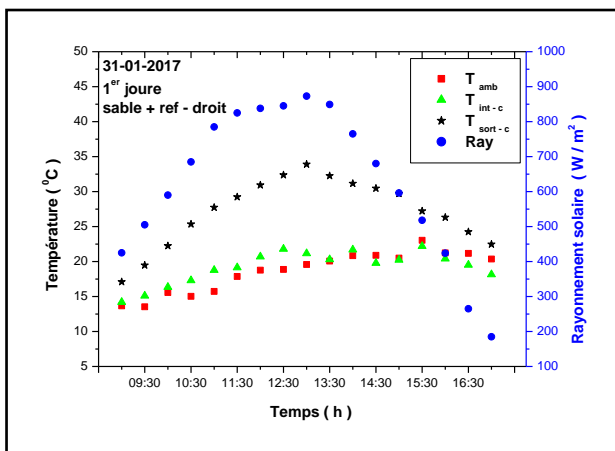
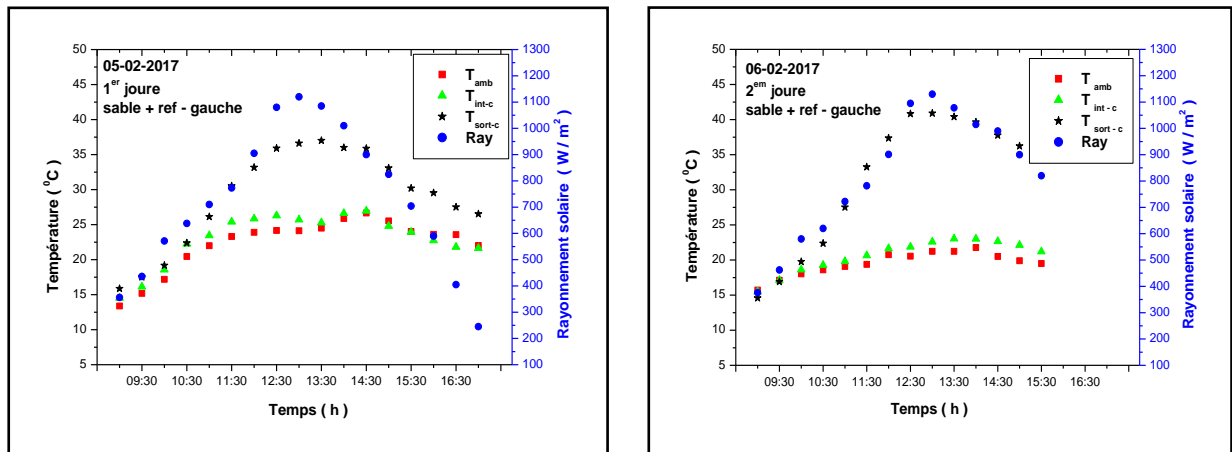
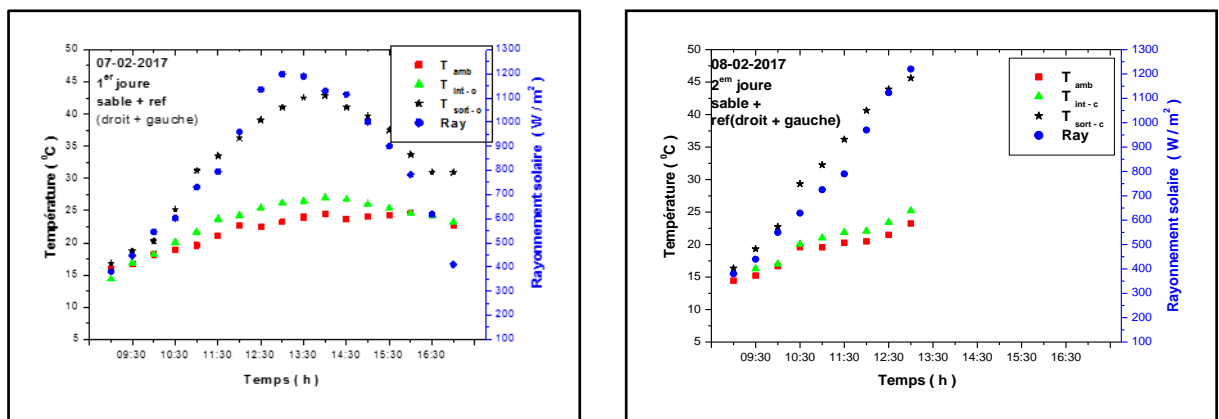


Figure V.4 : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable + réflecteur droit).





**Figure V.5 :** Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable + réflecteur gauche).



**Figure V.6 :** Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps (avec sable + réflecteur droit - gauche).

### V.5.2. Profil des températures du produit et de l'air asséchant

L'évolution des températures de l'air asséchant, à l'entrée de l'armoire de séchage et la température centrale d'un échantillon de tomate, en fonction du temps de séchage, pour les différentes expériences, est représentée sur les Figures (V.7), (V.8), (V.9), (V.10) et (V.11).

On peut voir qu'après une augmentation rapide et continue de la température du produit au début de l'expérience due à un gradient important de température entre le milieu asséchant et le produit ; la température du produit croît très lentement et ceci à cause de l'extraction difficile des molécules d'eau qui sont liées dans la structure interne du produit.

Enfin de nouveau, la température du produit croît rapidement jusqu'à atteindre la température de l'air asséchant lorsque le produit est complètement séché.



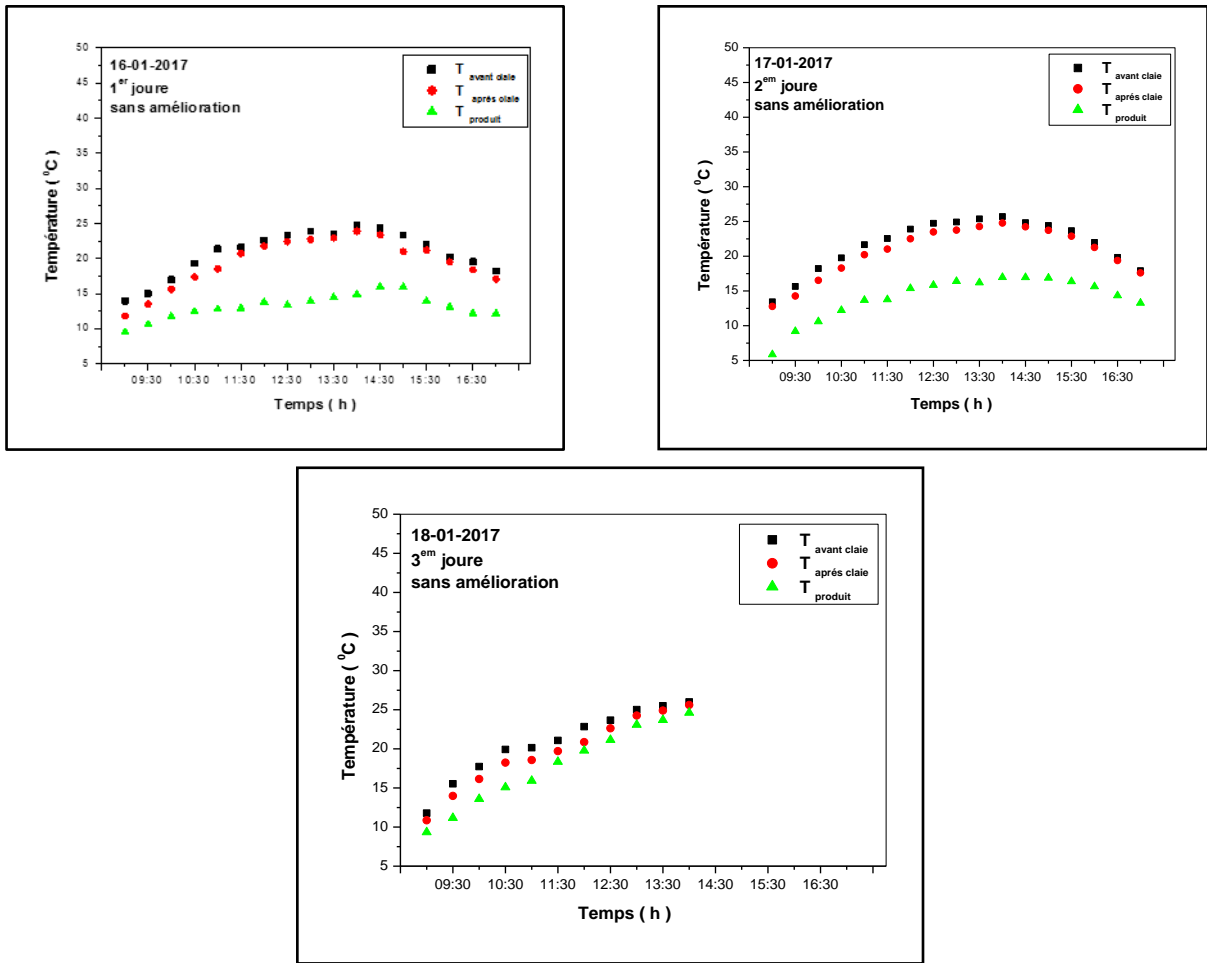


Figure V.7 : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (sans amélioration).

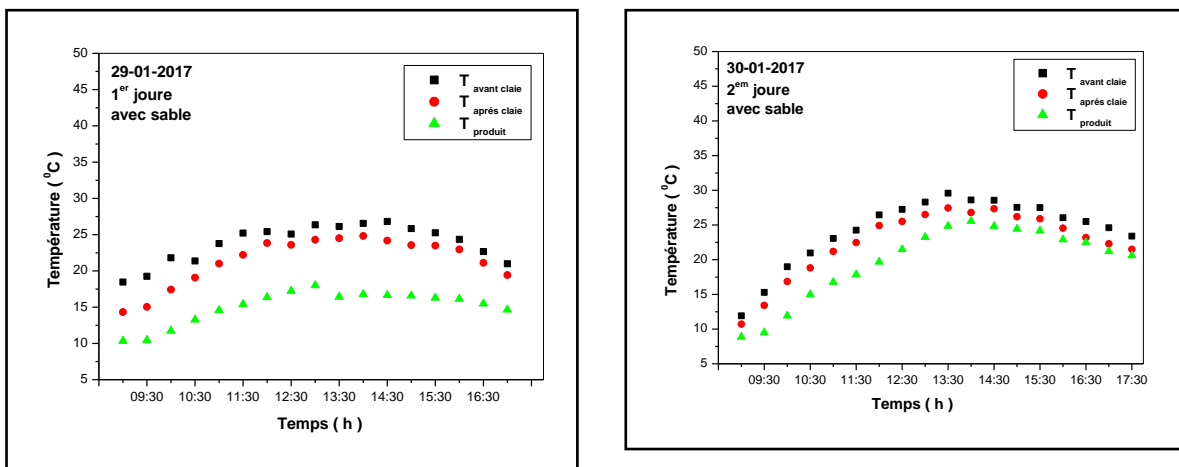


Figure V.8 : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable).

