

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة أحمد دراية أدرار-الجزائر
Université Ahmed Draia, Adrar - Algérie

Université Ahmed Draïa - Adrar

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des sciences de la matière



جامعة أحمد دراية أدرار-الجزائر
Université Ahmed Draia, Adrar - Algérie

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET
ENERGIES RENOUVELABLES.**

Thème :

**Conception et étude d'un capteur solaire thermique
« portable » destiné au séchage**

Préparé par :

Hadjer DJERIFILI Et Abd Elwahab CHEIKHI

Devant le jury:

Président: Mr. Boumediene OMARI

UNIV.Adrar

Encadré par : Mme. Rabéa KAOULAL épouse BOUSSEM

UNIV.Adrar

Examineur: Mr. Ahmed MEDIANI

URER/MS .Adrar

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé pour accomplir ce travail.

*Nous adressons nos plus vifs remerciements pour notre encadreur, **Mme. Rabéa KAOUALAL** pour son aide efficace, ses orientations judicieuses et ses conseils précieux, son soutien ont été pour nous un vrai support scientifique et personnel.*

Notre remerciements aussi les membres de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables au Milieu Saharien (URER/MS) d'Adrar,

*Surtout : **Mr. Ahmed MEDIANI,***

Pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, Pour tous le temps et les efforts qu'il nous a consacré, pour nous aider et pour ses conseils avisés tout au long de la réalisation ce travail. Pour avoir accepté de le juger.

Nous remercions l'ensemble des enseignantes du département des sciences de la matière pour leur patience durant notre étude

*Surtout **Mr. Boumediene OMARI,***

Pour avoir accepté de juger ce travail et de nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

En fin, nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce modeste projet.



Dédicace

*Je dédie mon travail à mes très chers parents qui m'ont soutenu
tout long de ma vie.*

*A ma mère, qui a œuvrée pour réussite par son amour, son soutien,
tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son
assistance et sa présence dans ma vie,*

*A mon père pour ses sacrifices consentis et de privations pour
m'aider avancer dans la vie.*

A mes sœurs et mon frère

A mon binôme : Abd Elwahab

A toute ma famille et mes chères amies.

Hadjer DJERIFILI



Dédicace:

Je dédie ce modeste travail à:

Mes très chers parents

Mes très chères sœurs

Mes très chers frères

Et à toute la famille;

A tous mes voisins;

A tous mes amis et collègues;

A tous ceux qui me sont chers.

Abd Elwahab CHEIKH/

ملخص

أدى تزايد الطلب العالمي على الطاقة إلى تحفيز التقدم العلمي والتقني بشكل كبير في مجال الطاقات المتجددة.

تتناول دراستنا إحدى القطاعات الرئيسية للطاقة الشمسية وهي التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية التي تدعم بواسطة تكنولوجيا اللاقط الهواء المسطح □ من خلال هذا العمل سوف نقدم دراسة نظرية و تجريبية للجهاز المصنوع الذي يتكون من لاقطين شمسيين حراريين وغرفة واحده ، يعمل هذا الجهاز في الوضع الديناميكي وفق نظام الحمل الحراري الطبيعي بهدف التجفيف.

ستسمح لنا النتائج التجريبية بتحديد سلوك درجات الحرارة للزجاج و الماص ، وسيط نقل الحرارة (هواء) عند مخرج اللاقط □ بالإضافة إلى حساب المرودية وتقدير جودة المنتج المراد تجفيفه. وسنقوم أيضا بالتحقق من صحة منهجنا النظري و المحاكاة الخاصة بنا (وفق برنامج MATLAB) .

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي، انتقال الحرارة ، نمذجة ، لاقط شمسي حراري .



Résumé

La croissance de la demande énergétique mondiale a largement stimulé les progrès scientifiques et techniques dans le domaine des énergies renouvelables.

Notre étude porte s'appuie sur l'une des principales filières de l'énergie solaire à savoir la conversion directe de l'énergie solaire en énergie thermique dont le support technologique est le capteur plan à air. En effet à travers le présent travail, nous allons étudier théoriquement et expérimentalement le dispositif réalisé composé de deux capteurs solaires thermiques et une chambre de séchage, fonctionnant en régime dynamique en convection naturelle et destiné au séchage.

Les résultats expérimentaux ont permis de déterminer les profils de températures, du vitrage, de l'absorbeur, et du fluide caloporteur (l'air) à la sortie du capteur, ainsi que le calcul du rendement et même l'estimation de la qualité du produit à sécher. Ainsi la validation de notre approche théorique est permise et nos simulations (sous le code Matlab).

Mots clés: séchoir solaire, Transfert de la chaleur, modélisation, capteur solaire thermique.



Abstract

The growth in global Energy demand has greatly stimulated scientific and technical progress in the field of renewable energies.

Our study focuses on one the sector of solar energy, namely the direct conversion of solar energy into thermal energy, the technological support of which is the flat air collector.

Indeed through the present work, we will study theoretically and experimentally the device made composed two solar thermal collectors and a drying chamber operating in dynamic regime in natural convection and intended for drying.

The experimental results will allow us to determine the temperature profiles, of the glass, of the absorber, and of the heat transfer fluid (air) at the outlet of the collector, as well as the calculation of efficiency and even the estimation of the quality of the product to dry. And we will also allow us to validate our theoretical approach and our simulations (under the MATLAB code).

Key words: solar dryer, heat transfer, modelization, solar collector thermal.

Nomenclature

caractère	signification	unités
S	la surface d'échange	m²
h	le coefficient d'échange par convection	W/m².k
λ	Conductivité thermique du produit	W/m.k
H_a	L'humidité absolue	kg_{eau}/kg_{air s}
H_r	L'humidité relative	%
P_v	La pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air	pascal
P_s	La pression de saturation	pascal
T_s	Température sèche	°C
T_h	Température humide	°C
T_r	Température de rosé	°C
M_h	Masse de matériau humide	kg
M_e	Masse d'eau	kg
m_{as}	Masses de d'air sec	kg
m_v	masses de vapeur d'eau	kg
M_s	Masse de matière sèche	kg
x	teneur en eau à base sèche	kg_{eau}/kg_{ms}
x_r	teneur en eau à base humide	kg_{eau}/kg_{mh}
L	Espace entre deux plaques	m
G	éclairage solaire incident sur le capteur	w/m²
λ_f	Conductivité thermique de fluide caloporteur	W/m.°C
g	accélération de la pesanteur	m²/s
v_v	vitesse du vent	m/s
ΔT	Écart de température entre la vitre et l'absorbeur	°C
α_v	Coefficient d'absorption de vitre.	%

α_{abs}	Coefficient d'absorption de la paroi absorbante	%
ϵ_v	Émissivité de la vitre.	%
ϵ_{abs}	Émissivité de l'absorbeur.	%
ϵ_{is}	Emissivité de la plaque arrière isolante du capteur	%
τ_v	Coefficient de transmission de la vitre	%
T_{ciel}	Température équivalence du ciel	°C
T_{abs}	température de l'absorbeur	°C
T_{vi}	Température de la face intérieure de la vitre	°C
T_{isol}	Température de la plaque arrière isolante	°C
T_{ve}	Température de la face extérieure de la vitre	°C
T_{am}	Température ambiante	°C
S	Surface de la plaque absorbante	m ²
\dot{m}_f	Débit massique du fluide caloporteur	kg/s
A_{lat}	Aire latérale du capteur	m ²
A_c	Aire du capteur	m ²
Q_u	Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur	W
λ_i	Conductivité thermique du composant	w/m. °C
e_i	Épaisseur du composant	(m).
$h_{r_{is-sol}}$	Coefficient de transfert radiatif entre l'isolant et le sol	w/m ² °C
$h_{r_{ve-sol}}$	Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le sol	w/m ² °C
h_{cv_v-ab}	Coefficient de transfert thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur	w/m ² °C
$h_{r_{vi-abs}}$	Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre interne et le sol	w/m ² °C
$h_{r_{ve-ciel}}$	Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre externe et le sol	w/m ² °C
$h_{cv_{ve-am}}$	Coefficient de transfert thermique par convection entre la vitre et l'ambient	w/m ² °C

$h_{cvf-abs}$	Coefficient de transfert thermique par convection entre le fluide et l'absorbeur	$w/m^2 \text{ } ^\circ C$
$h_{r_{sol-isol}}$	Coefficient d'échange par rayonnement entre isolant et le sol	$w/m^2 \text{ } ^\circ C$
U_{al}	Coefficient de Perte thermique par la surface latérale de capture	$w/m \text{ } ^\circ C$
U_{ar}	Coefficients de perte thermique vers l'arrière du capteur	$w/m \text{ } ^\circ C$
U_{av}	Coefficients de perte thermique vers l'avant du capteur	$w/m \text{ } ^\circ C$
U_L	Le coefficient de pertes thermiques global	$w/m \text{ } ^\circ C$
η	Rendement instantané.	%
φ_{s_v}	Flux solaire absorbé par la vitre	W
φ_{s-abs}	Flux solaire absorbé par l'absorbeur	W
φ_{cv}	Flux de chaleur par convection	W
Qu	Puissance utile	W
$\varphi_{r_{ve-ciel}}$	Flux de chaleur rayonnée de la vitre (cote externe) vers le ciel.	W
$\varphi_{cv_{ve-am}}$	Flux de chaleur convective de la vitre (cote externe) vers l'ambient.	W
$\varphi_{r_{ve-sol}}$	Flux de chaleur rayonnée de la vitre (cote externe) vers le sol.	W
$\varphi_{cd_{ve-vi}}$	Flux de chaleur par conduction la vitre.	W
$\varphi_{cv_{f-abs}}$	Flux de chaleur convective du fluide vers l'absorbeur	W
$\varphi_{cv_{vi-f}}$	Flux de chaleur convective de la vitre (cote interne) vers le fluide.	W

Abréviations et indices	
Abréviation	Signification
<i>abs</i>	absorbeur
<i>vi</i>	vitre cote interne
<i>ve</i>	vitre cote externe
<i>isol</i>	isolant
<i>am</i>	ambiant
<i>f</i>	fluide
<i>ar</i>	Arrière
<i>av</i>	Avant
<i>lat</i>	Latéral e
g	Global
C.D.E.R	Centre de Développement des Energies Renouvelables.
I.N.A	Institut National d'Agronomie.
L.E.N.R.Z.A	Laboratoire des Énergies Nouvelles et Renouvelables dans les Zones Arides.
CRTE_n	Centre de Recherche et des Technologies de l'Énergie nord de la Tunisie.
UDES	Unité de Développement des Equipements Solaires
ENIM	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
ملخص.....	iv
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
Nomenclature.....	iv
Table des matières.....	viii
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	iv
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction.....	5
V.2 Présentation de quelques travaux antérieurs sur le Séchage solaire.....	5
V.3 Conclusion.....	17
Référence.....	18

CHAPITRE II: GENERALITES SUR LE SECHAGE ET LES SECHOIRS SOLAIRES

II.1 Introduction.....	22
II.2 Séchage solaire.....	22
II.2.1 Définition du séchage solaire.....	22
II.2.2 Principe de séchage solaire.....	22
II.2.3 Les différentes méthodes du séchage.....	24
II.2.3.1 Séchage mécanique.....	24
II.2.3.2 Séchage chimique.....	24
II.2.3.3 Séchage thermique.....	24
II.2.4 Caractéristiques de l'air de séchage.....	25
II.2.4.1 Humidité absolue (ou spécifique).....	25
II.2.4.2 Humidité relative.....	25
II.2.4.3 Températures caractéristiques de l'air humide.....	25
II.2.5 Caractéristiques des solides humides.....	26
II.2.5.1 Description du solide humide.....	26
II.2.5.2 Humidité absolue.....	26
II.2.5.3 Teneur en eau à base humide.....	27
II.2.5.4 Taux d'humidité à l'équilibre.....	27
II.3 Les séchoirs solaires.....	27

II.3.1 Classification des séchoirs solaires	27
II.3.1.1 Les séchoirs solaires directs	28
II.3.1.2 Les séchoirs solaires indirects	29
II.3.1.3 Les séchoirs mixtes	30
II.3.1.4 Les séchoirs hybrides	31
II.4 Conclusion	32
Référence :	33

CHAPITRE III: MODELISATION ET SIMULATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN À AIR

III.1 Introduction	36
III.2 Capteur solaire plan :	36
III.2.1 Eléments constitutifs du capteur solaire plan à air	37
III.2.1.1 Couverture transparente :	37
III.2.1.2 Absorbeur	37
III.2.1.3 Fluide caloporteur	37
III.2.1.4 Isolant	38
III.2.1.5 Le coffre ou la cadre	38
III.2.2 Principe fonctionnement	38
III.3 Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire à air	39
III.3.1 Transfert thermique par convection	40
III.3.1.1 Échange thermique par convection dû au vent	40
III.3.1.2 Échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur	41
III.3.2 Transfert thermique par rayonnement	42
III.3.2.1 Échange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste:	43
III.3.2.2 Echange thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur	43
III.3.2.3 Echange thermique par rayonnement entre vitre et le sol	43
III.3.2.4 Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol	44
III.3.3 Transfert thermique par conduction	44
III.4 Bilan thermique globale de capteur plan a air en régime transitoire	45
III.4.1 Expressions analytiques de bilan énergétique	47
III.4.2 Système d'équation global	48
III.5 Pertes globales d'énergies	49
III.5.1 Expression de coefficients de perte thermique vers l'avant du capteur	49
III.5.2 Expression de coefficients de perte thermique vers l'arrière du capteur	49
III.5.3 Coefficient de Perte thermique latérale	49
III.6 Rendement instantané	49

III.7 Modélisation numérique.....	50
III.7.1 Principe MDF	51
III.8 L’algorithme général	52
III.9 Conclusion.....	54
Référence.....	55

CHAPITRE IV: LES ETAPES DE REALISATION DU PROTOTYPE « SECHOIR SOLAIRE PORTABLE »