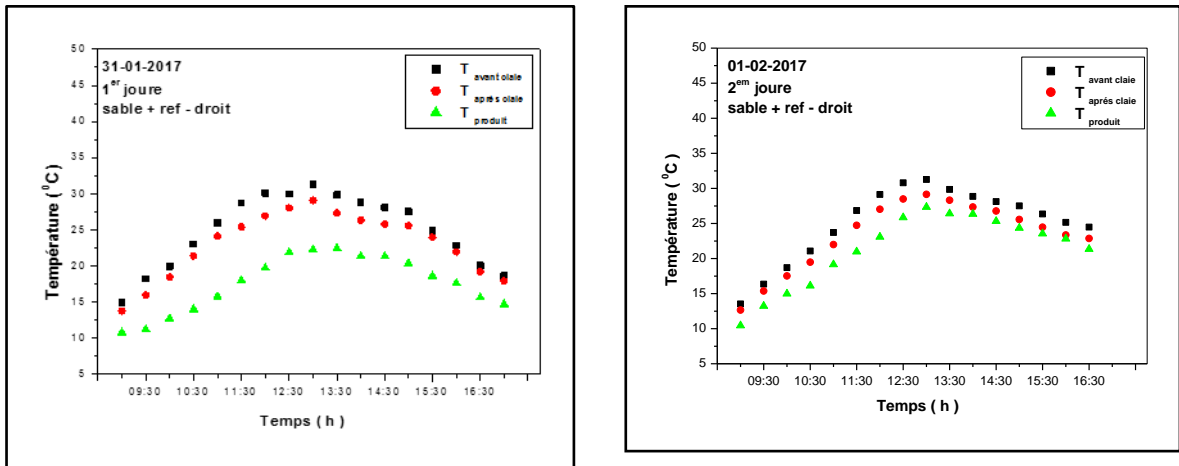


Figure V.9 : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable + réflecteur droit).

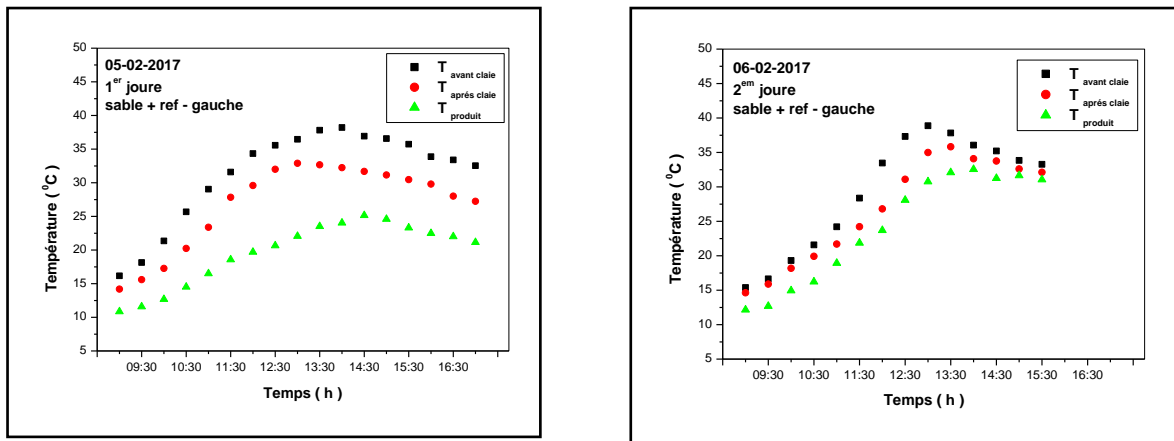


Figure V.10 : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable + réflecteur gauche).

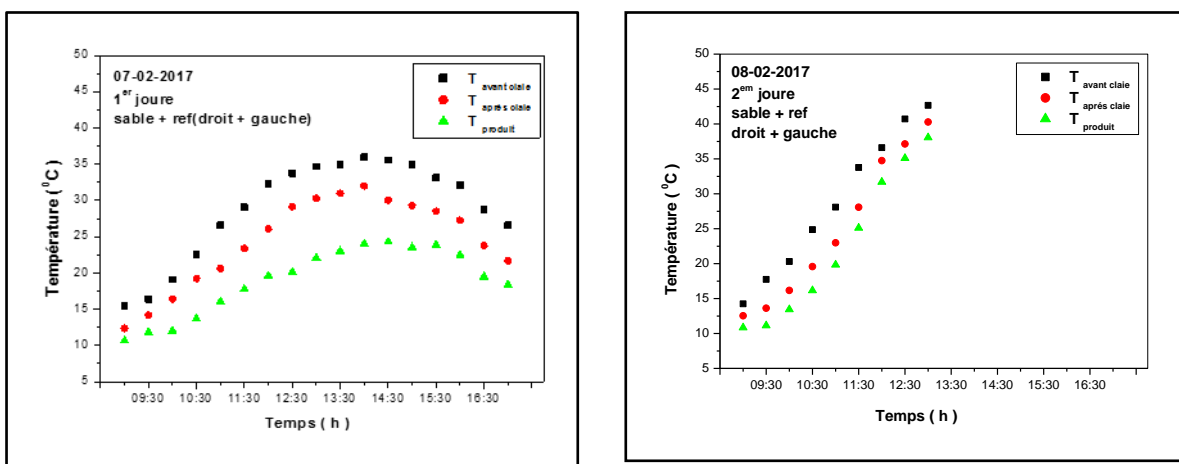


Figure V.11 : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage (avec sable + réflecteur droit + gauche).

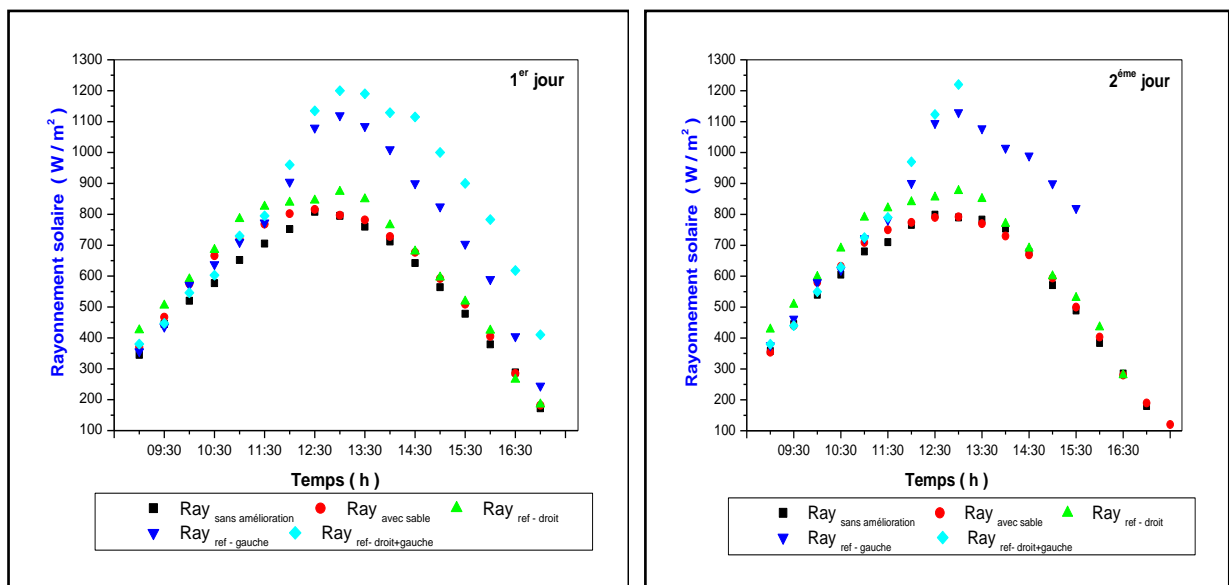
de séchage (avec sable + réflecteur droit - gauche).

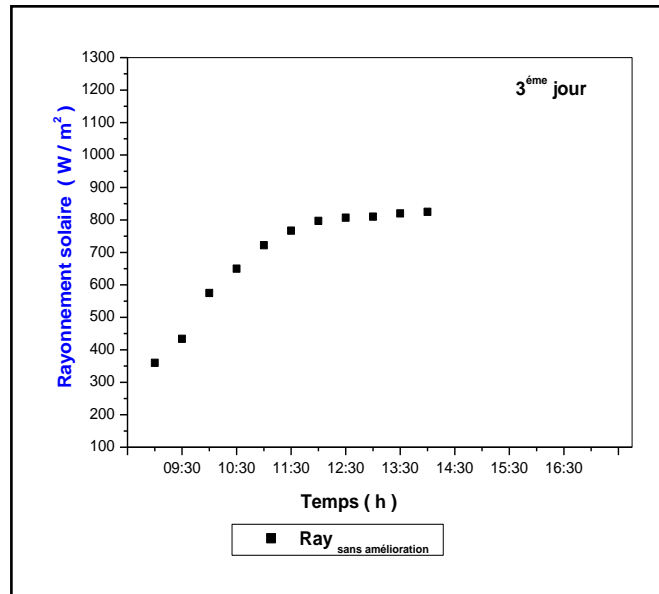
### V.5.3. Variations du rayonnement solaire

Les Figures (V.12), montrent la variation journalière des rayonnements solaires en fonction du temps.

Dans ces courbes, nous observons qu' en utilisant le réflecteur du côté droit du capteur solaire , il y a une différence entre le rayonnement solaire sans réflecteur et le rayonnement solaire avec le réflecteur, en particulier pendant la période du matin (9 h - 14 h), les rayonnements solaires varient entre 354-760 w/m<sup>2</sup> et 425-849 w/m<sup>2</sup>, respectivement après 14 h Nous remarquons que le rayonnement solaire lors de l'utilisation du réflecteur est similaire au rayonnement solaire sans l'utilisation du réflecteur parce que le soleil dans cette période est derrière le réflecteur. Lors de l'utilisation du réflecteur coté gauche du capteur solaire, nous remarquons qu'il n'y a pas de différence dans la période du matin et la différence commence à partir de 12 h où le rayonnement varie entre 245-1120 w/m<sup>2</sup>. Dans le cas où nous utilisons les réflecteurs des deux cotés (droit- gauche), nous remarquons l'existence d'une différence significative à partir de 11h jusqu'à la fin de l'opération. la variation du rayonnement se situe entre 410-1200 w/m<sup>2</sup>; ceci est conforme aux résultats présentés par Hiroshi Tanaka [137], Ljiljana T. Kostić [138], Zoran T. Pavlović [139], Hiroshi Tanaka [140], Lj.T. Kostic et al. [141], Faezeh Ketabchi et al. [142], Naveed ur Rehman [143] .

On peut voir que les conditions d'ensoleillement et le rayonnement solaire ambiant plus élevé conduisent à une efficacité accrue du concentrateur sur la réduction du temps de séchage.