IV.1 Introduction	58
IV.2 Le choix de dispositif expérimental	58
IV.3 Description du séchoir solaire	58
IV.4 Les étapes de Conception du séchoir solaire.....	60
IV.4.1 Les étapes de la réalisation du capteur à air	60
IV.4.1.1 Dimensions du capteur à air	60
IV.4.1.2 Isolation thermique	61
IV.4.1.3 Découpage de la plaque couverture et absorbante	61
IV.4.1.4 Montage	63
IV.4.2 Les étapes de réalisation de la chambre de séchage	64
IV.4.2.1 La chambre	64
IV.4.2.2 La cheminé	65
IV.4.2.3 Le couplage	65
IV.5 Principe de fonctionnement	66
IV.6 Banc d’essai	67
IV.6.1 Les instruments de mesure expérimentale	68
IV.7 Etude expérimentale	70
IV.7.1 Les résultats expérimentaux	70
IV.7.1.1 Les données météorologiques	70
IV.7.1.2 Les profils des températures des différentes composantes du capteur solaire à air	72
IV.7.1.3 Discussion et analyse des résultats.....	74
IV.8 Les résultats numériques.....	75
IV.9 Validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux.....	77
IV.10 Conclusion:	79
Références.....	80

CHAPITRE V: RESULTATS DU SECHGAE DE QUELQUES PRODUITS ALIMENTAIRES (FRUITS ET PLANTES)

V.1 Introduction	82
V.2 Période des tests	82

V.2.1 Grandeurs mesurées	82
V.2.1.1 Mesure des températures	82
V.2.1.2 Mesure d'humidité de l'air	83
V.2.1.3 Mesure des masses humides	83
V.3 Cinétique de séchage des produits: <i>cas des plantes aromatique et médicinale</i>	83
V.3.1 La menthe verte	83
V.3.1.1 Préparation de produit	83
V.3.2 La feuille de laurier	84
V.3.2.1 Préparation du produit	85
V.3.3 Protocole expérimentale	85
V.3.4 Evolution de la masse humide pendant le séchage	86
V.3.5 Les résultats expérimentaux	87
V.3.6 Produit séché	89
V.4 Cinétique de séchage des produits: <i>Cas de la pomme</i>	90
V.4.1 Préparation de produit	90
V.4.2 Mode opératoire	91
V.4.3 Évolution de la masse humide pendant le séchage.....	92
V.4.4 Les résultats expérimentaux	92
V.4.5 Produit séché	94
V.5 Cinétique de séchage des produits : <i>Cas feuilles verveine</i>	94
V.5.1 La verveine	94
V.5.2 Protocole expérimentale	95
V.5.3 Évolution de la masse humide pendant le séchage.....	96
V.5.4 Produit séché	96
V.6 La journée 14/08/2020 : séchage la banane.....	97
V.6.1 Les ingrédients	97
V.6.2 Les étapes de préparation	97
V.6.3 Produit séché	97
V.7 Conclusion.....	101
Références	102
Conclusion générale	104
Annexes	

Liste des figures

Figure	légende	page
CHAPITRE I		
Figure I.1	Schématisation du collecteur plan à air	5
Figure I.2	Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999	6
Figure I.3	Séchoir solaire indirect en mode passif développée en C.D.E.R.	6
Figure I.4	schéma descriptif du séchoir utilisé dans le travail de (Dilip R, et al. 2002)	7
Figure I.5	(a) Schéma d'un séchoir solaire discontinu (c) Schéma interne de la chambre séchage (b) Schéma du collecteur.	8
Figure I.6	influence de l'utilisation d'un appoint de chauffage sur l'humidité de produit (Bennamoun and Belhamri 2003)	8
Figure I.7	Séchoir solaire direct à convection naturelle et Vue latérale du sèche-linge	8
Figure I.8	Séchoir solaire direct en mode passif développée en C.D.E.R	9
Figure I.9	Schématisation du séchoir solaire à desséchant intégré.	10
Figure I.10	Schéma du séchoir solaire avec stockage thermique.	10
Figure I.11	Séchoir solaire à coque développée en I.N.A.	11
Figure I.12	Séchoir indirect en mode actif développée en I.N.A.	11
Figure I.13	Séchoir solaire de type serre.	12
Figure I.14	Variation de la radiation solaire, Température ambiante et la température à L'intérieur de serre et en fonction de temps.	12
Figure I.15	séchoir serre réalisée.	13
Figure I.16	Évolution de la température en deux points de chaque claie	13
Figure I.17	Séchoir solaire étudié.	13
Figure I.18	Feuilles de menthe avant et après séchage.	14
Figure I.19	Séchoir solaire indirect à convection forcée.	14
Figure I.20	procédure de séchage de pomme de terre.	14
Figure I.21	Prototype expérimentale du séchoir solaire indirect réalisé à l'URER/MS d'Adrar.	15
Figure I.22	séchage de piment rouge (à gauche avant le séchage et à droite après le séchage).	15
Figure I.23	qualité des tomates avant et après le processus de séchage dans le séchoir.	16
Figure I.24	modèle du séchoir solaire indirect à convection forcée utilisé.	16
Figure I.25	Préparation du produit (pomme de terre).	16
Figure I.26	Produit séché.	16
Figure I.27	Préparation du produit (piment rouge).	17
Figure I.28	Produit séché.	17
Figure I.29	Préparation du produit (petit pois)	17
Figure I.30	Produit séché (petit pois)	17
CHAPITRE II		
Figure II.1	Mode de transfert lors du séchage.	23
Figure II.2	Description du solide humide.	26
Figure II.3	Exemples des séchoirs solaires directs simples.	29
Figure II.4	Exemples séchoir solaire indirect	30
Figure II.5	Séchoir solaire mixte	30
Figure II.6	Exemples des séchoirs solaires hybrides	31
Figure II.7	Différents types séchoirs solaires.	32

CHAPITRE III		
Figure III.1	coupe capteur solaire à eau	36
Figure III.2	capteur solaire à air	36
Figure III.3	Schéma de principe capteur solaire plan à air.	37
Figure III.4	L'effet de serre dans un capteur solaire.	38
Figure III.5	Échanges et transferts thermiques entre les éléments d'un capteur plan à air	40
Figure III.6	schéma équivalence électrique-thermique du capteur solaire à air.	45
Figure III.7	Echanges thermiques dans un capteur solaire plan à air	46
Figure III.8	le principe du calcul numérique.	50
CHAPITRE IV		
Figure IV.1	Prototype expérimentale du séchoir solaire.	59
Figure IV.2	dimension du cadre parallélépipédique du capteur solaire.	60
Figure IV.3	Structure et dimension des côtés du capteur.	61
Figure IV.4	L'installation de la couche d'isolation.	61
Figure IV.5	Peinture naturelle.	62
Figure IV.6	Revêtement de la surface d'absorbeur (interne)	62
Figure IV.7	Installation de la plaque absorbante et le vitrage dans le cadre du capteur.	63
Figure IV.8	Collage des côtés du capteur	63
Figure IV.9	Coupe longitudinale du capteur solaire	63
Figure IV.10	Capteur solaire à air.	64
Figure IV.11	La chambre du séchage	64
Figure IV.12	Fabrication des claies	65
Figure IV.13	Illustration du glissement de capteur dans la conduite.	65
Figure IV.14	Schéma du séchoir solaire indirect	66
Figure IV.15	Coupe longitudinale du séchoir solaire.	67
Figure IV.16	Prototype expérimental du séchoir solaire indirect installé à l'UREMS.	68
Figure IV.17	Installation des thermocouples	68
Figure IV.18	Raccordement des différents thermocouples à l'acquisition des données.	69
Figure IV.19	Pyranomètre.	69
Figure IV.20	Eclairement solaire.	71
Figure IV.21	Température ambiante mesurée.	71
Figure IV.22	Variation temporelle de la température au niveau d'absorbeur	72
Figure IV.23	La variation temporelle de la température au niveau vitrage	72
Figure IV.24	Evolution temporelle de la température de l'air à l'entrée et sortie du capteur.	73
Figure IV.25	Allure de température des différentes couches du capteur pour l'expérimentation	74
Figure IV.26	Variation temporelle de la température de l'air dans la chambre et la cheminé.	75
Figure IV.27	la variation temporelle de la température simulée des différentes composantes du capteur à air.	76
Figure IV.28	évolution de la température de l'air le long du capteur.	76
Figure IV.29	Rendement thermique instantanée	77
Figure IV.30	Eclairement simulé et expérimentale.	78
Figure IV.31	les températures mesurées et simulées, (a) la plaque absorbante, (b) la partie externe du vitre, (c) la partie interne du vitrage et (d) la température de sortie de l'air	78

CHAPITRE V		
Figure V.1	Hygromètre.	83
Figure V.2	Une balance électronique.	83
Figure V.3	Les étapes de préparation de la menthe.	84
Figure V.4	Le Laurier	84
Figure V.5	Les claies chargées par les produits à l'intérieur de la chambre de séchage.	85
Figure V.6	Variation de la masse de produit (La Laurel).	86
Figure V.7	Variation de la masse de produit (la menthe).	86
Figure V.8	Variation de l'éclairement solaire et de la température ambiante Le 24/06/2020	87
Figure V.9	Variation de la température à l'entrée de la chambre.	88
Figure V.10	Variation de la température à la sortie de la chambre.	88
Figure V.11	Evolution temporelle de la température d'air asséchant et l'humidité relative à la sortie de la chambre.	89
Figure V.12	La menthe avant et après le séchage.	89
Figure V.13	Le laurier avant et après le séchage.	89
Figure V.14	Les étapes de préparation de la pomme.	90
Figure V.15	L'emballage du produit.	91
Figure V.16	L'évolution de poids du produit durant l'opération de séchage.	92
Figure V.17	Variation température ambiante au cours du temps.	93
Figure V.18	Variation temporelle de la température à l'entrée de la chambre	93
Figure V.19	Variation temporelle de la température à la sortie de la chambre.	93
Figure V.20	La pomme avant et après le séchage.	94
Figure V.21	Feuilles de verveine	94
Figure V.22	Les claies chargées par les produits à l'intérieur de l'enceinte de séchage.	95
Figure V.23	représente la diminution du poids des feuilles de verveine en fonction de temps.	96
Figure V.24	photo les feuilles verveine avant et après le séchage.	96
Figure V.25	les étapes de séchage.	98
Figure V.26	Fonctionnement séchoir solaire.	98
Figure V.27	Etat du produit après le séchage à 14 h.	99
Figure V.28	Etat du produit à 17 h.	99
Figure V.29	L'aspect final des rondelles de banane séchée (épaisseur=1 cm).	100
Figure V.30	L'aspect final des rondelles de banane séchée (épaisseur=0.5cm).	100

Liste des tableaux

Tableau	légende	page
CHAPITRE I		
Tableau I.1	Les résultats de séchage des produits étudiés à séchoir solaire indirect, comparés à ceux obtenus à l'air libre.	7
Tableau I.2	Résultats relatifs au séchage de quelques produits agroalimentaires	9
Tableau I.3	Taux d'extraction spécifique d'humidité du système pour le séchage de 20 kg de pois à différents débit d'air (Shanmugama and Natarajanb 2006)	10
CHAPITRE III		
Tableau III.1	schémas numériques des dérivées partielles.	51
CHAPITRE IV		
Tableau IV.1	Caractéristique du site d'URER-MS (Route du Reggane, Adrar)	67
Tableau IV.2	Echantillon des résultats obtenus	70
CHAPITRE V		
Tableau V.1	Variation du poids mesuré durant le séchage.	86
Tableau V.2	Evaluation de poids de produit	91
Tableau V.3	Variation du poids de verveine mesurés au cours du séchage	95



Introduction générale

Introduction générale

Depuis l'antiquité, l'énergie solaire a été utilisée pour produire la chaleur. Son domaine d'application est vaste et varié. Le préchauffage, chauffage des bâtiments, l'eau chaude sanitaire, le séchage des produits agro-alimentaires et la production de l'électricité en sont quelques exemples sommaires dans la filière thermodynamique.

En Algérie en générale et plus particulièrement au sud de l'Algérie, nous nous intéressons à l'utilisation des énergies nouvelles et renouvelables qui sont inépuisable et non polluantes pour aider au développement local.

Sachant que, le potentiel en énergie solaire en Algérie représente 60 fois des besoins énergétiques de l'Europe de l'ouest, selon le ministère Algérien de l'énergie. Ce même potentiel représente quatre fois la consommation énergétique mondiale d'après NEAL (New Energy Alegria). [1][2]

La moyenne de l'éclairement solaire est de : 1700 kWh /m²/an pour les régions côtières, 1900 kWh /m² /an pour les hauts plateaux et 2650 kWh /m² /an pour le Sahara, Cette énergie est suffisante pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles. [3]

Dans ce contexte, nous allons concevoir un séchoir solaire portable (portatif). Il se constitue d'un capteur thermique plan à air et d'une enceinte (chambre ou armoire) du séchage, et d'un autre capteur qui permette le tirage de l'air humide sortant du chambre. Une fois construit, il est alors nécessaire de l'optimiser en vue de l'utiliser pour sécher les produits agro-alimentaires (dans notre cas : fruits et plantes).

En effet, l'objectif principal du dispositif conçu est de permettre l'obtention des produits agricoles disponibles au cours des différentes saisons grâce à une meilleure conservation de ces produits séchés, aussi avoir des produits de qualité à la fois sur le plan hygiénique et sécuritaire que sur le plan gustatif et nutritionnel.

Surtout que nous savons tous que le séchage par énergie solaire à l'air libre, a plusieurs inconvénients comme les rayonnements UV, les insectes, la poussière, le vent...

Ainsi le présent travail a donc pour but de réaliser une investigation théorique et expérimentale permettant d'explorer et d'expliquer au mieux les phénomènes de transferts thermiques et les écoulements convectifs en faisant une modélisation mathématique puis

schématiser les profils de température des différents composants du premier capteur équipant le séchoir solaire, également étudier et maîtriser tous les éléments susceptibles d'influer sur son rendement.

Notons que, la performance du séchoir dépend du choix des matériaux utilisés pour la fabrication de celui-ci, de la conception du capteur solaire qui lui est associé, de son orientation, de la latitude du lieu afin de recevoir le maximum du flux solaire, également de la compréhension et de l'interprétation des phénomènes physiques notamment le mécanisme de transferts thermique.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique qui retrace les recherches engagées dans le domaine du séchage et plus particulièrement sur les différents séchoirs solaires qui ont été réalisés dans différents pays.

Le deuxième chapitre, fournit un aperçu sur des notions de bases y compris les principaux concepts sur le séchage ainsi que les différents types des séchoirs solaires et leur fonctionnement.

Le troisième chapitre est réservé à la modélisation du capteur plan à air afin de proposer un modèle théorique traduisant les phénomènes de transferts thermique.

Les étapes de conception et réalisation du séchoir solaire étudié sont détaillées dans le quatrième chapitre.

Dans le dernier chapitre nous exposons les résultats d'utilisation du séchoir solaire ainsi conçu et réalisé. L'expérimentation est faite sur le séchage de plusieurs produits de caractéristiques différentes : la banane, la pomme, le laurier, la menthe et la verveine.

Références :

[1] BETTAYBI AMMAR, Etude expérimentale du séchage des produits agroalimentaires ; comparaison entre deux modes de séchage, Mémoire master, Option: Systèmes Energétiques et Développement Durable, Université de Biskra, 2017.

[2]Ministère de l'énergie et des mines. www.mem.algeria.org .

[3] MINISTERE DE L'ENERGIE. Potentiels National des Energies Renouvelables. Site de web : <http://www.energy.gov.dz/francais/indicex.php?page=potentiels-national-des-energies-renouvelables>,



Chapitre I:

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les principales recherches ayant abordé la technique de séchage solaire et qui s'est intéressés à la conception des capteurs et séchoirs dans le monde, particulièrement en Algérie, notamment les séchoirs solaires développés localement et testés dans les différentes régions climatiques.

I.2 Présentation de quelques travaux antérieurs sur le Séchage solaire :

Plusieurs études ont été faites sur la première catégorie des séchoirs solaires indirects, ainsi que sur la réalisation des capteurs solaires, parmi, on cite le travail de **Semmar, Betrouni et al. 1998**.

Ce travail porte sur l'étude et la conception d'un capteur solaire à air destiné à la production d'air chaud. Simuler ce comportement par un programme informatique utilisant un modèle mathématique où tous les paramètres caractérisant la performance du système sont évalués instantanément durant la période d'ensoleillement. [1]

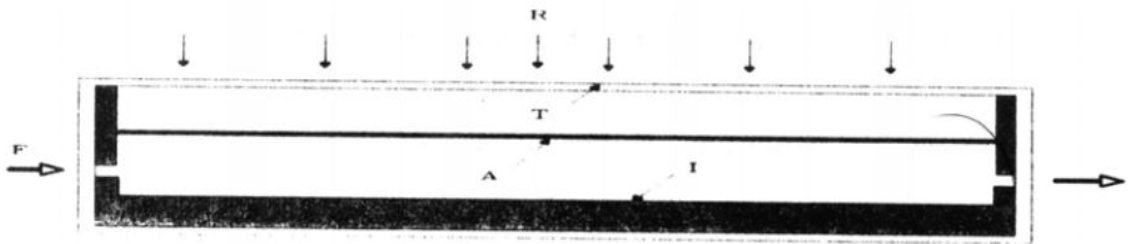


Figure I. 1 : Schématisation du collecteur plan à air

R : Rayonnement incident **T** : Plaque transparente
A : Plaque absorbante **I** : Isolant thermique **F** : Ecoulement d'air [1]

L'étude **Boulemtafes et Semmar 1999**: couplée le capteur solaire à air avec une enceinte bien calorifugée le but de réaliser des expériences sur le séchage indirect des fruits et légumes.

La partie expérimentale étudier les caractéristiques de l'air de séchage, c'est-à-dire, sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit ainsi que leurs évolutions au cours d'une journée caractéristique. Permet classer les différents produits agroalimentaires qui peuvent être séchés dans ce séchoir. [2]

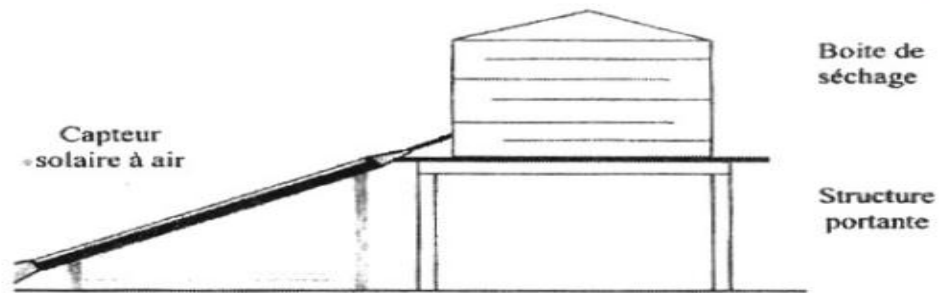
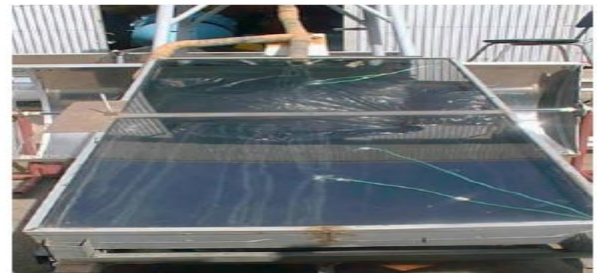


Figure I. 2: Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999 [2]

Miri et al 2002. Le but primordial de ce travail est une étude expérimentale d'un séchoir solaire indirect, afin d'étudier l'influence de la double circulation d'air, en amont et en aval de l'absorbeur, de l'insolateur. La température de l'air de séchage était environ **50 - 60°C**. les produits séchés étaient durant le mois d'Août. Les résultats obtenus comparés à ceux obtenus par séchage à l'air libre L'efficacité calculée du séchoir solaire était d'environ **40%**. [3]



a) Séchoir solaire expérimental



b) Capteur solaire à air

Figure I.3 : Séchoir solaire indirect en mode passif développée en **C.D.E.R.**

Les durées de séchage, les gains en heures ainsi que les pertes de masses relevés pour chaque produit sont résumés dans le tableau suivant :

produits	Temps de séchage dans le séchoir [heure]	Temps de séchage à l'air libre [heure]	Gains [heure]	Masse initiale [g]	Masse finale [g]	% d'humidité extraite
Menthe	30	50	20	200	40	80
Piment	243	342	99	300	60	80
Raisin	318	580	262	500	150	70
Laurier	28	52	24	300	120	60
Verveine	30	52	22	300	75	75

Tableau I.1 : Les résultats de séchage des produits étudiés à séchoir solaire indirect, comparés à ceux obtenus à l'air libre.

Au sein de l'école de l'énergie et études environnementales en **Inde, PANGAVHANE Dilip et al. 2002**, Ont utilisés un séchoir solaire indirect, fonctionnant à convection naturelle, Les résultats obtenus par ce séchoir sont encourageantes, dont la température à la sortie varie entre **50 °C** et **55 °C**. Durant la période d'expérimentation qui s'étale de **Mars** à **Mai**, Ils ont observé que le séchage des raisins par ce système prend **04** jours, alors que le séchage traditionnel nécessite une durée allant de **07** à **15** jours. [4]

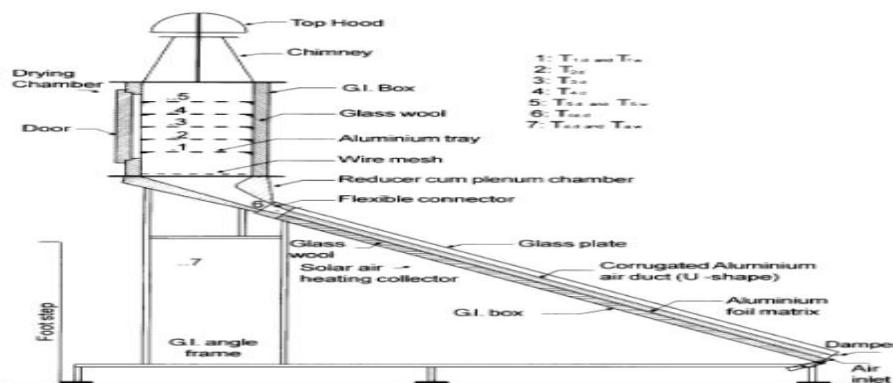


Figure I. 4: schéma descriptif du séchoir utilisé dans le travail de (**Dilip R, et al. 2002**) [5]

L'étude de **Bennamoun and Belhamri 2003**, montre l'importance du séchage solaire utilisant l'appoint de chauffage par rapport au séchage sans appoint, dans un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée pour sécher les oignons. La conclusion de ces résultats ont montré que la teneur en eau du produit sans utilisation d'appoint de chauffage, n'a pu atteindre la valeur voulue en fin de séchage, par contre, la teneur en eau du produit avec utilisation d'appoint atteint la valeur voulue, un gain de temps de séchage est obtenu, il est évalué peu après **15 h** en général. L'utilisation d'un appoint peut réduire considérablement le temps de séchage voir **figure. [6]**

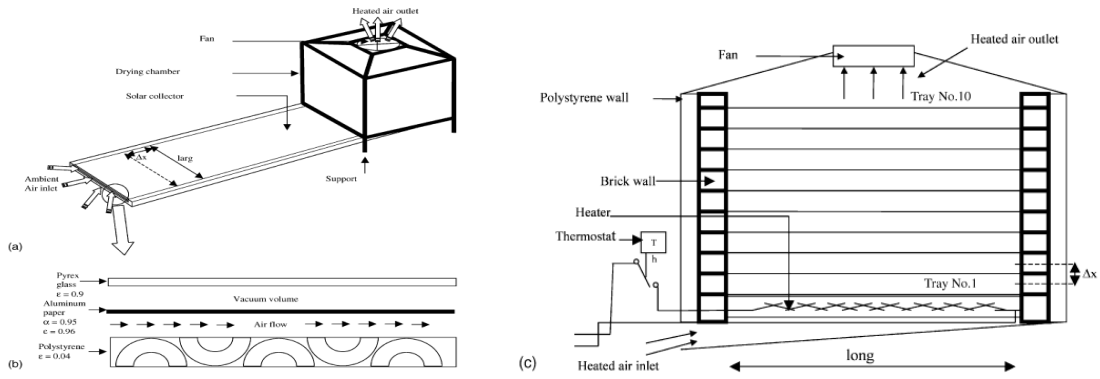


Figure I. 5 : (a) Schéma d'un séchoir solaire discontinu (c) Schéma interne de la chambre séchage
 (b) Schéma du collecteur. [7]

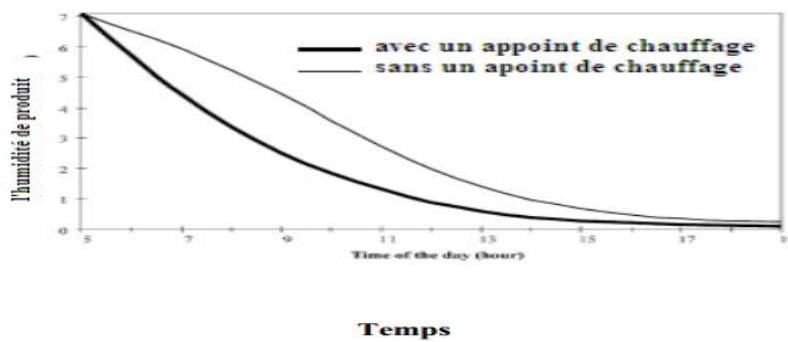


Figure I.6: influence de l'utilisation d'un appoint de chauffage sur l'humidité de produit (Bennamoun and Belhamri 2003) [7]

Singh et al 2004 ont présent une conception multi-étagères d'un séchoir solaire portable a été réalisé en Inde pour le séchage des feuilles de fenugrec .une plaque absorbant incliné est placée comme une source chaleur .cette configuration a facilité le chauffage de l'air entre les claies pour un séchage uniforme.

La convection naturelle au sein d'un tel type de séchoir ne peut engendre que faible vitesses pour l'air asséchant. [8]

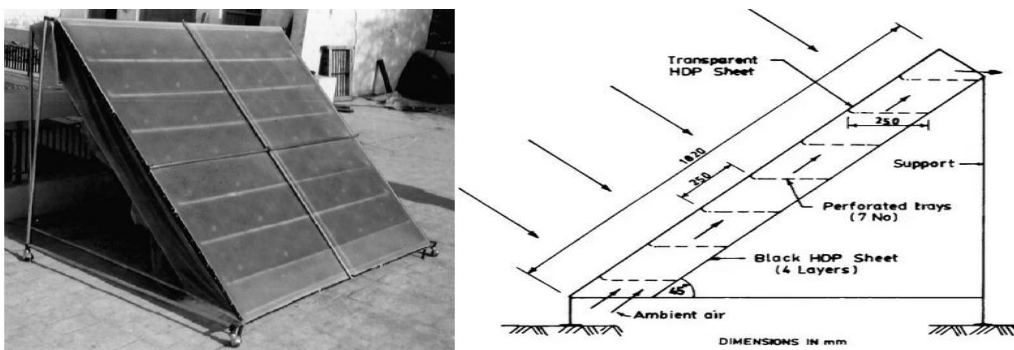


Figure I.7 : Séchoir solaire direct à convection naturelle et Vue latérale du sèche-linge. [8]

El **Mokhetar et al 2004 [9]** a présenté un séchoir solaire armoire simple réalisé au **C.D.E.R.** a été testé durant la période estivale. La vitesse de L'air varie entre **1,2 à 2 m/s**. La température et les rayonnements de flux à l'intérieur de la chambre de séchage étaient respectivement de **46 ° C** et **653 W/m²**. Les résultats comparés à la méthode de séchage au soleil. Les résultats relèvent que ce séchoir solaire de l'armoire a la possibilité de sécher de **2 à 5** fois rapidement les produits que le séchage au soleil ouvert. [10]

Produits	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Humidité extraite (%)	Temps de séchage dans le séchoir (heures)	Temps de séchage à l'air libre (heures)	Gains (heures)
Menthe	1000	83	83 %	8	48	40
Verveine	1000	430	67 %	48	72	24
Laurier	1000	427	64 %	28	72	24
Banane	1000	271	73 %	144	744	600
Raisin	1000	251	75 %	268	576	312
Prunes	1000	277	72,3 %	175	576	401
Piment	1000	307	70 %	72	336	270
Figues	1000	205	77,2 %	219	960	741
Dattes	1000	846	15,4 %	214	960	746