**Figure V.12 :** Variations du rayonnement solaire en fonction du temps.

#### V.5.4. Variation de la température de sortie des capteurs

La Figure. (V.13) montre la variation de la température de sortie pour tous types des capteurs solaires. La température maximale de sortie du capteur sans réflecteur et sans sable était de  $24,04^{\circ}\text{C}$  à 14h00 et la température maximale à la sorti du capteur avec sable, le capteur avec réflecteurs à droite, le capteur avec réflecteurs à gauche et le capteur avec réflecteurs à droite - gauche est de  $29,98^{\circ}\text{C}$  -  $33,89^{\circ}\text{C}$  -  $37^{\circ}\text{C}$  -  $42,87^{\circ}\text{C}$  respectivement. D'après la Figure. (IV.13), il est évident que l'utilisation de réflecteurs à augmenter la température de l'air à la sorti du capteur, comparé au capteur sans réflecteurs en raison de l'augmentation de les rayonnements solaires et l'utilisation de sable était un autre facteur responsable des valeurs plus élevées de la température à la sorti du capteur.

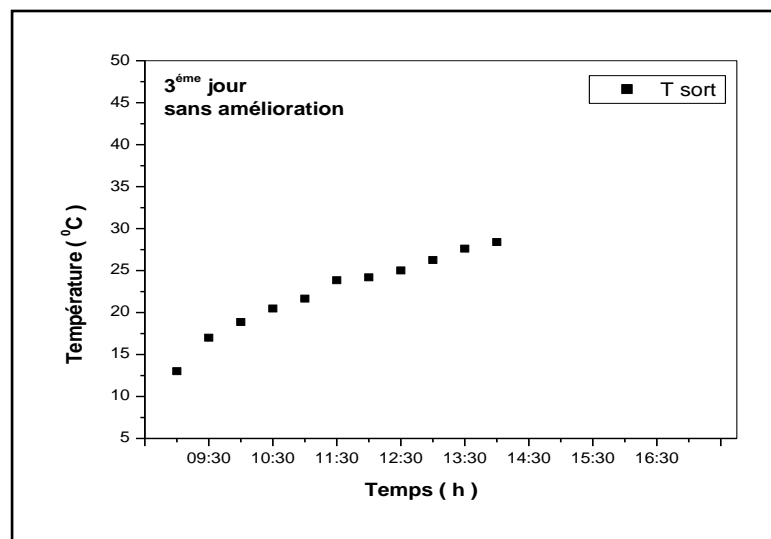
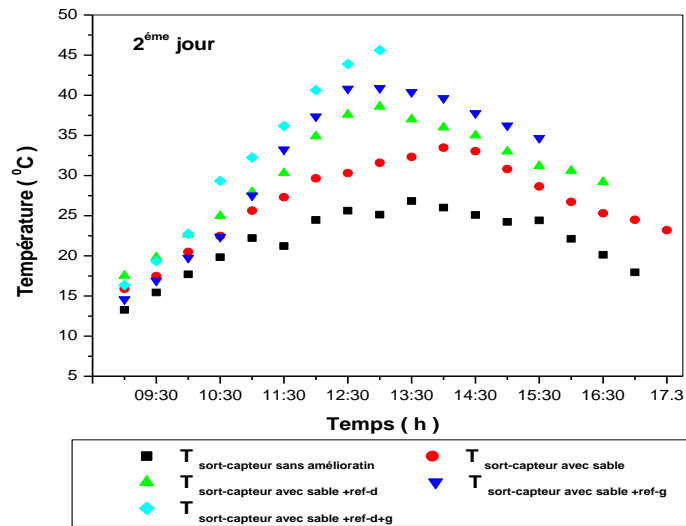
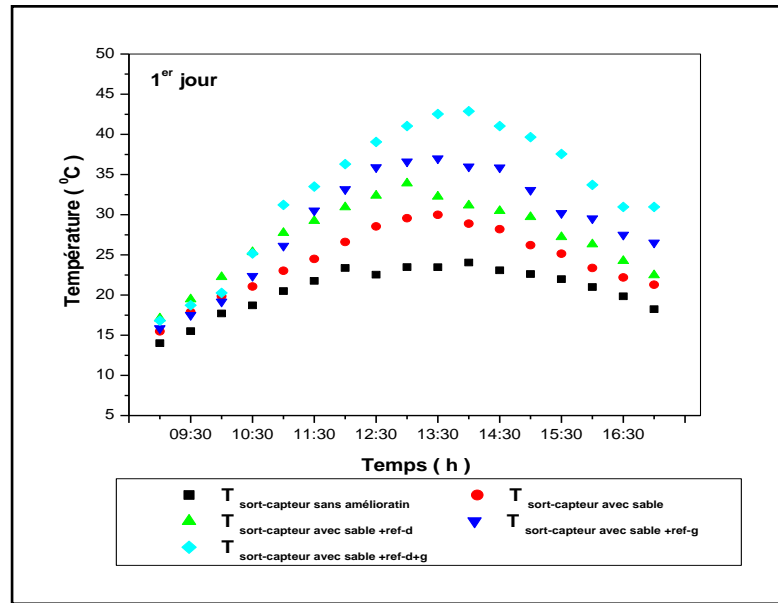


Figure V.13 : Variation de la température de l'air de sortie avec le temps de tous les cas du capteur.

## V.6. Caractéristiques de séchage

### V.6.1. Variation de la teneur en eau

La variation de la teneur en eau  $X_a$ , avec le temps de séchage pour les différentes expériences avec:

- capteur sans sable à la surface de l'absorbeur et sans réflecteur aux cotés (sécheur de contrôle),
- capteur contenant la couche de sable et le réflecteur côté droit
- capteur contenant la couche de sable et le réflecteur côté gauche.
- capteur contenant la couche de sable et le réflecteur côté droit et gauche.

Lors du séchage de 2 kg de tomates sont représentés sur les Figures (V.14), (V.15).

Les tranches de tomate de teneur en humidité initiale environ 93,24% (W.b) ont été séchées à la teneur en humidité finale environ de 13% (W.b).

D'après l'allure des courbes (V.14), (V.15) on remarque au début du séchage une migration rapide de l'humidité du produit vers l'extérieur (pente de la courbe très importante au début du processus de séchage) cette pente diminue au fur et à mesure que le temps de séchage augmente. Il est beaucoup plus difficile d'extraire l'eau liée que l'eau libre. Il est clair et évident que sur ces figures, la teneur en eau diminue sans interruption avec le temps de séchage.

On remarque par exemple, que le capteur solaire contenant la couche de sable à la surface de l'absorbeur a engendré une diminution du temps de séchage à environ 21,42% par rapport à un capteur de contrôle (sans sable et sans réflecteur).

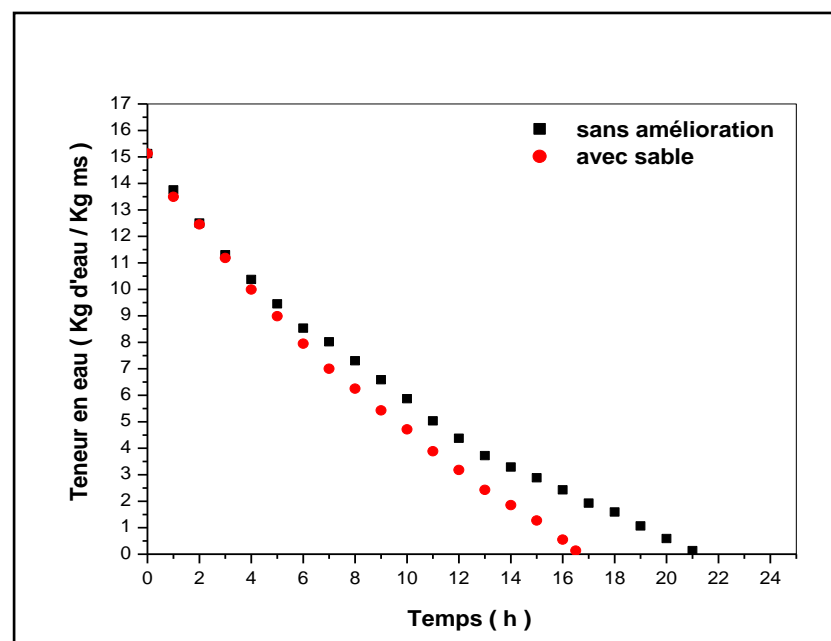
D'autres essais de séchage: Montrent qu'un séchoir contenant la couche de sable à la surface de l'absorbeur ainsi qu'un réflecteur sur son coté droit, comparativement au même séchoir avec couche de sable sur l'absorbeur et réflecteur coté gauche diminue le temps de séchage à environ 26,19% et 30,95% respectivement par rapport au temps imparti au séchage avec un capteur de contrôle. Les tomates dans le séchoir avec un capteur solaire contenant la couche de sable à la surface de l'absorbeur et le réflecteur aux côtés droit – gauche ont atteint le niveau d'humidité de 13% (W.b) à 09 h, soit 42,85% plus vite que celles du séchoir de contrôle. Ceci est dû à une augmentation du transfert thermique entre l'air et le produit à

sécher. L'air chauffe le produit, en augmentant sa pression de vapeur, ce qui engendre un écart de pression partielle de vapeur d'eau entre l'air et le produit amenant à une accélération de la migration d'humidité dans le produit, ce qui favorise l'évaporation de l'eau du produit.

On remarque que le réflecteur influe d'une façon considérable sur le temps de séchage ; ceci est conforme aux résultats présentés par James Stiling et al.[144], Blake Ringeisen et al. [145], Gülsah, akmak et al. [146].

De cette tendance, on peut voir que les conditions d'ensoleillement et le rayonnement solaire plus élevé conduisent à une efficacité accrue du réflecteur sur la réduction du temps de séchage, et les réflecteurs peuvent encore être efficaces lorsque la température ambiante et l'humidité relative ne sont pas favorables. L'utilisation du réflecteur a entraîné une température moyenne plus élevée dans le séchoir dans tous les cas en comparant le séchoir couplé avec le réflecteur au séchoir de contrôle, tout en ayant des réductions plus faibles du temps de séchage. Des tendances similaires sont tirées Subarna Maiti et al. [147].

Le meilleur procédé de séchage c'est d'extraire l'humidité en vitesse, si non la moisissure va prendre le dessus c'est-à-dire le produit moisira avant qu'il se séchera. Mais pas trop vite une croûte risque alors de se former en surface empêchant l'eau de sortir, ni à très haute température le produit se dénature et noircit. Il faut prendre en considération les caractéristiques et les propriétés du produit.



**Figure V.14 :** Influence de la couche de sable à la surface de l'absorbeur de capteur sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.

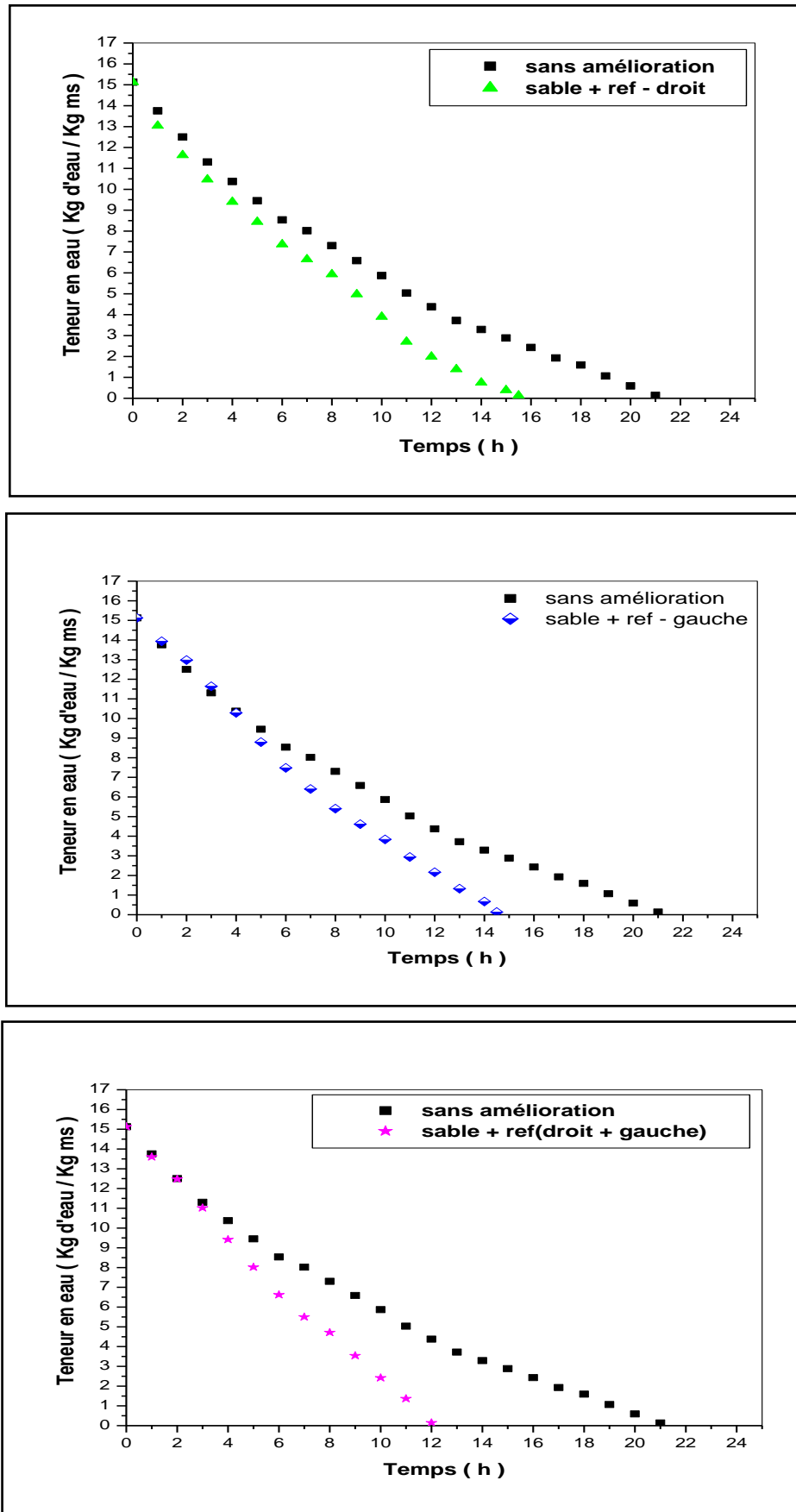


Figure V.15 : Influence de réflecteur aux côtés de capteur sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.



### V.6.2. Cinétique de séchage

La Figures (V.16) montrent les variations de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage et en fonction de la teneur en eau du produit des échantillons de tomates au séchage avec capteur sans sable à la surface de l'absorbeur et sans réflecteur (séchoir de contrôle), tandis que l'autre capteur reste avec la couche de sable et le réflecteur sur la droite, capteur contenant la couche de sable et le réflecteur de la gauche, et capteur contenant la couche de sable et le réflecteur sur les côtés droit et gauche.

On note d'après les Figures (V.16) ci-dessus que seule la phase de séchage à allure décroissante est mise en évidence dans ce genre de produit agroalimentaire, ceci s'explique: par l'absence de l'eau libre à la surface du produit et aussi à la structure de ce dernier. En plus l'utilisation de la couche de sable à la surface de l'absorbeur de capteur et de réflecteur aux cotés du capteur engendre généralement une augmentation de la vitesse de séchage notamment au début de l'opération de séchage.

Ce résultat indique probablement que le mécanisme de diffusion est le mécanisme physique le plus susceptible qui régit le mouvement d'humidité dans ces échantillons. Néanmoins, vers la fin de l'opération, l'influence de ces paramètres est complètement anéantie pour les basses teneurs en eau du produit, voir les courbes ci-dessus donnant la variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit, ceci s'explique par le fait que presque la totalité des molécules d'eau libres et liées ont été évaporées et reste que les molécules d'eau liées à la structure même du produit qui ne sont pas concernées par l'opération de séchage.

Ces résultats sont conformes aux différents travaux réalisés avec les produits agricoles Hadi Samimi-Akhijahani et al. (2018) [148], Mohamed Yacine Nasri et al. (2018) [149], Zaineb Azaizia (2017) [150], Rachida Ouaabou et al. (2017) [151], Lyes Bennamouna et al. (2015) [152].

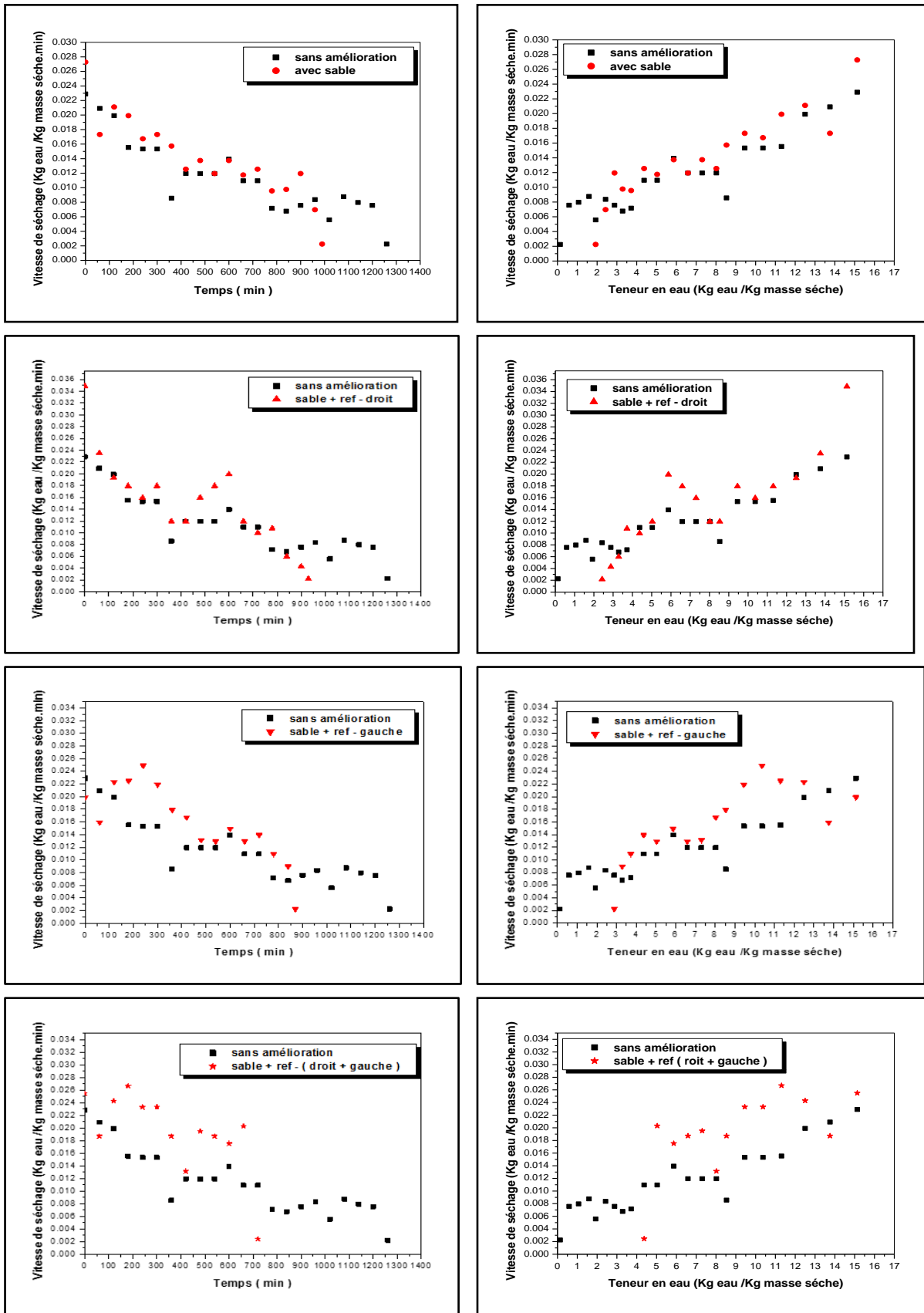


Figure V.16 : Variation de la vitesse de séchage en fonction de la durée de séchage et de la teneur en eau du produit.

### V.7. modèles théoriques appropriés pour le processus de séchage

La régression linéaire au sens des moindres carrées a été employée pour évaluer les paramètres des différents modèles théoriques Tableaux (III.2) en utilisant le programme origine. La qualité de l'ajustement a été déterminée en utilisant les paramètres statistiques  $R^2$  et  $\chi^2$  (paramètres décrits dans III.12.1. chapitre III). Le meilleur modèle est celui ayant un coefficient de corrélation maximum qui tend vers 1 et une erreur standard minimum qui tend vers 0.