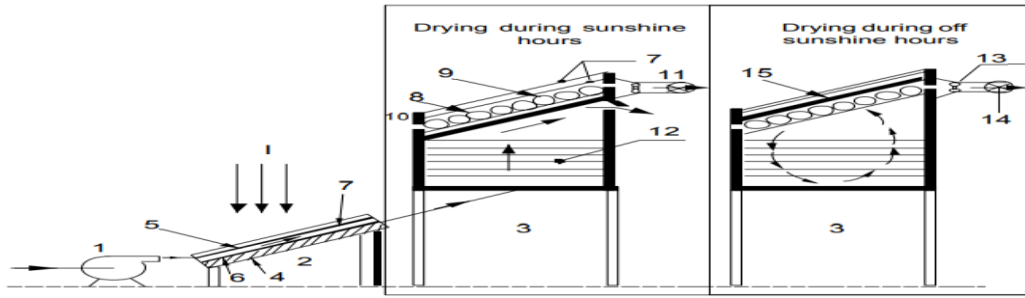
Tableau I.2: Résultats relatifs au séchage de quelques produits agroalimentaires [9]



Figure I.8: Séchoir solaire direct en mode passif développée en **C.D.E.R** [9]

Pour assurer la continuité du séchage pendant les heures de non ensoleillement, des séchoirs des dispositifs de stockage d'énergie ont été conçus et expérimentés (**Shanmugama et Natarajanb 2006, Dilip en 2007**)

La **figure I.9** présente un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée, fabriqué et exécuté dans des conditions climatiques chaudes et humides en Chennai à **Inde**, pour étudier l'efficacité thermique et l'humidité enlevée pendant le séchage de **75 kg** de pois. ces résultats montre que le séchage dans un séchoir de type intégré se continue dans les heures non ensoleillées, en plus, la qualité du produit est améliorée pour variation débit avec taux d'extraction d'humidité (tableau I.3), ainsi que l'efficacité thermique qui atteint **63 %**. [12]



(1 Ventilateur, 2 Capteur solaire, 3 Chambre de séchage, 4 Isolation, 5 Plaque absorbante, 6 Plaque inférieure, 7 Couverture transparente, 8 Lit desséchant, 9 Contreplaqué, 10 Entrée d'air, 11 Conduit pour la sortie d'air, 12 Claies de séchage, 13 Ventilateur réversible, 14 Soupape, 15 Contreplaqué). [13]

Figure I.9: Schématisation du séchoir solaire à desséchant intégré.

Débit d'air (kg/ s)	Temps de séchage (h)	Spécifique taux d'extraction d'humidité (kg/kw.h)
0.03	14	0.82
0.02	18	0.65
0.01	21	0.55

Tableau I.3 : Taux d'extraction spécifique d'humidité du système pour le séchage de 20 kg de pois à différents débit d'air (Shanmugama and Natarajanb 2006)

Dilip a développé un nouveau type de séchoir à convection naturelle avec une unité de stockage Ce type se compose d'un réchauffeur d'air plat, relié avec réflecteur de forme polygone **figure 10**. Ce système est destiné pour le séchage de l'oignon, avec une capacité de **90 kg**. Cette opération est effectuée pendant un jour du mois d'octobre. [14]

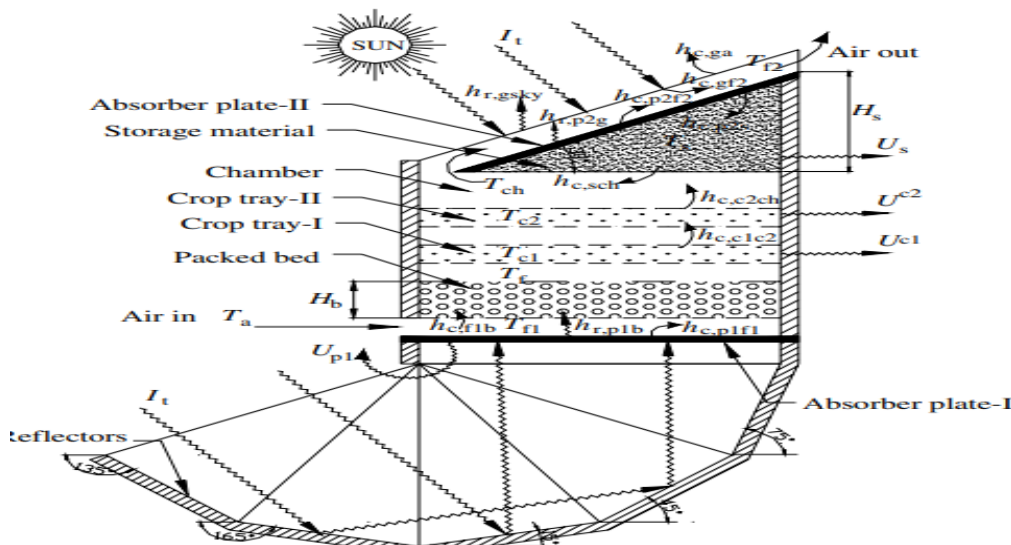


Figure I.10: Schéma du séchoir solaire avec stockage thermique. [15]

L'objectif du travail de **Ferradji et al 2008** porte sur l'étude du séchage solaire du raisin de variété Sultanine en utilisant Séchoir solaire à coque développée en **I.N.A.** Le séchoir a une surface de $0,91 \text{ m}^2$ et peut supporter 8 kg de raisins, les résultats obtenus le temps de séchage atteindre **11 h**, à température **65°C** et son débit était d'environ $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Essai du mois d' Août.

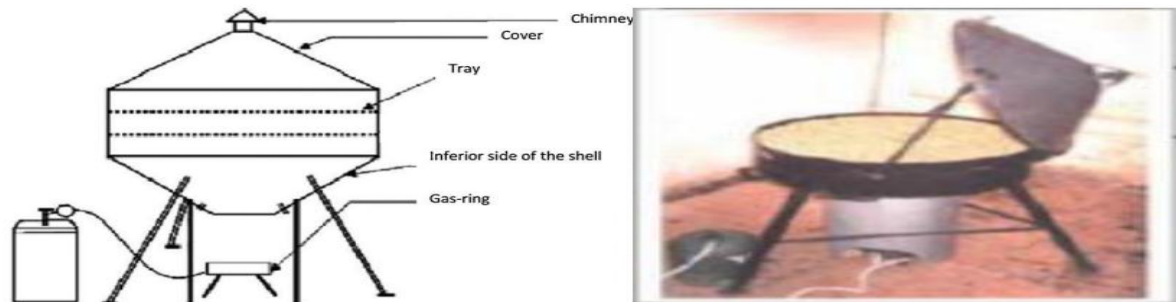


Figure I.11: Séchoir solaire à coque développée en **I.N.A.** [16]

Séchoir indirect en mode actif développée en **I.N.A.** Comme il est représenté dans la **Figure 13** le séchoir solaire est divisé en trois parties ; Le collecteur solaire, la chambre de séchage et le ventilateur La valeur moyenne de la température de l'air chauffé qui se dirige vers la chambre de séchage était de **46°C** . Toutefois, la vitesse de l'air était de **2 m/s** . Le produit testé était l'abricot et environ **300 min** étaient nécessaires pour extraire **50%** de l'humidité du produit. [17]

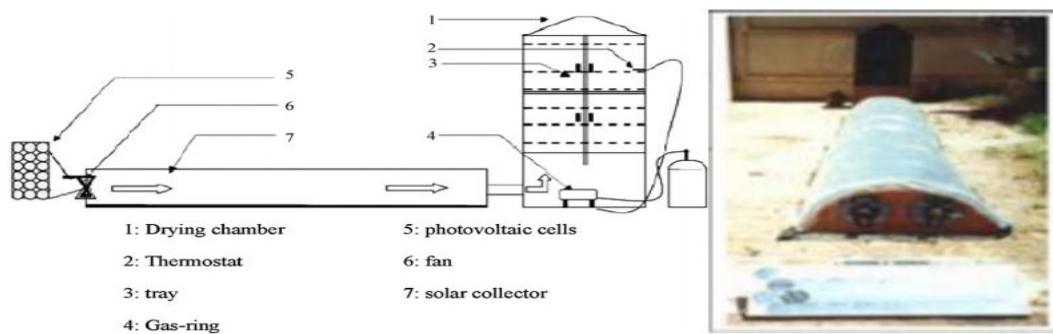


Figure I.12: Séchoir indirect en mode actif développée en **I.N.A.** [16]

EL khadraoui Aymen, et al 2010 Un nouveau séchoir solaire en mode mixte de type serre a été mis au point pour le séchage de piment rouge. Il est constitué d'un capteur solaire à air plan et une serre mono-chapelle, Ce séchoir est réalisé au (**CRTEn**) de Borj Cedria (nord de la Tunisie), Les essais de séchage pendant **septembre 2013**, la Duré de séchage de piment dans sechoir soliare atteindre **17 h** par rapport a plein air **24 heures**. Sur la **figure I.13**

précédente que pendant la période de séchage, la température ambiante et la température à l'intérieur de la serre varient de **21.25** à **35.71** °C et **29.21** à **49.88**°C, respectivement. [18]



Figure I.13: Séchoir solaire de type serre.

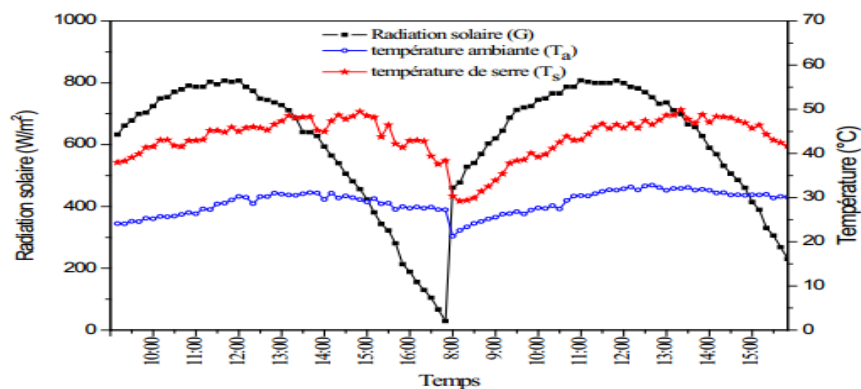


Figure I.14: Variation de la radiation solaire, Température ambiante et la température à l'intérieur de serre et en fonction de temps.

Ce travail est effectué par **Melle DEBIANI Kahina2013** Dimensionnement et Réalisation d'une Serre Solaire Destinée pour le Séchage des Déchets Alimentaire pour utilise dans l'agriculture, Le dispositif réalisé à l'**UDES** avec une forme géométrique triangulaire dans la wilaya de Tipaza. Le **02/09/2013** est effectué dans des conditions climatiques favorables, le produit (déchets de poivron rouge) dans durée de séchage de **4 heures**, il remarqué la troisième claie sèche plus vite que les deux autres claies, ce qui est dû à la circulation de l'air chaud qui va du bas vers le haut. [19]

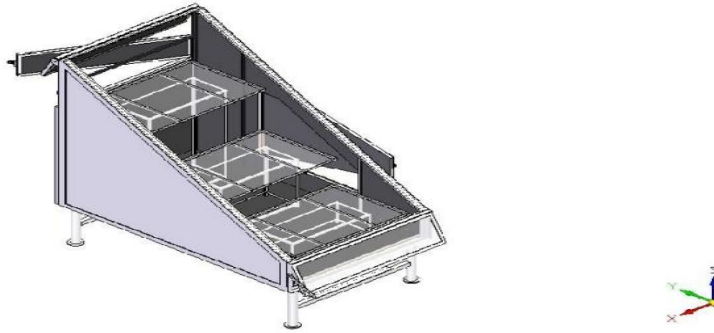


Figure I.15: séchoir serre réalisée.

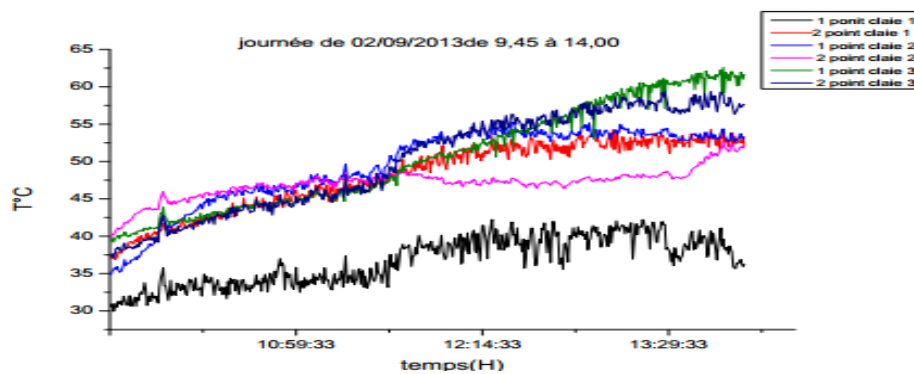


Figure I.16: Évolution de la température en deux points de chaque claie

Dans ce travail **Bayouhd aida et al**, [20] expérimenté le séchoir solaire indirect à convection forcée qui est fabriqué au sein de l'ENIM pour le séchage de feuilles de menthe verte. Nous avons effectués deux expériences :

L'expérience première est réalisée le **18/09/2013** sans recyclage d'air, La durée de séchage est de six heures pour une température d'air asséchant qui varie entre **30°C** et **40°C** pendant la période de séchage , et la durée de séchage pour la deuxième expérience est effectuée le **20/09/2013** avec un système de recyclage d'air est de l'ordre de quatre heures avec une température d'air asséchant qui varie entre **38°C** et **52°C**.



Figure I.17: Séchoir solaire étudié.



Figure I.18: Feuilles de menthe avant et après séchage.