**Tableau V.1:** Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes expériences.

Nom du modèle	Les expériences	Constant du model	$R^2$	$\chi^2$
Lewis	Sans amélioration	K = 0.1067	0.97687	0.00206
	Avec sable	K = 0.1253	0.96527	0.00332
	Avec réflecteur droit	K = 0.14141	0.95919	0.00398
	Avec réflecteur gauche	K = 0.13502	0.94718	0.00567
	Avec réflecteur (droit – gauche)	K = 0.15181	0.94421	0.00583
Henderson and Pabis	Sans amélioration	a = 1.04258 K = 0.11148	0.97957	0.00191
	Avec sable	a = 1.05789 K = 0.13288	0.97032	0.00301
	Avec réflecteur droit	a = 1.04203 K = 0.14746	0.96178	0.00398
	Avec réflecteur gauche	a = 1.09814 K = 0.14873	0.96088	0.0045
	Avec réflecteur (droit – gauche)	a = 1.08233 K = 0.16547	0.95537	0.00509
Page	Sans amélioration	K = 0.06402 n = 1.21886	0.98947	0.00098
	Avec sable	K = 0.06365 n = 1.31379	0.98763	0.00126
	Avec réflecteur droit	K = 0.07763 n = 1.28822	0.97785	0.00231
	Avec réflecteur gauche	K = 0.04777 n = 1.50596	0.99317	0.00079
	Avec réflecteur (droit – gauche)	K = 0.05923 n = 1.49791	0.98861	0.0013
Medifed page	Sans amélioration	K = 0.10484 n = 1.22113	0.98947	0.00098
	Avec sable	K = 0.12287 n = 1.31662	0.98763	0.00126
	Avec réflecteur droit	K = 0.13749 n = 1.29225	0.97786	0.0023
	Avec réflecteur gauche	K = 0.13271 n = 1.5086	0.99317	0.00079

	Avec réflecteur (droit – gauche)	$K = 0.15154$ $n = 1.5009$	0.98861	0.0013
Logarithmique	Sans amélioration	$a = 1.35333$ $K = 0.06025$ $C = - 0.36969$	0.99899	0.0001
	Avec sable	$a = 1.62557$ $K = 0.05546$ $C = - 0.63765$	0.9995	0.00005
	Avec réflecteur droit	$a = 1.66431$ $K = 0.05711$ $C = - 0.69657$	0.99683	0.00035
	Avec réflecteur gauche	$a = 1.906$ $K = 0.05267$ $C = - 0.88342$	0.99819	0.00022
	Avec réflecteur (droit – gauche)	$a = 2.68165$ $K = 0.03868$ $C = - 1.67588$	0.9988	0.00015
Two-terme	Sans amélioration	$a = 0.5213$ $K_0 = 0.11148$ $b = 0.5213$ $K_1 = 0.11148$	0.97957	0.00212
	Avec sable	$a = 0.52893$ $K_0 = 0.13287$ $b = 0.52893$ $K_1 = 0.13287$	0.97032	0.00344
	Avec réflecteur droit	$a = 0.521$ $K_0 = 0.14745$ $b = 0.521$ $K_1 = 0.14745$	0.96178	0.00459
	Avec réflecteur gauche	$a = 0.54907$ $K_0 = 0.14866$ $b = 0.54907$ $K_1 = 0.14866$	0.96088	0.00525
	Avec réflecteur (droit – gauche)	$a = 0.54114$ $K_0 = 0.16545$ $b = 0.54114$ $K_1 = 0.16545$	0.95537	0.00622
Two-terme exponential	Sans amélioration	$a = 1.73319$ $K = 0.14535$	0.98923	0.001
	Avec sable	$a = 1.82236$ $K = 0.17986$	0.98586	0.00144
	Avec réflecteur droit	$a = 1.77844$ $K = 0.19653$	0.97623	0.00247
	Avec réflecteur gauche	$a = 1.98475$ $K = 0.21265$	0.98861	0.00131
	Avec réflecteur (droit – gauche)	$a = 1.95955$ $K = 0.23887$	0.98345	0.00189
Approximation Of diffusion	Sans amélioration	$a = 1.02285$ $K = 0.08679$ $b = - 1.08315$	0.99918	0.00008
	Avec sable	$a = 1.03773$ $K = 0.09266$ $b = - 1.15721$	0.99977	0.00002

	Avec réflecteur droit	a =1.03918 K =0.10428 b = - 1.07371	0.99619	0.00043
	Avec réflecteur gauche	a =324.14923 K =0.02419 b =0.99121	0.99762	0.0003
	Avec réflecteur (droit – gauche)	a =282.04813 K =0.01916 b =0.98473	0.99875	0.00016
Verma et al	Sans amélioration	a =1.02285 K =0.08679 g = - 0.09401	0.99918	0.00008
	Avec sable	a = 1.03773 K = 0.09266 g = - 0.10723	0.99977	0.00002
	Avec réflecteur droit	a = 1.03914 K = 0.10429 g = - 0.11202	0.99619	0.00043
	Avec réflecteur gauche	a =190.74294 K =0.27998 g =0.28138	0.9904	0.00119
	Avec réflecteur (droit – gauche)	a =183.1891 K =0.31407 g = 0.31564	0.98544	0.00182
Midilli et al	Sans amélioration	a =1.00065 K =0.08905 n =0.90248 b = - 0.0117	0.99938	0.00006
	Avec sable	a = 0.99963 K =0.0857 n =0.91492 b = - 0.01942	0.99975	0.00003
	Avec réflecteur droit	a =0.99678 K =0.10839 n =0.74778 b = - 0.02908	0.99785	0.00026
	Avec réflecteur gauche	a =1.00132 K =0.05968 n =1.23085 b = - 0.01289	0.99907	0.00013
	Avec réflecteur (droit – gauche)	a =1.00029 K =0.06577 n =1.09428 b = - 0.02969	0.99889	0.00015

L'humidité absolue réduite expérimentale ( $X_r=X/X_i$ ) est représentée en fonction du temps dans la Figure (V.17) ci-dessus pour les différentes expériences et puis adaptée au dix modèles mathématiques de séchage. Il est clair d'après le Tableau (V.1) que le meilleur modèle ayant un  $R^2$  maximum et un  $\chi^2$  minimum correspond bel et bien au modèle de Midilli. Par conséquent ce modèle est bien approprié pour représenter le comportement de l'humidité absolue réduite pour ce type de tranche de tomate dans ces conditions.

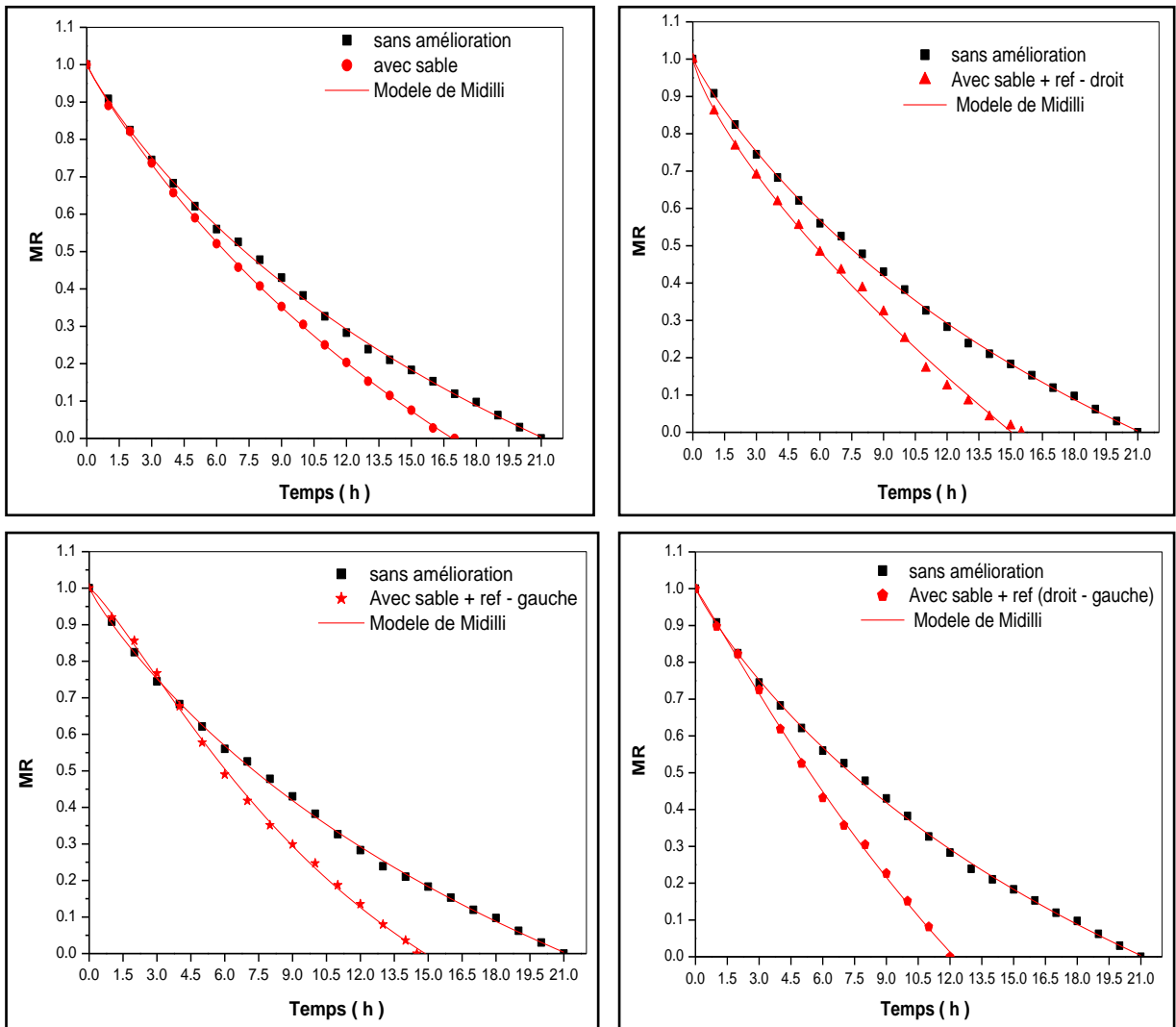


Figure V.17 : Humidité absolue réduite expérimentale et simulée par le modèle de Midilli.

## V.8. Conclusions

Une amélioration a été apportée à la conception du sécheur solaire indirect à convection forcée en installant le capteur avec des réflecteurs droit - gauche dans un alignement en V, et inclus des matériaux de stockage sur la plaque absorbante afin d'améliorer le processus de séchage. Le sable est utilisé comme matériau de stockage. Des expériences de séchage ont été menées avec et sans matériaux de stockage. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de l'étude expérimentale:

La température mesurée et le rayonnement solaire incident sur le séchoir collecteur étaient sensiblement plus élevés que ceux d'un séchoir à mode forcé normal. L'augmentation de la température et de l'humidité relative a entraîné une augmentation du déficit de pression de vapeur, qui est un indicateur établi de la capacité d'évaporation.

Le temps de séchage des tomates a été réduit en utilisant les réflecteurs aux côtés de capteur solaires avec le sable sur la surface de l'absorbeur et sable seulement sur la surface de l'absorbeur (sans réflecteurs). L'ajout du sable et du réflecteur droit - gauche à un séchoir a réduit les temps de séchage de 21.42%, 42.85% respectivement en moyenne par rapport au contrôle séchoir. L'utilisation des réflecteurs solaires droit - gauche avec du sable pour les séchoirs à mode forcé garantit un taux de séchage plus rapide et réduit ainsi les risques d'altération. Ceci a été accompli par une augmentation de la température interne du séchoir et une diminution de l'humidité relative, permettant des conditions de séchage plus favorables. Bien que le rayonnement solaire incident sur le collecteur ait également augmenté, il n'a pas pu être mesuré avec précision.