Mokhtar Lati , Slimane Boughali 2015 ,L'objectif principal ce travail consiste à l'étude de la cinétique du séchage de la pomme de terre en utilisant un séchoir solaire indirect à convection forcée Développée en(LENREZA),Université Ouargla ,La température moyenne du séchage est de 60°C ,Les résultats expérimentaux obtenus, montrent que la durée de séchage de la pomme de terre (d'épaisseur 0.003m et de teneur en eau initial de 4 kg d'eau/kg ms), est de 6 h .Ce travail a été effectué dans le but de préparer une farine de pomme de terre. [21]

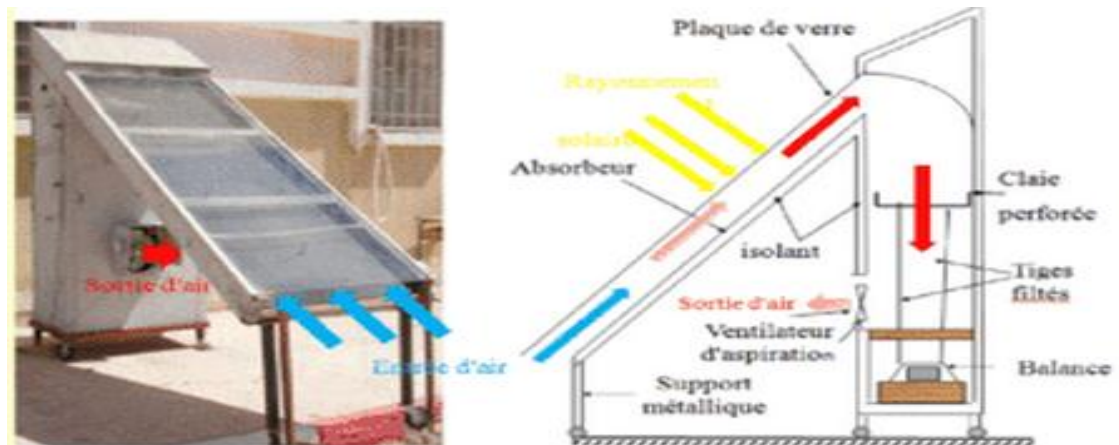


Figure I.19 : Séchoir solaire indirect à convection forcée.

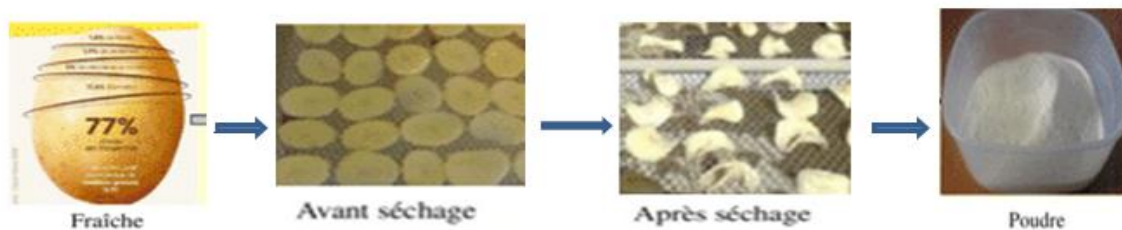


Figure I.20 : procédure de séchage de pomme de terre.

le travail **SLIMANI Mohammed EL-Amine** [11] porte essentiellement sur le séchage solaire de piments rouges et de tomates par l'intégration d'un capteur solaire hybride PV/T à doubles écoulements dans un séchoir solaire indirecte à convection forcée a été présenté sous les conditions climatique du sud algérien (Adrar). Un première prototype de ce séchoir a été réalisé au niveau de l'URE R/MS.

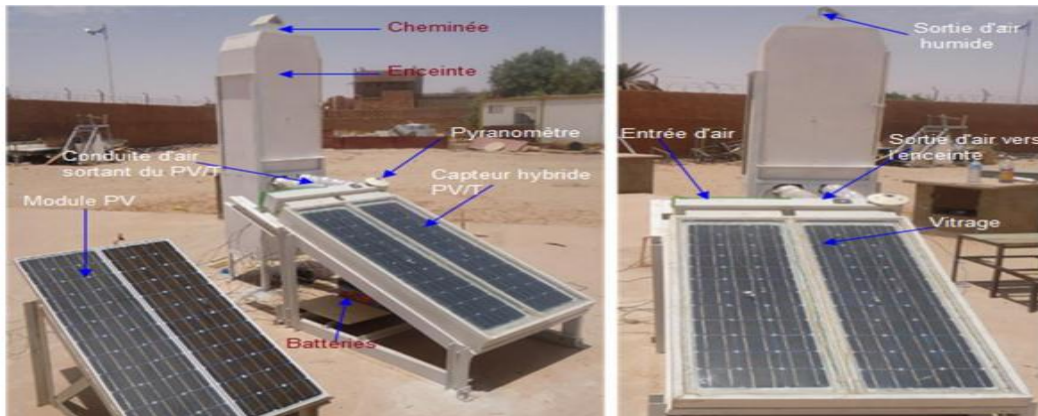


Figure I.21 : Prototype expérimentale du séchoir solaire indirect réalisé à l'URER/MS d'Adrar.

Des essais expérimentaux du séchage des piments rouge et des tomates découpées tranches minces dans le séchoir solaire et en plein air.

➤ Séchage du piment rouge :

Séchage des morceaux des piments ont été effectués pendant deux journées successives du mois de mai (le 30 et le 31) .les piment ont une teneur en eau initiale de 11.5 Kg d'eau/Kg de matière séché, après 30 h de séchage à l'intérieur de l'enceinte, le produit se trouve presque en état sec avec une teneur en eau moyenne 0.3 Kg d'eau/Kg de MS à la température de séchage atteint à 70°C ,alors que au séchage naturel le produit ne sèche qu'après 70 h.



Figure I.22: séchage de piment rouge (à gauche avant le séchage et à droite après le séchage).

➤ Séchage de la tomate :

Le séchage de la tomate a été effectué pendant deux journées du mois juin (le 1 et le 2). La teneur en eau du produit dans le séchoir solaire a été réduite une valeur initiale de 14.5Kg d'eau/ Kg de matière sèche à une valeur finale de 0.3 Kg d'eau/Kg de matière

sèche environ 20 heures de séchage à l'intérieur du séchoir La température de séchage atteint à (50 °C à 60°C).



Figure I.23 : qualité des tomates avant et après le processus de séchage dans le séchoir.

Dans ce mémoire **MESAI AHMED Abdelouahed** et **TEMACINI Bachir**, intéressé au séchage solaire indirect par convection forcée de l'air chaud qui est assuré par un concentrateur parabolique vers la chambre de séchage 300-700°C. [22]

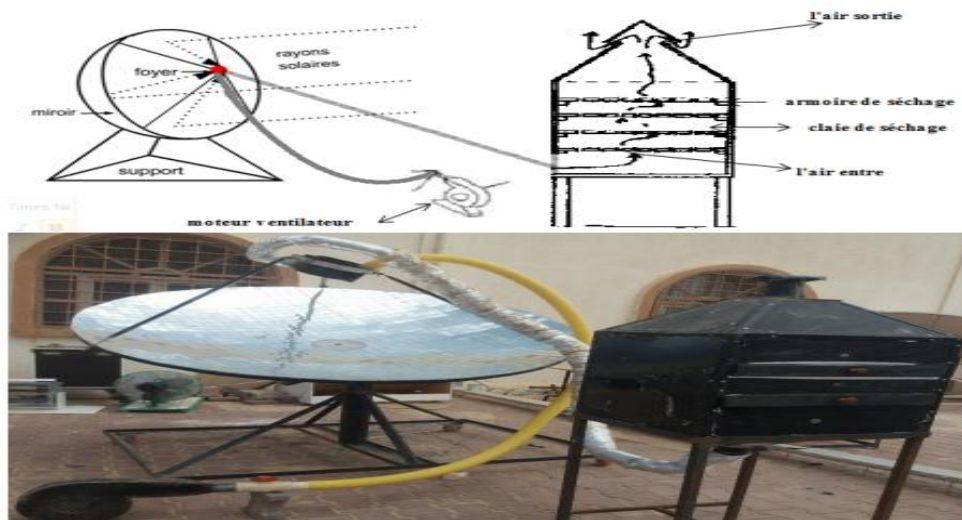


Figure I.24 : modèle du séchoir solaire indirect à convection forcée utilisé. [23]

➤ Le [23/04/2018] séché la pomme de terre :

- épaisseur 0.003m et un teneur en eau initial de (350g d'eau/79g ms), la durée de séchage est 3h. la température attient à 57°C.



Figure I.25 : Préparation du produit (pomme de terre).



Figure I.26 : Produit séché.

➤ Le [24/04/2018] séché piment rouge :

-les Gousses moitié set un teneur en eau initial de (250g d'eau/23g ms), la durée de séchage est 6 h. La température attient à 56°C.



Figure I.27 : Préparation du produit (piment rouge).



Figure I.28 : Produit séché.

➤ Le [28/04/2018] séché petit pois :

-les grains frais et un teneur en eau initial de (300g d'eau/54g ms), la durée de séchage est 5h. La température attient à 55°C.



Figure I.29: Préparation du produit (petit pois)



Figure I.30: Produit séché (petit pois)

I.3 Conclusion :

La recherche bibliographique faite nous a permis de situer notre travail à faire par rapport aux travaux menés à travers le monde et nous a aussi donné l'idée de concevoir un petit séchoir solaire portable pour sécher les fruits et légumes, ainsi que les plantes, qui dépend principalement de l'énergie propre et renouvelable, l'énergie solaire, et qu'il peut être utilisé à la maison.

Références:

- [1] SEMMAR, D., BETROUNI, S., et LAFRI, D. Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air'. Revue des énergies renouvelables (CDER). Issn, 1998, p. 1112-2242.
- [2] BOULEMTAFES, A., SEMMAR, D. Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect. Revue des Energies Renouvelable, 1999, vol. 4, p. 97-100.
- [3] MIRI, R., MOKRANI, O., SIAD, F., et al. Étude expérimentale d'un séchoir solaire. Revue des Énergies Renouvelables, 2002, p. 41-48.
- [4][12] BOUSSALIA, Amar. Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Mémoire de Magister en Génie climatique, université MANTOURI-CONSTANTINE, soutenu le 27/06/2010.
- [5] PANGAVHANE, Dilip R.; SAWHNEY, R. L.; SARSAVADIA, P. N. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. Energy, 2002, vol. 27, no 6, p. 579-590.
- [6] [22] MESAI AHMED, A.; TEMACINI, Bachir. Etude expérimentale du séchage solaire des produits agroalimentaires de la région d'el-oued. Mémoire de Master Académique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2017-2018.
- [7] BENNAMOUN, Lyes; BELHAMRI, Azeddine. Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. Journal of food engineering, 2003, vol. 59, n° 2-3, p. 259-266.
- [8] SINGH, Sukhmeet; SINGH, Parm Pal; DHALIWAL, S. S. Multi-shelf portable solar dryer. Renewable Energy, 2004, vol. 29, n° 5, p. 753-765.
- [9] EL MOKHETAR, S.; MIRI, R., et BELHAMEL, M. Etude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir de type serre applications au séchage des produits agro-alimentaires. Revue des énergies Renouvelables, 2004, vol. 7, p. 109-123.
- [10] [17] NASRI, Mohamed Yacine. Faisabilité et adaptation des séchoirs solaire sous le climat local. Thèse de doctorat troisième cycle LMD en génie climatique, université des Frères Mentouri-Constantine, soutenue le 14/04/2018.

- [13] SHANMUGAM, V. ; NATARAJAN, E. Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable Energy*, 2006, vol. 31, n°8, p. 1239-1251.
- [14] HOUHOU, Hatem. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires. Mémoire de magister en génie mécanique, université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [15] JAIN, Dilip. Modelling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer. *Journal of Food engineering*, 2007, vol. 78, n°2, p. 637-647.
- [16] FERRADJI, A., GOUDJAL, Y., et MALEK, A. Séchage du raisin de variété Sultanine par un séchoir solaire à convection forcée et un séchoir de type coquillage. *Revue des Energies Renouvelables SMSTS*, 2008, vol. 8, p. 177-185.
- [18] ELKHADRAOUI, Aymen; et al. Etude expérimentale de la performance d'un séchoir solaire de type serre: séchage de piment. 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage (SMSTS'2015).
- [19] DEBIANI, Kahina. Dimensionnement et réalisation d'une serre solaire destinée pour le séchage des déchets alimentaires. Mémoire de Master, université Saad Dahlab-Blida, Soutenue le 02/10/2013.
- [20] BAYOUDH, A.;SGHAIER, J. Séchage solaire des feuilles de menthe verte. *Revue des Energies Renouvelables*, 2014, vol. 17, n°3, p. 427-433.
- [21] LATI, Moukhtar; BOUGHALI, Slimane. Etude expérimentale de la cinétique de séchage de la pomme de terre, 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage(SMSTS'2015), Ouargla (Algérie), du 22 au 24 Novembre, 2015 .

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The interior of the scroll is white, and the text is centered within it. The scroll is positioned in the upper half of the page.

Chapitre II:

Généralités sur le
séchage et les séchoirs
solaires

II.1 Introduction :

De nombreux produits agricoles, consommés en grands quantités ne sont pas toujours disponible au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à ce handicap : culture sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produit.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents concepts de base liés au séchage en mentionnant les différents types des séchoirs solaires et leur fonctionnement.

II.2 Séchage solaire

II.2.1 Définition du séchage solaire :

Le séchage est une opération ayant pour but l'évacuation de l'eau contenu dans le produit. Le mode de séchage le plus utilisé dans les pays en voie de développement et même dans les industries agro-alimentaires est le séchage par entraînement. Il s'agit d'un séchage à basse température car ces produits agro-alimentaires ont chacun une température maximale de séchage inférieure à 100°C, n'entraînant pas sa détérioration tout en gardant toutes les qualités gustatives. Le fluide caloporteur utilisé dans le séchage est l'air. En fonction de son pouvoir évaporatoire, il cède sa chaleur sensible au produit et reçoit ensuite l'humidité du produit. Ainsi donc, on assiste à un phénomène simultané de transfert de chaleur et de masse (phénomène de thermo diffusion).

Objectif : sécher un produit est abaissé sa teneur en eau jusqu' une valeur résiduelle inhibant le développement de tous les micro-organismes et permettant ainsi leur stockage dans les conditions ambiantes. [1]

II.2.2 Principe de séchage solaire :

Le séchage est caractérisé par un transfert de chaleur et 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.