Les courbes de taux d'humidité ont été comparées à dix corrélations de taux d'humidité différentes dans la littérature et le modèle donnant les résultats les plus appropriés a été utilisé pour exprimer les résultats de l'expérience. En examinant les modèles dans la littérature pour les valeurs de rapport d'humidité obtenues, le modèle avec le plus haut coefficient de corrélation ( $R^2$ ) et les valeurs les plus basses de  $\chi^2$  a été détecté. Il a été observé que le modèle de Midilli fournissait les résultats les plus appropriés pour chaque état de séchage dans le séchage des tomates. De plus, les résultats obtenus montrent que le système proposé peut être utilisé pour sécher les autres fruits et légumes en augmentant la qualité des aliments.

Par conséquent, d'autres études et modifications de la conception du séchage solaire du réflecteur à l'aide de réflecteurs mobiles doivent être effectuées pour améliorer les performances de manière significative. Les réflecteurs paraboliques sont étudiés comme un

moyen d'augmenter le taux de séchage des tomates dans des conditions nuageux et pour améliorer les performances du capteur solaire à plaque d'air plat inclus des matériaux de stockage sur la plaque d'absorption. la densité de la surface de sable et le choix du meilleur sable sur l'efficacité quotidienne du collecteur.



---

## **CONCLUSION GÉNÉRAL**

---

---

## Conclusion général

Notre première approche expérimentale sur les performances du capteur solaire plan en utilisant les produits naturels locaux (Pétiole+gypse) ont montré que le rendement thermique du capteur à isolation pétiole + gypse était supérieur de 37,7% à celui du capteur isolant en laine de verre.

Les résultats obtenus à partir des différents types de capteurs solaires considérés permettent de déduire que l'introduction des produits de palmier dattier au niveau de l'isolant est un facteur très important pour l'amélioration des performances d'un capteur. L'étude a montré qu'un capteur solaire plan muni de pétiole comme isolant et d'une mince couche de sable sur l'absorbeur comme milieu absorbant, apporte une amélioration très appréciable du couple température-rendement.

La deuxième approche porte sur l'amélioration d'un séchoir solaire. Ce dernier est de conception artisanale. Il est fabriqué à partir de matériaux locaux et n'utilisant pas les techniques sophistiquées qui sont fort coûteuses.

Dans un but d'optimisation du procédé, nous avons étudié dans la première technique l'influence de réflecteur sur la cinétique et le temps de séchage. La deuxième technique consiste en l'ajout d'une couche de sable noircie comme un lit sur la surface totale de l'absorbeur, ce lit joue le rôle d'un réservoir de chaleur qui approvisionne l'air par une énergie supplémentaire, et empêche le sur chauffage interne en cas de forte intensité, nous montre que le temps de séchage des tomates a été réduit en utilisant les réflecteurs et le sable. L'ajout du sable et du réflecteur droit-gauche à un séchoir a réduit les temps de séchage de 21.42%, 42.85% respectivement par rapport au séchoir témoin.

Le rajout du réflecteur, accélère le processus de séchage et tend à l'uniformiser au niveau de claie. Cette opération consiste à optimiser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. Dans le souci d'économie d'énergie, et d'utilisation maximum d'énergie solaire gratuite dans une opération de séchage avec ce type de séchoir.

L'étude du séchoir avec des tranches minces de tomate posées sur claie nous a permis d'obtenir un ensemble de courbes de séchage. Ces courbes présentent toutes une allure décroissante (phase c typique pour la majorité des produits agroalimentaires). Cette amélioration est plus influencée par le réflecteur que par le sable.

L'analyse des résultats expérimentaux confrontés avec les modèles mathématiques existants, après avoir calculer les paramètres statistiques ( $R^2$  et  $\chi^2$ ) nous montre que le modèle approprié pour décrire les courbes de séchage pour ce type de produit (tranche de tomate mince) dans ces conditions est le modèle de Midilli.

Le couplage du capteur et du séchoir permet de conclure que l'augmentation du rayonnement conduit à l'élévation de la température de l'air ce qui entraîne un meilleur temps de séchage.

On conclut quel que soit le produit considéré, on a systématiquement constaté une grande amélioration de la cinétique de séchage, mais également une bonne réduction de la quantité d'humidité résiduelle ainsi qu'une diminution souvent très utile de l'activité de l'eau. Ainsi, nous pouvons considérablement réduire le temps de séchage et améliorer la qualité pluridimensionnelle du produit fini.

Enfin vue la diversité du champ d'investigation ouvert par cette étude nous jugeons utile de mentionner quelques points repères qui semblent intéressants pour une continuation logique du présent travail.

- 1 - Développement d'un modèle d'évolution traitement thermique-qualité.
- 2 - Apport d'énergie supplémentaire par échangeur géothermique.
- 3 - Minimiser le maximum de pertes par convection et rayonnement et faire un bon système d'isolation en changeant le ratio de pétiole et de gypse.
- 4 - Il faut augmenter la température dans la cavité (plénum), pour cela il est recommandé d'ajouter des ailettes aux surfaces intérieures de l'absorbeur.
- 5 - Faire varier l'inclinaison du réflecteur pour voir son effet sur les résultats.
- 6 - L'utilisation des grandes épaisseurs de la couche de sable et étudier d'autres types de sable.
- 7 - On doit tester notre prototype tout le long de l'année pour apporter les modifications et les ajustements nécessaires ; afin d'améliorer son efficacité. Il est clair que pour que le prototype de séchoir soit complet il faut des réflexions complémentaires dans un domaine essentiel, celui de la connaissance spécifique des éléments nutritifs, vitamines, propriétés organoleptiques du produit et leur évolutions au cour du séchage; ce qui fait qu'on est obligé de faire appel et travailler en collaboration avec des biologistes et des agronomes.

---

**RÉFÉRENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## Références bibliographiques

- [1] Bekkouche Sidi Mohammed El Amine. 2009. Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires. Thèse de Doctorat en Physique, Université Abou-Bakr Belkaid – Tlemcen, pp. 1.
- [2] J. D. Balcomb, R. W. Jones, C. E. Kosiewicz, G. S. Lazarus, R. D. Mc Farland, W. O Wray. 1982. Passive Solar Design Handbook , Volume 3, American Solar Energy Society.
- [3] Bouragbi Lakhdar. 2008. Etude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire. Thèse de Magister en Génie Mécanique, Université B adji Mokhtar –Annaba, pp. 19.
- [4] J. M. Christine Delisée, Jérôme Lux, and L. C. Patrick Castéra, Laurent Chrusciel. 2007. Microstructure et propriétés de transport de matériaux isolants à base de fibres cellulosiques, 25e rencontres de l'AUGC,Bordeaux.
- [5] K. Abdelouahed. 2005. Caractérisation des Fibres de Palmier Dattier Et Propriétés des Bétons et Mortiers Renforcés par ces Fibres en Climat Chaud et Sec. Thèse de doctorat, ENP Alger, pp. 154.
- [6] C. V. Rachid Tarik Bouhraoua, Mohamed Anouar Khelil, and S. Bouchaour. 2002. Situation sanitaire de quelques subéraies de l'Ouest algérien : impact des xylophages. Integrated Protection in Oak Forests IOBC/wprs Bull, vol. 25: 85- 92.
- [7] Dalila Djerroud. 2010. Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation. Thèse de doctorat en Génie des procédés et de l'Environnement, Université de Toulouse, pp. 2.
- [8] Slimane Boughali.2010. Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Hadj Lakhdar Batna, pp. 11.
- [9] Bounaga N. 1991. Les palmier dattier : rappels biologiques et problèmes physiologiques cité in Riedacher Riedacher A., Deryer E., Pafadnam C., Bory G., Phydologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides. Groupe d'étude de l'arbre – Paris, France: 323-336.

- [10] Munier P. Le palmier dattier, Maison neuve et larose.1973. Paris, pp. 25-28-31-32-40-48-141-142-221-367.
- [11] Ouinten M. Le palmier dattier dans le système oasien.1995. [http ://www.agromzab.multimania.com/contrib-mohamedd3.htm](http://www.agromzab.multimania.com/contrib-mohamedd3.htm).
- [12] Peyron G. Cultiver le palmier dattier. G. R. I. D. A. O, Montpellier. 2000. pp. 109-129.[http://www.iamm.fr/ressoures/opac\\_css/index.php?lvl=autho\\_see&id=1261](http://www.iamm.fr/ressoures/opac_css/index.php?lvl=autho_see&id=1261).
- [13] Bessas A. 2008. Dosage biochimique des composés phénoliques dans les dattes et le miel récoltes dans le sud Algérien. Mémoire d'ingénieur en biologie, Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, pp. 5-10-81.
- [14] Hilgeman C. 1972. Connaissance de la morphogenèse du palmier dattier. Etude in situ et in vitro du développement morphogénétiques des appareils végétatifs et reproducteurs. Thèse de doctorat. U.S.T.H.B. Alger, pp.201.
- [15] Rhouma A, Nasr N, Ben Salah M, Allala M. 2005. Analyse de la diversité génétique du palmier dattier dans les Iles Kerkennah, Projet Palmier Dattier au Maghreb.
- [16] Messar E.M. 1996. Le secteur phoenicicole algérien: situation et perspectives à l'horizon 2010. Options méditerranéennes, Vol. 28: pp. 23-44.
- [17] P. Meukam. 2004. Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, pp.157.
- [18] Dr. Mohammad S. Al-Homoud. 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. Building and Environment. vol. 40: pp. 353-366.
- [19] J.-P. Oliva. 2001. 2007. L'isolation écologique: conception, matériaux, mise en oeuvre: terre vivante, mens. france.
- [20] A. M. Papadopoulos. 2005. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. Energy and Building. vol. 37: pp. 77-86.
- [21] MM.fragos and Trouillez. 2012. Le guide de l'isolation: Fine Media, Paris. [contacte@finemedia.fr](mailto:contacte@finemedia.fr).

- [22] L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, and I. Fernandez. 2010. Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*. vol. 42: pp. 630–636.
- [23] M. Chikhi. 2013. *Métrieologie et modélisation des transferts dans les composites naturels a faible cout pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires*. Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, pp. 163.
- [24] A. D. Tranle. 2010. *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*. Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, pp. 221.
- [25] A. Kriker , G. Debicki , A. Bali , M.M. Khenfer , and M. Chabannet. 2005. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. vol. 27: pp. 554-564.
- [26] Ahmed Bessas, Benmoussa Larbi, and K. Mohamed. 2008. Dosage biochimique des composes phenoliques dans les dattes et le miel recoltés dans le sud algerien. In *Département de biologie*. Sidi Bel Abbes: Université Djillali Liabes, pp. 81.
- [27] A. Chehma and H. Longo. 2001. Valorisation des Sous-Produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse* , pp. 59-64,.
- [28] K. Bousdira. 2006. *Contribution à la connaissance de la biodiversité du palmier dattier pour une meilleure gestion et une valorisation de la biomasse: caractérisation morphologique et biochimique des dattes des cultivars les plus connus de la région de Mزاب, classification et évaluation de la qualité*. Thèse de magistère, Université de Boumerdes, pp. 186.
- [29] Rhouma Soumaya , Dakhlaoui-Dkhil Sonia , Ali Ould Mohamed Salem, Zehdi-Azouzi Salwa, Rhouma Abdelmajid, Marrakchi Mohamed, and T. Mok. 2008. Genetic diversity and phylogenetic relationships in date-palms (*Phoenix dactylifera* L.) as assessed by random amplified microsatellite polymorphism markers (RAMPOs). *Scientia horticulturae*. Vol. 117: pp. 53-57.
- [30] R. Khiari, M.F. Mhenni, M.N. Belgacem, and E. Mauret. 2010. Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* – A comparison with other wood and non-wood fibre sources. *Bioresource Technology*. Vol. 101: pp. 775-780.