[2]

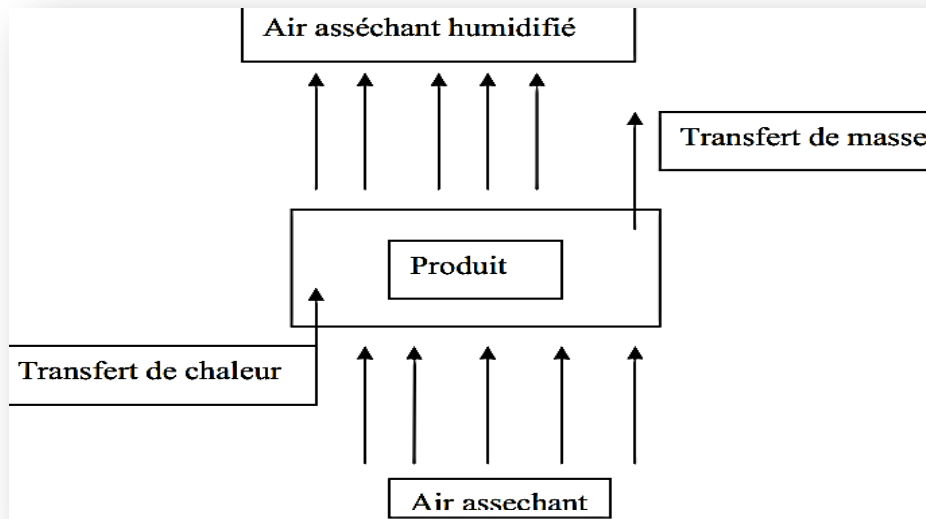


Figure II.1 : Mode de transfert lors du séchage.

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 aliment la surface du produit en chaleur d'après la loi de Newton :

$$\Phi_{cv} = h \cdot S \cdot (T_{a,a} - T_{s,p}) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

Φ_{cv} : Flux de chaleur par convection (W).

S : la surface d'échange (m²).

h : le coefficient d'échange par convection (W/m².k).

$T_{a,a}$ et $T_{s,p}$: Températures en Kelvin de l'air asséchant et la surface du produit respectivement.

➤ **Transfert par conduction :**

La surface du produit chauffé 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 :

$$\Phi_{cd} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T_p}{\partial x} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

λ : Conductivité thermique du produit (W/m .k).

II.2.3 Les différentes méthodes du séchage: [1]

II.2.3.1 Séchage mécanique :

C'est élimination liquide par des forces purement mécanique (pressage, centrifugation, compression, filtration...).

II.2.3.2 Séchage chimique :

C'est un procédé basé sur l'utilisation des produits déshydratants (acide sulfurique H₂SO₄, acide phosphorique H₃PO₄) pour extraire l'eau.

II.2.3.3 Séchage thermique :

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une « activation » de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par le transfert de chaleur.

Les deux transferts se déroulent en une phase interne et une phase externe :

- Transfert de chaleur externe, de la source de chaleur vers la surface de produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur de produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface de produit.
- Transfert de masse externe de la surface de produit vers le milieu extérieur.

Il existe plusieurs méthodes pour la déshydratation des produits agricoles. Toutefois le séchage par convection, appelé aussi par entraînement, demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée.

Le séchage convectif :

Si on place un corps humide dans une enceinte où règne un flux gazeux chaud et sec, des différences de température et de pression partielle d'eau seront constatées entre le corps et le gaz aboutissant ainsi aux phénomènes suivants :

- Un transfert de chaleur du gaz vers le corps humide sous l'effet de l'existence d'un gradient de température,
- Un transfert de matière (eau) s'effectuant du corps vers le gaz sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Dans la plupart des cas, le gaz utilisé est l'air dont les propriétés thermo-physiques lui permettent d'être à la fois un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée.

L'enceinte où est placée le corps humide à sécher et le flux de gaz est appelée séchoir.

II.2.4 Caractéristiques de l'air de séchage :

L'air sec peut être considéré comme un mélange de gaz dont la composition est couramment approchée à l'aide des trois concentrations volumiques suivantes [1] : O_2 : 0,210 ; N_2 : 0,781 ; A_r : 0,0093 (Respectivement l'oxygène, l'azote et l'argon).

Le mélange l'air sec et vapeur d'eau constituent l'air humide.

II.2.4.1 Humidité absolue (ou spécifique) :

L'humidité absolue H_a ($\frac{kg_v}{kg_{as}}$) est défini comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air humide par un kilogramme d'air sec, cette humidité est donné par la relation suivant : [3]

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (\text{II.3})$$

Où m_v et m_{as} sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume d'air humide.

II.2.4.2 Humidité relative : [4]

L'humidité relative H_r c'est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air P_v sur la pression de saturation P_s de cette vapeur d'eau à la même température T .

$$H_r = 100 \cdot \frac{P_v}{P_s} \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad (\text{II.4})$$

II.2.4.3 Températures caractéristiques de l'air humide :

a) Température sèche T_s :

La température du bulbe sec T ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre. [3]

b) Température humide T_h :

La température humide (ou température de bulbe humide) c'est la température indiquée par le thermomètre lorsqu'on couvre le bulbe du thermomètre avec une mèche humide (ex: tissu, coton.). La différence ($T_s - T_h$) représente l'humidité relative de l'air. [4]

c) Température de rosé (point de rosé) :

La Température de rosé T_r est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation [5]. Cette température T_r est tel que :

$$T_r = \frac{23748(\ln H_r * P_s - 6.41)}{23.69 - \ln H_r * P_s} \quad (\text{II.5})$$

II.2.5 Caractéristiques des solides humides :

II.2.5.1 Description du solide humide :

Le solide à un film d'eau adhère à sa surface externe par des forces superficielles.

Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température .

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses. Un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure suivante. [5] [6]

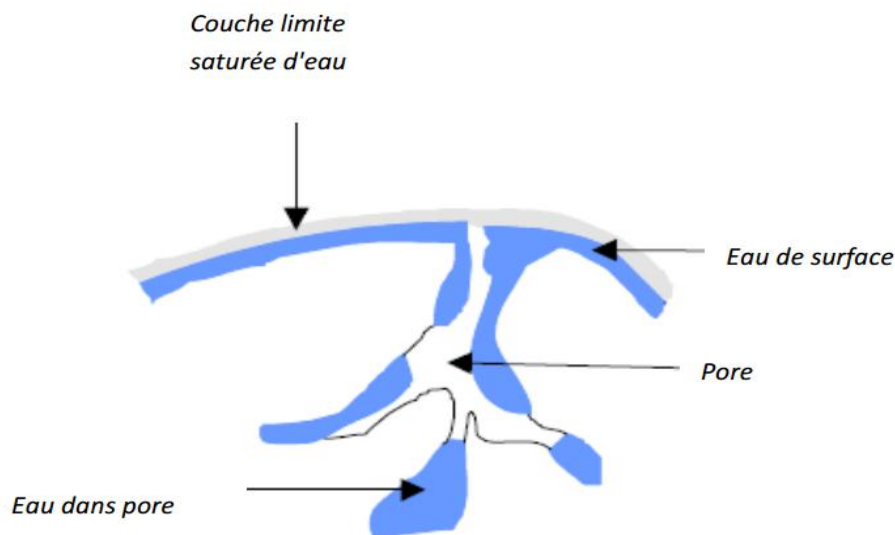


Figure II.2 : Description du solide humide. [3]

Soit une masse M_h de matériau humide contenant une masse M_e d'eau et une masse M_s de matière sèche :

$$M_h = M_e + M_s \quad (\text{II.6})$$

II.2.5.2 Humidité absolue :

Humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche ($\frac{kg_{av}}{kg_{as}}$), s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à masse sèche. [6]

$$x = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.7})$$

II.2.5.3 Teneur en eau à base humide :

L'humidité relative ou titre en eau (%), ou teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide. [6]

$$x_r = \frac{M_e}{M_h} = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{II.8})$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations : [1]

$$x = \frac{x_r}{1 - x_r} \quad (\text{II.9})$$

$$x_r = \frac{x}{1 + x} \quad (\text{II.10})$$

II.2.5.4 Taux d'humidité à l'équilibre :

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [7]

$$x_{eq} = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.11})$$

II.3 Les séchoirs solaires :

Le séchoir solaire est un dispositif qui permet le séchage des produits à conserver. Il y a plusieurs types de séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité.

II.3.1 Classification des séchoirs solaires :

Les systèmes de séchage à énergie solaire sont classés généralement, selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement. Ils peuvent être classés dans deux groupes principaux : [8]

a) **Les systèmes passifs:** L'énergie solaire est la seule source qui assure le fonctionnement.

b) **Les systèmes actifs (hybrides) :** Ils associent à l'énergie thermique solaire à une énergie d'appoint fuel gaz pour le chauffage ou bien l'électricité pour la circulation de l'air. Trois types secondaires distinctes des systèmes de séchage solaires passifs ou actifs, s'avoir :

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

II.3.1.1 Les séchoirs solaires directs : [7] [9]

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à construire, en utilise des matériaux disponibles localement. Ce type se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

✚ Principe de fonctionnement :

Dans le séchoir, les rayons solaire frappent directement dans l'armoire de séchage où il converti en chaleur par produit lui-même, l'air froid pénètre par des trous placés à la base de séchoir, (chauffé par effet de serre) l'air passe par le produit à sécher et sort par des trous situés dans la partie haut dans chaque côté, soit tirage naturelle par effet de cheminé ou par action de vent sue des ouvertures, mais rarement à l'aide ventilateur. à l'intérieur de la boite séchage il y a des étagères peints en noir pour augmenter la capacité d'absorption de la chaleur. Une cadre de verre sert de toit crée effet de serre.

✚ Les avantages et les inconvénients :

➤ Avantages : [10]

- Meilleure protection contre poussières, les insectes et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre.
- Grandes possibilités de conception.

➤ Inconvénients :

- Dégradation la qualité de produit par exposition direct au soleil, oxydation des vitamines A et C, par les rayons UV du soleil, décoloration.
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure.

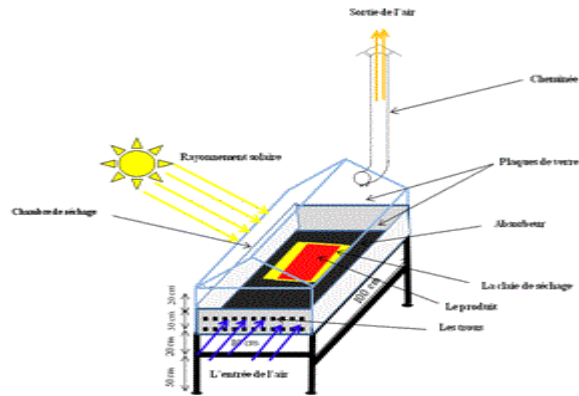


Figure II.3: Exemples des séchoirs solaires directs simples. [12] [11]

II.3.1.2 Les séchoirs solaires indirects :

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte.

✚ Principe de fonctionnement :

Le séchoir solaire indirect se compose de deux parties : collecteur (capteur solaire) qui convertit l'éclairement solaire en chaleur et une chambre de séchage qui contient le produit, et un chemin pour extraire l'air chaud vers l'extérieur (figure).

L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé et sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage.

✚ Les avantages et les inconvénients :

➤ Les avantages :

- Le produit est protégé contre la radiation du soleil direct.
- Possibilité de concevoir ce type de séchoir localement avec un coût réduit.
- Conserve mieux la couleur et la qualité du produit (notamment les vitamines A et C).
- Ce séchoir ne nécessite pas un apport énergétique (électricité).

➤ L'inconvénient :

- La durée de séchage n'est pas stable selon les conditions climatiques.

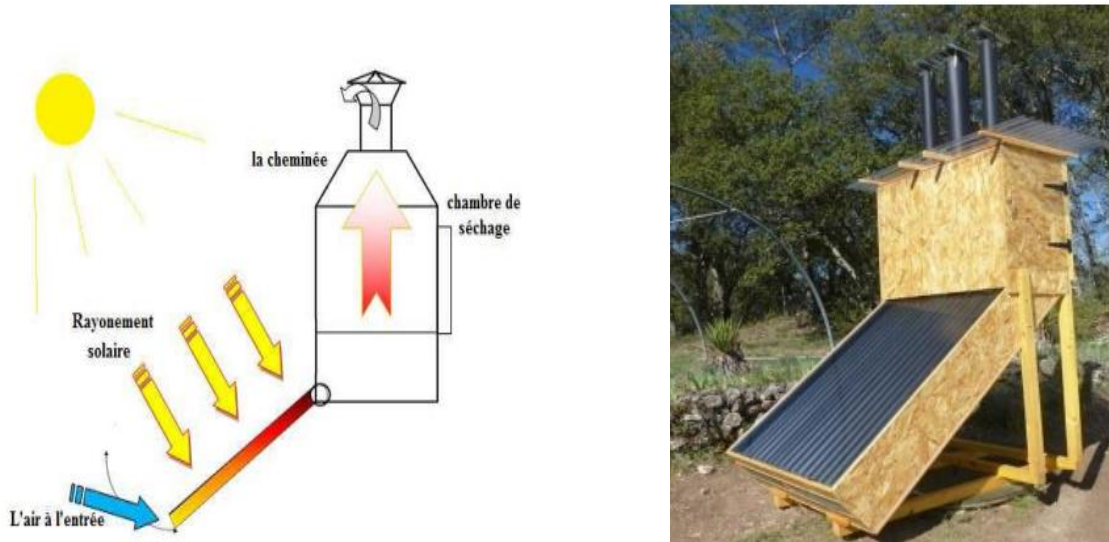


Figure II.4: Exemples séchoir solaire indirect [7] [11]

II.3.1.3 Les séchoirs mixtes : [8]

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

Un séchoir mixte à circulation naturel **figure II .4** aurait la même structure des séchoirs indirects (capteur solaire, chambre séchage et une cheminé) mais les parois sont recouvertes d'une plaque de verre.

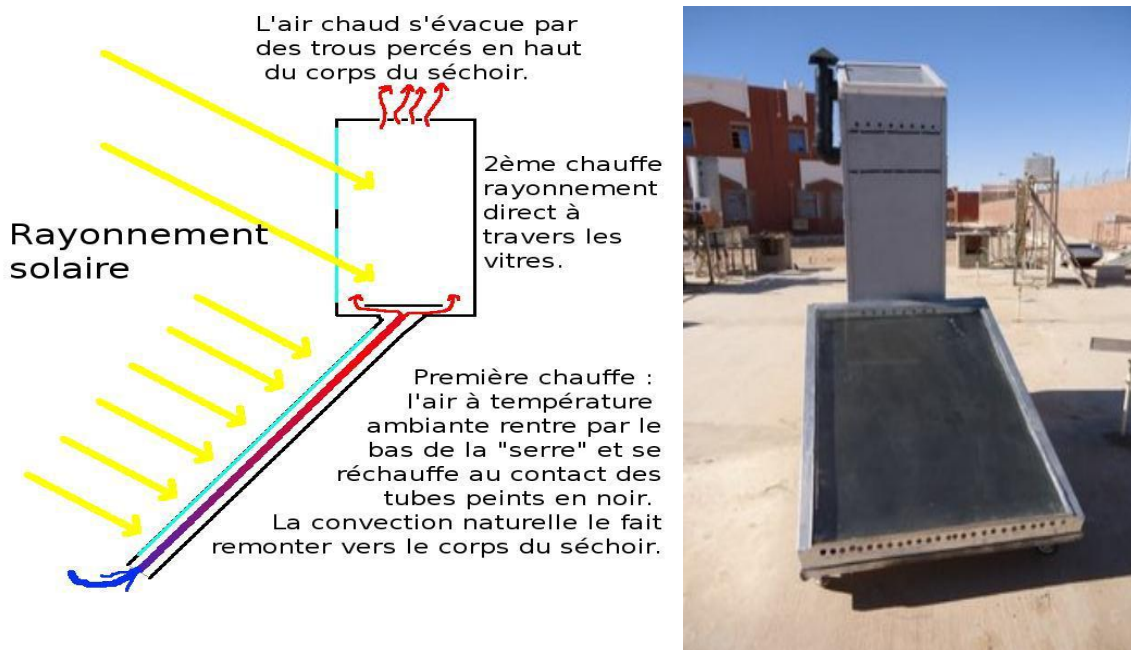


Figure II.5: Séchoir solaire mixte [5] [8].

II.3.1.4 Les séchoirs hybrides : [1]

Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, gaz, biomasse...etc.). L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

- ✓ maintenir une température constante à l'intérieur du séchoir quelle que soient les conditions climatiques. Dans ce cas, l'énergie solaire est secondaire, elle permet de préchauffer l'air.
- ✓ pour accélérer circulation de l'air par ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur.

✚ Les avantages et les inconvénients :

➤ Les avantages : [11]

- Indépendance par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.
- Fort augmentation la production par rapport aux autre types des séchoirs car dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

➤ Les Inconvénients :

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

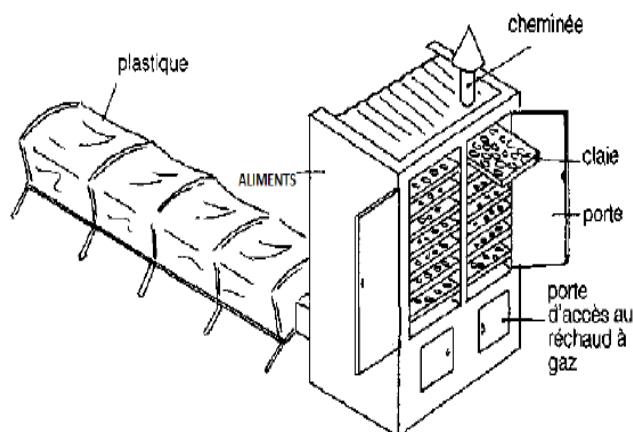


Figure II.6: Exemples des séchoirs solaires hybrides [8] [11]

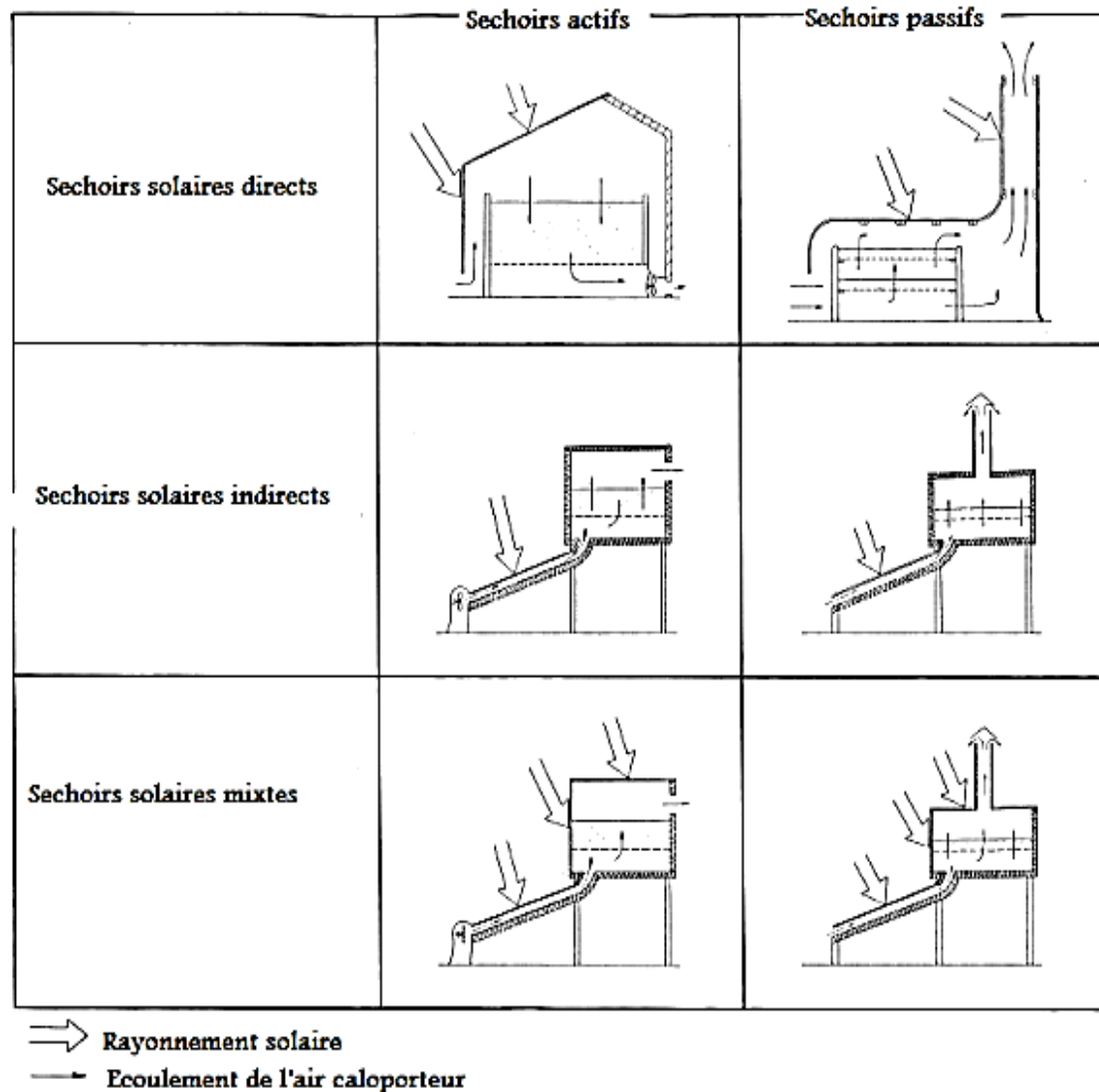


Figure II.7: Différents types séchoirs solaires. [4]

II.4 Conclusion :

A travers ce deuxième chapitre nous avons donné les différentes notions de base et la définition du séchage solaire ainsi qu'une partie est réservée aux différents types de séchoirs existants, aux avantages et aux inconvénients ainsi que leur classification suivant le principe de fonctionnement.

Puis, on a cité les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide ceci est dans le but de trouver leurs humidités relatives, la température et la variation de la cinétique de séchage pour le produit à sécher.

Références :

- [1] KHEMGANI, Med. ; KHEDIMOU, Chaib. Étude de différentes méthodes de séchage de la pomme de terre. Mémoire de master académique, université Kasdi Merbah-Ouargla, 2016.
- [2] BELACHI, Warda. Application de séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaire. Mémoire de Magister en physique énergétique, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2009.
- [3] [11] BOUGHALI, Slimane. Étude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques. Mémoire de doctorat en Génie mécanique, université Hadj Lakhdar-Batna ,2010.
- [4] BEN CHEIKCH, H.; et al. Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif. Mémoire de l'ingénieur d'état en Génie mécanique, Université Kasdi Merbah –Ouargla, 2011.
- [5] DEGLA, Adnane ; SIOUED, Rima. Séchage solaire des dattes Deglet-Nour: Simulation numérique. Mémoire de Master académique, Université Kasdi Merbah –Ouargla, 2015.
- [6] BENDAHMANE, Mohand Tahar; IKNI, Cherif. Réalisation et étude d'un séchoir solaire à capteur plan. Mémoire de master en électromécanique, Université A.MIRA-BEJAIA, 2017/2018.
- [7] DEBIANI, Kahina. Dimensionnement et réalisation d'une Serre solaire destinée pour le séchage des déchets alimentaires. Mémoire de Master en génie, Université Saad Dahlab–BLIDA, 2012/2013.
- [8] BETTAYBI AMMAR, étude expérimentale du séchage des produits agroalimentaires ; comparaison entre deux modes de séchage, Mémoire master, Université de Biskra 2017.
- [9] REGGADI, Aicha; BABAHAJ, Meriama. Contribution à l'amélioration de fonctionnement d'un capteur solaire : "Utilisation d'un MCP ". Mémoire de Master en physique énergétique et énergie renouvelable, Université Ahmed Draïa d'Adrar, 2017/2018.
- [10] MEDIANI, Ahmed. Amélioration des performances et optimisation d'un capteur solaire. Thèse de doctorat en physique des matériaux, Université Ahmed Draïa d'Adrar, 2019/2020.

[12] MENNOUCHE, D.; et al. Etude expérimentale du séchage solaire de la pâte de tomate dans un séchoir direct. 3^{ième} Séminaire Maghrébin sur les Sciences et Technologies de Séchage, SMSTS-3, 3-5 Novembre 2010 Marrakech, Maroc.



Chapitre III:

Modélisation et
simulation d'un capteur
solaire plan à air

III.1 Introduction:

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur la terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes des énergies. Dans notre étude nous allons intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermiques en utilisant le capteur solaire à air pour la production de l'air chaud.

Ce chapitre est envisagé à une étude théorique simple et à la modélisation des phénomènes d'échanges thermiques misent en jeu au sien du système étudié, nous avons établi un modèle pour prédire le comportement dynamique réel de notre capteur nous rapprochons son fonctionnement par l'application de la méthode nodale, puis on va déterminer les expressions des pertes et le rendement instantané. Le but est d'arriver à un ensemble d'équations mathématiques qui seront résolu par une méthode numérique.

III.2 Capteur solaire plan :

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transporté par les radiations solaires, la convertir en énergie thermique et transmettre à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) par convection à travers surface échange thermique.

On distingue deux catégories :

- ❖ capteur plan à eau.
- ❖ capteur plan à air.

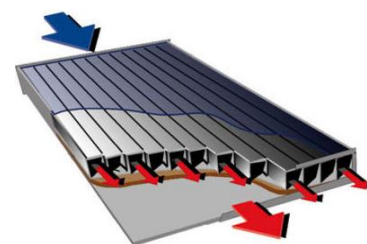
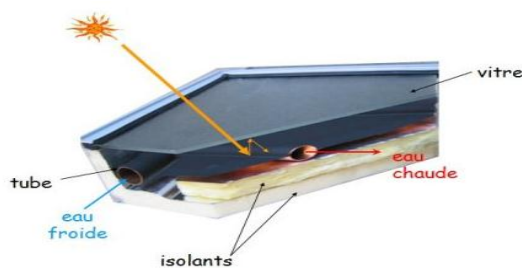


Figure III.1 : coupe capteur solaire à eau [1]

figure III.2 : capteur solaire à air [2]

Les capteurs plan peuvent assurer les températures variant de **30°C** à **150°C** et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni suivi du soleil. [3]

Nous intéressons dans notre mémoire au capteur plan à air.

III.2.1 Eléments constitutifs du capteur solaire plan à air : [4] [5] [6]

Le capteur solaire à air est constituée principalement d'une couverture transparente, un absorbeur, d'une conduit d'air (en générale formé par l'espace situé entre couverture _l'absorbeur), il permet collecté l'énergie cédée par l'absorbeur, d'une isolation thermique et d'un coffre (**figure III.3**).

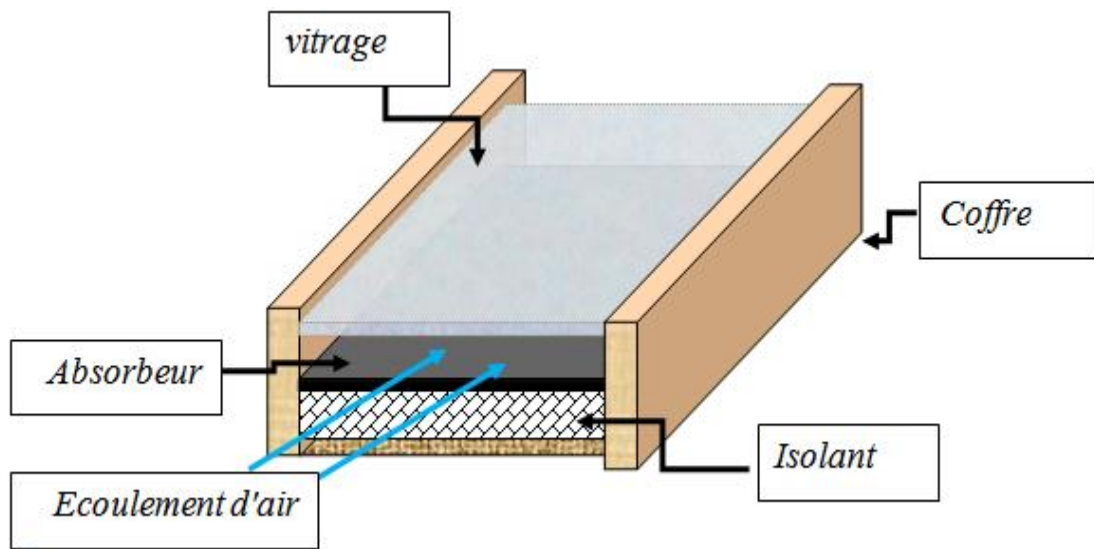


Figure III.3 : Schéma de principe capteur solaire plan à air.