- [31] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois. 2011. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and Buildings*. Vol. 43: pp. 491–497.
- [32] Marie-Christine Trouy-Triboulot and P. Triboulot. 2001. *Matériau bois: Structure et caractéristiques*. Techniques Ingénieur. Construction. Vol. CB1: pp. C925.1-C925.26.
- [33] P. Flourens, "Recueil des loges historiques lus dans les séances publiques de l'Académie des Sciences.Série 2."
- [34] H. L. 1809. *nouveaux éléments de botanique à l'usage des élèves qui suivent les cours du jardin des plantes et de l'Ecole de Médecine de Paris*:Bibliothèque de catalogue.
- [35] M. Keramat Jahromi, A. Jafari, S. S. Mohtasebi, and S. Rafiee. 2008. Engineering Properties of Date Palm Trunk Applicable in Designing a Climber Machine. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript FP 08 002.
- [36] G. Peyron. 2000. *Cultiver le palmier-dattier*. E. Quae, Ed: pp. 112.
- [37] P. Munier. 1973. *Le palmier-dattier*. M. Larose, Ed.: Maisonneuve & Larose. pp. 221.
- [38] A.Rougeulle. 1982. Des étuves à dattes à bahrain et en oman: Le problème de l'appaition des techniques de transformation de la datte. *PAIEORIENT*, vol. 8.
- [39] C. F. Benziouche Salah Eddine. 2010. *La Conduite du Palmier Dattier Dans les Palmeraies des Zibans (Algérie) Quelques éléments d’analyse*. *European Journal of Scientific Research*. Vol. 42: pp. 644-660.
- [40] Amirou Siham. 2015. *Etude et mise au point de composite à base de la matière fibreuse du palmier dattier phoenix dactylifera L*. Thèse doctorat, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, pp. 15-16.
- [41] A. Djoudi, M.M. Khenfer, A. Bali, E.H. Kadri, and G. Debicki. 2012. Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete. *International Journal of Physical Sciences*. Vol. 7: pp. 2845-2853.
- [42] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, and A. Gherabli. 2013. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*. Vol. 66: pp. 267-273.



- [43] Ahmad Alawar, Ahmad M. Hamed, and K. Al-Kaabi. 2009. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites: Part B* 40: pp. 601–606.
- [44] Kareche Abdelhak. 2014. Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert. Thèse Magister en mécanique, Université Hadj Lakhdar Batna, pp. 1-93.
- [45] Benmansour Nadia. 2015. Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat. Thèse Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, pp. 1-140.
- [46] Ibra SECK. 2006. Etude des échanges thermiques à l'intérieur de la cavité vitre absorbeur d'un capteur à haut rendement; Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, pp.2.
- [47] Michel Kapderou. 1988. Atlas solaire de l'Algérie tome 1 –modèle théoriques et expérimentaux – volume 2.
- [48] Ministère de l'énergie et des mines. [www.mem.algeria.org](http://www.mem.algeria.org)
- [49] Antoine Leconte. 2011. Identification de caractéristiques réduites pour l'évaluation des performances des Systèmes Solaires Combinés. Thèse de doctorat en Génie civil et sciences de l'habitat, Université de Grenoble, pp.32.
- [50] Sellami Mohamed Hassen. 2014. Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région Sud- Est Algérien (Ouargla). Thèse Doctorat en Sciences Physiques, université Kasdi Merbah Ouargla, pp.40.
- [51] Brahim Zitani. 2007. Etude et Modélisation du Comportement en Régime Transitoire d'un Capteur Solaire Plan. Thèse de magistère Université Badj Mokhtar–Annaba, pp.7.
- [52] Sichaib Amel. 2012-2013. Etude numérique d'une chaîne énergétique solaire avec capteur solaire plan à air et stockage thermique pour une maison solaire. Thèse de magistère Université Abou Bekr Belkaide Tlemcen, pp.32-33.
- [53] S. Youcef-Ali. 2005. Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing. *Renewable Energy*. 30: pp. 271–280.

- [54] Turhan Koyuncu. 2006. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy*. 31: pp. 1073–1088.
- [55] Donatien Njomo. 1998. Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre. *Rev. Gén. Therm.* 37: pp. 973-980.
- [56] Ho-Ming Yeh and Tong-Tshien Lin. 1995. The effect of collectors aspect ratio on the collectors efficiency of flat-plate solar air. *Energy*. 20: pp. 1041-1047.
- [57] N. Moummi, S. Youcef-Ali \_\_, A. Moummi, J.Y. Desmons. 2004. Energy analysis of a solar air collector with rows of fins. *Renewable Energy*. 29: pp. 2053–2064.
- [58] A. Abene, V. Dubois, M. Le Ray, A. Ouagued. 2004. Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape. *Journal of Food Engineering*. 65: pp. 15–22.
- [59] A. Ucar, M. Inalli. 2006. Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 33: pp. 1281–1290.
- [60] Hikmet Esen. 2008. Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Building and Environment*. 43: pp. 1046–1054.
- [61] Ho-Ming Yeh, Chii-Dong Ho. 2009. Effect of external recycle on the performances of flat-plate solar air heaters with internal fins attached. *Renewable Energy*. 34: pp. 1340–1347.
- [62] M. N. Bargacha, R. Tadilia, A. S. Dahmanb, M. Boukallouchc. 2004. Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco. *Renewable Energy*. 29: pp. 1073–1083.
- [63] C. D. Hoa, C. W. Yeha, S. M. Hsiehb. 2005. Improvement in device performance of multi-pass flatplate solar air heaters with external recycle. *Renewable Energy*. 30: pp. 1601–1621.
- [64] M. Augustus Leon, S. Kumar. 2007. Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. *Solar Energy*. 81: pp. 62–75.

- [65] Marwa M. Hassan, Yvan Beliveau. 2007. Design, construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis. *Construction and Building Materials*. 21: pp. 1069–1078.
- [66] K. Sopian, M. A. Alghoula, Ebrahim M. Alfegeb, M. Y. Sulaimana, E. A. Musab. 2009. Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous–nonporous media. *Renewable Energy*. 34: pp. 640–645.
- [67] K. Sopian, Suprantob, W.R.W. Daudb, M.Y. Othmanc, B. Yatimc. 1999. Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media. *Renewable Energy*. 18: pp. 557-564.
- [68] Ho CD et al. 2009. The influences of recycle on performance of baffled double-pass flat-plate solar air heaters with internal fins attached. *Appl Energy*. doi:10.1016/j.apenergy.2008.12.013.
- [69] H. M. Yeh, C. D. Ho. 2008. Solar air heaters with external recycle. *Appl. Therm. Eng*, 2008, doi:10.1016/j.applthermaleng.07.027.
- [70] Huseyin Gunerhan, Arif Hepbasli. 2007. Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*. 42: pp. 779–783.
- [71] Charles. 1981. *L'énergie solaire dans les bâtiment*. Nouveau tirage, Edition Eyrolles.
- [72] F. Mokhtari et D. Semmar. 1999. Etude Expérimentale d'un Capteur Solaire à Air. *Rev. Energ. Ren*, pp. 243-246.
- [73] Suleyman Karsli. 2007. Performance analysis of new-design solar air collectors for drying applications. *Renewable Energy*. 32: pp. 1645–1660.
- [74] Runsheng Tang , Zhiguo Sun, Zhimin Li, Yamei Yu, Hao Zhong, Chaofeng Xia. 2008. Experimental investigation on thermal performance of flat plate collectors at night. *Energy Conversion and Management*. 49: pp. 2642–2646.
- [75] Rajendra Karwaa, Nitin Karwab, Rohit Misrac, P. C. Agarwalc. 2007. Effect of flow mal distribution on thermal performance of a solar air heater array with sub collectors in parallel. *Energy*. 32: pp. 1260–1270.

- [76] Ferdjani Ahmed Taha. 2013. Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans. Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, pp.35-40.
- [77] M. E. A. Bekkouche. 2009. Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, pp.29-32 .
- [78] J. Saccadura. 1980. Initiation aux Transferts Thermiques. Cast. INSA de Lyon, Paris, Techniques et Documentation.
- [79] Jeronimo V. D. Souza. 2012. Conception et optimisation d'un capteur solaire thermique innovant adapté à la renovation énergétique grâce à l'intégration du stockage. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, pp.40-45.
- [80] S. Bahria et M. Amirat. 2013. Influence de l'adjonction des chicane longitudinales sur les performances d'un capteur solaire plan à air. Revue des Energies Renouvelables. Vol. 16 N°1: 51 – 63.
- [81] K. Aoues, N. Moumami, M. Zellouf. 2009. Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air: Etude expérimentale dans la région de Biskra. Revue des Energies Renouvelables. Vol. 12 N°2: 237 – 248.
- [82] Marif Yacine. 2015. Caractérisation d'un concentrateur cylindro-parabolique de dimensions réelles au sud de l'Algérie: Région d'Ouargla. Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Université Kasdi Merbah Ouargla, pp.21.
- [83] Benseddik Abdellouahab. 2018. Amélioration de la qualité et de la performance du séchage solaire des produits agro-alimentaires par insertion d'un traitement de détente instantanée contrôlée (DIC); analyse expérimentale, modélisation empirique et phénoménologique. Thèse de Doctorat en Mécanique Énergétique, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, pp.06.
- [84] Brahim Bchir. 2011. Contribution à l'étude de la conservation des graines de grenade (*Punica Granatum L.*) par déshydratation osmotique. Thèse doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université de Liège Gembloux Agro -Bio Tech, pp.30.

- [85] Peyre A, Zéau Y. 1979. Analyse de l'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage agricole. Programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire, C.N.R.S.-PIRDES.
- [86] Julio Rodriguez. 2006. Déshydratation par effet de serre d'un produit emballé dans un film polymère perméable aux molécules d'eau : Approche expérimentale et de modélisation. Docteur de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.
- [87] Sodha M, Bansal N, Kumar A, Bansal P, Malik M. 1987. Solar crop drying Volume I. CRC Press, Inc.EEUU.
- [88] B. Touati. 2001. Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe. Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie.
- [89] J. P. Nadeau, J. R. Puiggali. 1995. Séchage : des processus physiques aux procédés industriels. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France.
- [90] C. H. Danquigny. 2003. Etude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, pp.17-18.
- [91] Jean-jacques Bimbenet. 2002. Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod, Paris.
- [92] Nsren Albitar. 2010. Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par Détente Instantanée Contrôlée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. Applications à la valorisation des déchets agro-industriels. Thèse Doctorat, Université de la Rochelle, pp.49.
- [93] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz et M. Fliyou. 2001. Moisture adsorption – desorption isotherms of prickly pear cladode (*opuntia ficus indica*) at different temperatures. *Energy Conversion and Management*. 44: 923 - 936.
- [94] A. Ferradji, A. Malek. Isothermes d'adsorption des abricots secs à 25°C et 45°C. 2005. *Rev. Eng. Ren, CDER Alger*. 8: 39 - 48.
- [95] H.A. Iglesias, & J. Chirife. 1976. On the local isotherm concept and modes of moisture binding in food products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol,24: 24-77.

- [96] C.R. Oswin. 1946. The kinetics of package life. III. Isotherm. Journal of Society of Chemical Industry. Vol. 65: 419-421.
- [97] T.L. Thompson, & al. 1986. Mathematical simulation of corn drying a new model. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers. Vol.11: 582-586.
- [98] Pfost & al. 1976. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. Society of Agricultural Engineers. P 76-3520.
- [99] I. Langmuir. 1916. Journal of American Chemical Society. Vol. 46: 1361-1362.
- [100] Peleg. 1993. Assessment of semi-empirical four parameter general model for sigmoid sorption isotherm. Journal of Food Processing Engineering. Vol. 16(1): 21-37.
- [101] C. Van den Berg. 1984. Description of water activity of Food Engineering purposes by means of the GAB model of sorption, in: McKenna, B.M. (Ed). Engineering and Foods, New York: Elsevier, p.119.
- [102] I.Doymaz. 2007. Air drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering. 78: 1291-1297.
- [103] J.P Nadeau, Puiggali J.R. 1995. Séchage: des processus physiques aux procédés industriels. Tec & Doc- Lavoisier.
- [104] P. Dudez. 1999. Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés. Edition du Greth. France.
- [105] O. V. Ekechukwu, B. Norton. 1999. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion, Management. 40: 615-655.
- [106] Lyes Bennamoun. Contribution a l'étude des transferts couples avec changement de phase dans un milieu poreux. Influence des conditions d'air variables sur les cinétiques de séchage et le comportement global d'un séchoir solaire. Thèse Doctorat en Sciences, Université Mentouri Constantine, pp.45-50.
- [107] A. Madhlope, S.A. Jones, and J.D. Kalenga Saka. 2001. A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration. Renewable Energy. 27: 27-37.
- [108] O. V. Ekechukwn, B. Norton. 1999. Review of solar energy systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management. 40: 615-655.

- [109] A. Belghit, M. Belahmidi, A.Bennis, B.C. Boutaleb, S. Benet. 1997. Numerical study of a solar dryer in forced convection. *Revue General de Thermique*. 36: 837-850.
- [110] L. Bennamoun, A. Belhamri. 2006. Numerical simulation of drying under variable external conditions: Application to solar drying of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*. 76: 179-187.
- [111] WC. Swinbank. 1963. Long wave radiation from clear skies. *Q J Roy Meteor Soc* 89.
- [112] WH. McAdams. 1954. *Heat transmission*, 3rd ed. Mc Graw Hill, New York.
- [113] S.E. Charm. 1963. *Fundamental of food engineering*. Avi Pub Co, Wesport, Connecticut, USA.
- [114] S. Lahsasni, et al. 2004. Drying Kinetics of prickly pear fruit ( *Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*. Vol.61, n° 2, pp.173-179.
- [115] S.Simal, et al. 2005. Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruit: influence of the ripening stage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. Vol.85: pp 425-432.
- [116] Amellal née Chibane Hayet. 2008. Aptitudes technologiques de quelques variétés communes de dattes : formulation d'un yaourt naturellement sucré et aromatisé. Thèse de doctorat, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, pp.24-25.
- [117] Abdelghani Boubekri. 2010. Optimisation des traitemets thermiques de la datte Algérienne « Deglet-Nour ». Thèse Doctorat, Université Hadj –Lakhdar Batna, pp. 71-73.
- [118] W.K. Lewis. 1921. The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial Engineering Chemistry*. 13: 427-432.
- [119] L.M. Diamente, P.A. Munro. 1993. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*. 51: 271-276.
- [120] Q. Zhang, J.B. Litchfield. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*. 9: 383-395.
- [121] D.D. Overhults, G.M. White, M.E. Hamilton, I.J. Ross. 1973. Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*. 16: 195-200.

- [122] A.Yagcioglu, A. Degirmencioglu, F. Cagatay. 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy Adana, Turkey. 565-569.
- [123] S.M. Henderson. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of the ASAE. 17: 1167-1172.
- [124] Y.I. Sharaf-Eldeen, J.L. Blaisdell, M.Y. Hamdy. 1980. A model for ear corn drying. Transactions of the ASAE. 23: 1261-1271.
- [125] O.Yaldiz, C.Ertekin. 2001. Thin layer solar drying some different vegetables. Drying Technology. 19 (3): 583-596.
- [126] L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. Transactions of the ASAE. 28: 296-301.
- [127] A.Midilli, H.Kucuk, Z.Yapar. 2002. A new model for single layer drying. Drying Technology. 20 (7): 1503-1513.
- [128] T.L. Togrul, D. Pehlivan. 2003. Mathematical modelling of solar drying of apricot in thin layers. Journal of Food Engineering. Vol.55, n° 2: pp.209-216.
- [129] J.A. Rabe, S. Spells, D.M. Rasch, G.R. Homan, C.L. Lee. 1981. Evaluation of silicon foam for flat plate solar collector insulation. Sol. Energy Mater. 4: 159-168.
- [130] Nadia Nadir. 2012. Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, pp.1.
- [131] J. Shi, M. Le Maguer, Y. Kakuda, A. Liptaym, F. Niekamp. 1999. Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration. Food Research International. 32: 15-21.
- [132] I. Doymaz. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering.78: 1291-1297.
- [133] Annuaire Statistique de l'Algérie: Résultats, 2018.
- [134] I. Doymaz. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. Journal of Food Engineering. 79: 243-248.



- [135] M.A. Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya. 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 6: 367-393.
- [136] K. Sacilik, R. Keskin and A. K. Elicin. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*. 73: 231 - 238.
- [137] Hiroshi Tanaka. 2015. Theoretical analysis of solar thermal collector and flat plate bottom reflector with a gap between them. *Energy Reports*. 1: 80–88.
- [138] Ljiljana T. Kostić. 2012. Optimal position of flat plate reflectors of solar thermal collector. *Energy and Buildings*. 45: 161-168.
- [139] Zoran T. Pavlović, Ljiljana T. Kostić. 2015. Variation of reflected radiation from all reflectors of a flat plate solar collector during a year. *Energy*. 80: 75-84.
- [140] Hiroshi Tanaka. 2011. Solar thermal collector augmented by flat plate booster reflector: Optimum inclination of collector and reflector. *Applied Energy*. 88:1395–1404.
- [141] Lj.T. Kostić, T.M. Pavlović , Z.T. Pavlovic. 2010. Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors. *Applied Energy*. 87: 3023–3029.
- [142] Faezeh Ketabchia. 2019. Experimental performance evaluation of a modified solar still integrated with a cooling system and external flat-plate reflectors. *Solar Energy*. 187: 137–146.
- [143] Naveed ur Rehman. 2018. Optical-irradiance ray-tracing model for the performance analysis and optimization of a façade integrated solar collector with a flat booster reflector. *Solar Energy*. 173: 1207–1215.
- [144] James Stiling , Simon Li , Pieter Stroeve , Jim Thompson , Bertha Mjawa , Kurt Kornbluth , Diane M. Barrett. 2012. Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels. *Energy for Sustainable Development*. 16: 224–230.
- [145] Blake Ringeisen , Diane M. Barrett , Pieter Stroeve. 2014. Concentrated solar drying of tomatoes. *Energy for Sustainable Development*. 19: 47–55.
- [146] Gülsah akmak, Cengiz Yıldız. 2011. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and bioproducts processing*. 89: 103-108.

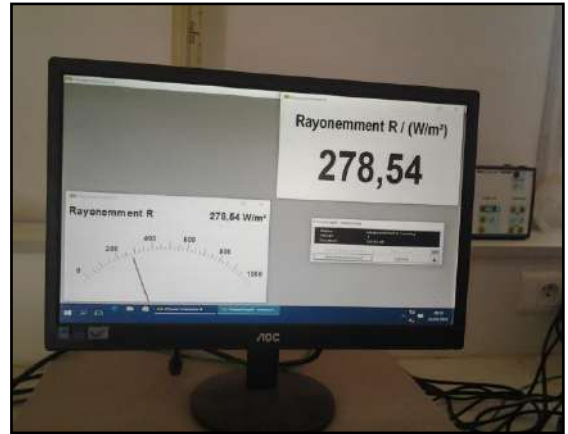
- [147] Subarna Maiti et al. 2011. Performance evaluation of a small scale indirect solar dryer with static reflectors during non-summer months in the Saurashtra region of western India. *Solar Energy*. 85: 2686–2696.
- [148] Hadi Samimi-Akhijahani , Akbar Arabhosseini. 2018. Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. *Renewable Energy*. 123: 428-438.
- [149] Mohamed Yacine Nasri, Azeddine Belhamri. 2018. Effects of the climatic conditions and the shape on the drying kinetics. Application to solar drying of potato-case of Maghreb's region. *Journal of Cleaner Production*. 183: 1241-1251.
- [150] Zaineb Azaizia et al. 2017. Investigation of a new solar greenhouse drying system for peppers. *International journal of hydrogen energy*. 42: 8818-8826.
- [151] Rachida Ouaabou et al. 2018. Valorization of solar drying process in the production of dried Moroccan sweet cherries. *Solar Energy*. 172: 158–164.
- [152] Lyes Bennamouna, Réda Khamab, Angélique Léonard. 2015. Convective drying of a single cherry tomato: Modeling and experimental study. *Food and bioproducts processing*. 94:114–123.

---

## **ANNEXE A**

---

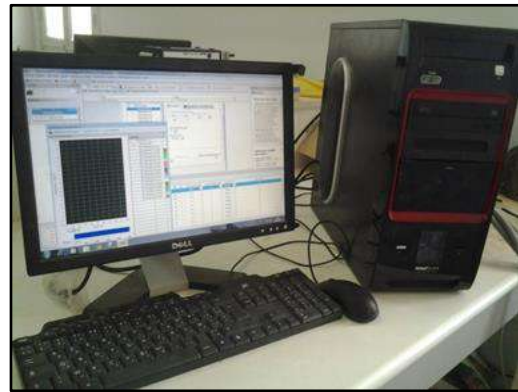
## Les instruments de mesure



Solarimeter (de type DS 120)



Appareil testo 445



Appareil du mesure de température ((Modèle: NI cDAQ -9174)



Analyseur d'humidité



Balance

---

## **ANNEXE B**

---

## Les modèles théoriques appropriés pour le processus de séchage