III.2.1.1 Couverture transparente :

Le verre est considéré comme une couverture pour les installations solaires thermiques. Cette matière permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre.

III.2.1.2 Absorbeur :

Est l'élément essentiel dans le capteur, il absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur, et transmette celle-ci à un fluide caloporteur. L'absorbeur n'est qu'une tôle métallique (Aluminium, Acier, Cuivre), ces matériaux sont tous de bonnes conductibilités thermiques.

III.2.1.3 Fluide caloporteur :

Le fluide (air) est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide échange thermique appelé fluide de travail.

III.2.1.4 Isolant :

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement vers l'extérieur.

Les matériaux utilisés comme isolant sont le bois, les polystyrènes, la laine de verre...

III.2.1.5 Le coffre ou la cadre :

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, en ferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

III.2.2 Principe fonctionnement :

Le principe de capteur à air est basé sur la réalisation de l'effet de serre, il repose sur le fait que le verre transmet la quasi-totalité du rayonnement solaire dont les longueurs d'onde sont grandes.

Lorsque le flux solaire traverse la vitre et arrive la plaque absorbeur à l'absorbeur, celle-ci s'échauffe et émet son tour un rayonnement infrarouge qui ne peut pas traverser la vitre, il se piège à l'intérieur du capteur, c'est-à-dire : la conversion rayonnement-chaleur s'effectue en surface de l'absorbeur : les photons qui le frappent sont absorbé par la matière et augmentent l'agitation des molécules, et donc la température du matériau exposé au rayonnement va s'élever. Cette énergie accumulée par l'absorbeur est cédée aux fluide caloporteur (air) qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur. [7]

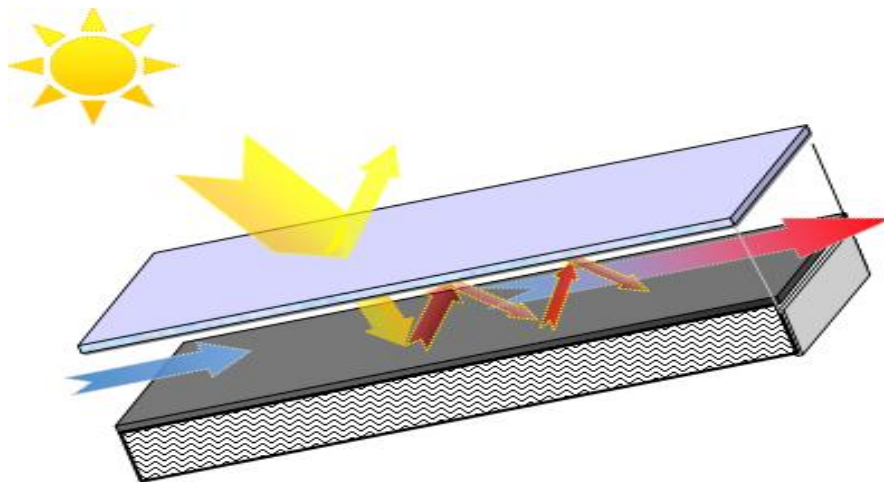


Figure III.4 :L'effet de serre dans un capteur solaire.

III.3 Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire à air :

L'objectif de la modélisation des coefficients d'échanges thermiques qui interviennent dans l'étude de capteurs solaires est l'élaboration des formules simples permettant l'évaluation de ces coefficients.

Les hypothèses sont perpétuellement nécessaires dans une théorie-scientifique, les hypothèses imposées dans notre modèle sont les suivantes:

- ✚ Le ciel est considéré comme un corps noir de température équivalente calculée,
- ✚ Les propriétés thermo-physiques des matériaux sont supposées constantes,
- ✚ La couverture en verre transparent est opaque au rayonnement infrarouge,
- ✚ L'air entre la vitre et l'absorbeur est supposé transparent,
- ✚ La distribution de température est uniforme en raison de l'utilisation de la méthode nodale. [8] [9]
- ✚ Le transfert de chaleur est supposé unidirectionnel dans la direction perpendiculaire au capteur à air.

Pour notre étude, les échanges thermique au niveau du capteur plan qui s'effectuent selon trois modes connus d'échange de chaleur : **conduction, convectifs, et rayonnement**, sont schématisés dans la figure ci-dessous :

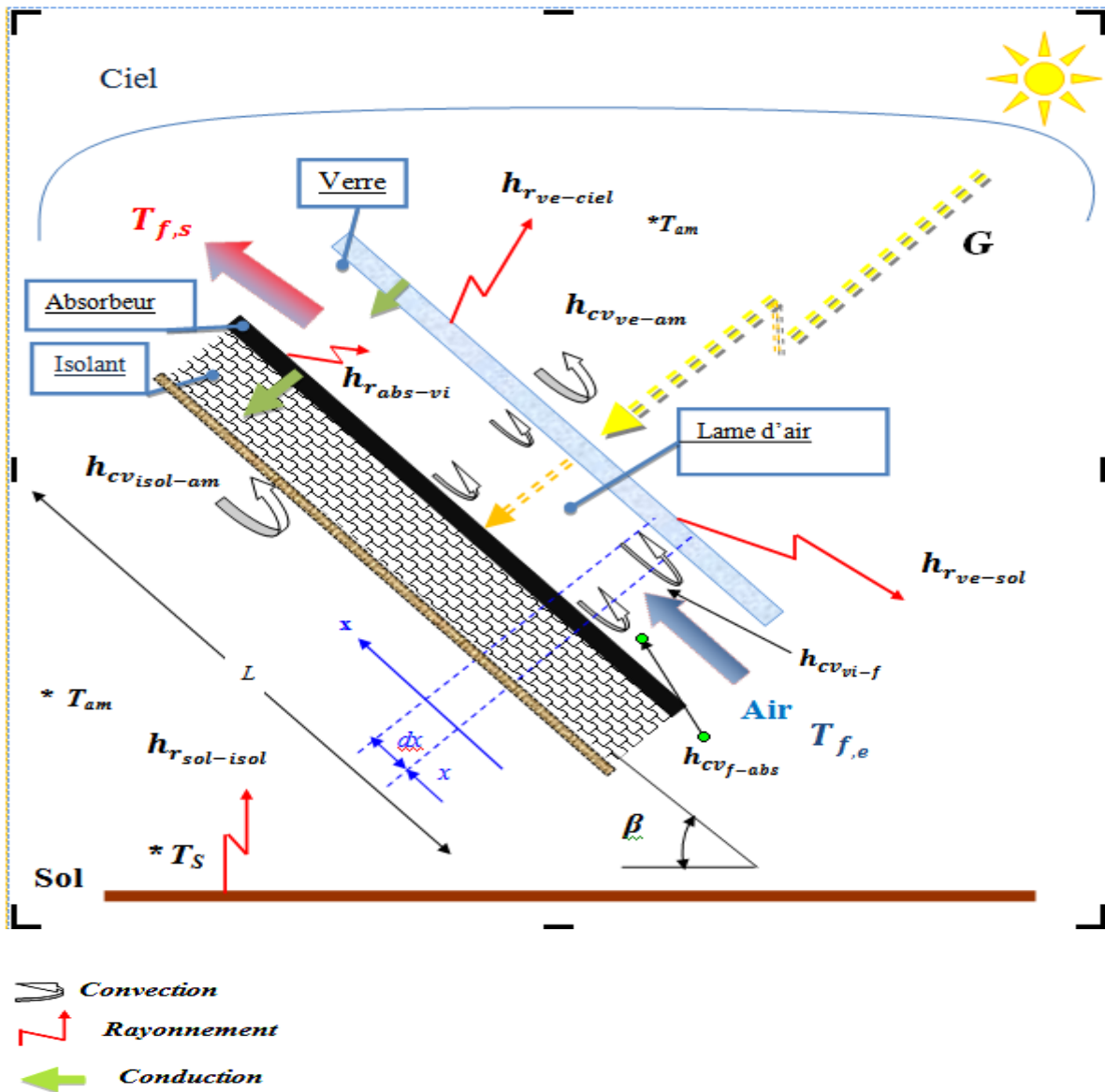


Figure III.5 : Échanges et transferts thermiques entre les éléments d'un capteur plan à air

III.3.1 Transfert thermique par convection :

L'échange de chaleur par convection peut s'effectuer :

- ✓ à l'extérieur de capteur, entre le capteur et el milieu ambiant qui entoure (échanges dus au vent)
- ✓ à l'intérieur du capteur, entre l'absorbeur et l'air confiné dans l'espace vitre-absorbeur (ou entre cet air et la vitre).

III.3.1.1 Échange thermique par convection dû au vent :

L'échange thermique par convection dû au vent intervient dans le transfert à l'avant et à l'arrière du capteur.

- **Le coefficient entre vitre et l'air ambiant dû au vent**, calcule par la relation de **HOTTEL** et **WEORTZ** : [10]

$$h_{cv_{ve-am}} = 5,67 + 3,86 \cdot v_v \quad (\text{III. 1})$$

Avec:

v_v : vitesse du vent (m/s)

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

$$h_{cv_{ve-am}} = 1,27 \cdot [(T_{ve} - T_{am}) \cdot \cos\beta]^{1/3} + 2,658 \cdot V_v \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

T_{ve} : Température de la face extérieure de la vitre (k).

T_{am} : Température ambiante exprime en Kelvin.

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

- **Coefficient de transfert convectif entre isolant et l'air ambiant :**

$$h_{cv_{ve-am}} = h_{cv_{isol-am}} = 5,67 + 3,86 \times V_{vent} \quad (\text{III. 3})$$

III.3.1.2 Échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur:

Le coefficient de convection libre entre la vitre et l'absorbeur est donné en fonction des nombres adimensionnels suivants :

- ✓ **Nombre NULSET (N_u):**

$$Nu = \frac{h_{cv} \cdot L}{\lambda_f} \quad (\text{III. 4})$$

Avec:

h_{cv} : Coefficient de transfert thermique par convection entre l'air et la plaque (vitre ou absorbeur) (w/m².k).

L : Espace entre deux plaques (m).

λ_f : Conductivité thermique de fluide caloporteur.

- ✓ **Nombre de Grashoff (Gr) :**

$$Gr_v = \frac{g \cdot \gamma \cdot \rho^2 \Delta T_{v-f} \cdot l^3}{\mu^2} \quad (\text{III. 5})$$

$$G_{r_{abs}} = \frac{g \cdot \gamma \cdot \rho^2 \Delta T_{f-abs} \cdot l^3}{\mu^2} \quad (\text{III. 6})$$

Avec:

ΔT : Écart de température entre l'air et la plaque (vitre ou absorbeur) [K°].

γ : coefficient d'expansion volumique du fluide.

g : accélération de la pesanteur (m²/s).

✓ **Nombre de Prandtl (Pr):**

$$P_r = \frac{C_p \mu_f}{\lambda_f} \quad (\text{III. 7})$$

✓ **Nombre de Rayleigh (Ra) :**

$$R_{a_v} = G_{r_v} \cdot P_r \quad (\text{III. 8})$$

$$R_{a_{abs}} = G_{r_{abs}} \cdot P_r \quad (\text{III. 9})$$

Pour deux plaques parallèles et inclinées d'un angle β par rapport à l'horizontale, $0 < \beta < 75^\circ$, le nombre NULSSET est donné par la formule de **HOLLANDS and AL(1976)** : [12]

$$Nu_v = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708 \times (1,8 \times \sin(\beta))^{1,6}}{R_{a_v} \times \cos(\beta)}\right) \left(1 - \frac{1708}{R_{a_v} \times \cos(\beta)}\right) + \left[\left(\frac{R_{a_v} \times \cos(\beta)}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right] \quad (\text{III. 10})$$

$$Nu_{abs} = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708 \times (1,8 \times \sin(\beta))^{1,6}}{R_{a_{abs}} \times \cos(\beta)}\right) \left(1 - \frac{1708}{R_{a_{abs}} \times \cos(\beta)}\right) + \left[\left(\frac{R_{a_{abs}} \times \cos(\beta)}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right] \quad (\text{III. 11})$$

Avec:

β : angle d'inclinaison du capteur.

- Coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur (ou la vitre) et le fluide caloporteur:

$$h_{cv_{v-f}} = \frac{\lambda_f \cdot Nu_v}{L} \quad (\text{III. 12})$$

$$h_{cv_{f-abs}} = \frac{\lambda_f \cdot Nu_{abs}}{L} \quad (\text{III. 13})$$

III.3.2 Transfert thermique par rayonnement:

L'échange thermique par rayonnement existe entre:

- ✓ La face extérieure de la vitre du capteur et le ciel.
- ✓ La face intérieure de la vitre et l'absorbeur.

✓ La face extérieure de l'isolant et l'albédo (sol).

III.3.2.1 Échange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste:

La vitre du capteur solaire échange de l'énergie par rayonnement thermique avec le ciel. Le coefficient d'échange radiatif est donné par : [6]

$$h_{r_{ve-ciel}} = \varepsilon_v \sigma (T_{ve} + T_{ciel}) (T_{ve}^2 + T_{ciel}^2) \quad (\text{III. 14})$$

Pour un capteur solaire incliné avec un angle β , on utilise la relation suivante : [13]

$$h_{r_{ve-ciel}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \cdot \varepsilon_v \cdot \sigma (T_{ve} + T_{ciel}) (T_{ve}^2 + T_{ciel}^2) \quad (\text{III. 15})$$

Avec :

ε_v : Émissivité de la vitre.

T_{ciel} : Température équivalence du ciel est donnée par relation de SWINBANK :

$$T_{ciel} = 0,0552 \cdot T_{am}^{\frac{3}{4}} \quad (\text{III. 16})$$

T_{am} : température de l'ambiance.

III.3.2.2 Echange thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur:

Pour l'échange radiatif entre la face intérieur du verre et la face extérieur de la couche de l'absorbeur, le coefficient d'échange est déterminé par la relation suivante: [14]

$$h_{r_{vi-abs}} = \sigma \frac{(T_{vi} + T_{abs})(T_{vi}^2 + T_{abs}^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{abs}} - 1\right)} \quad (\text{III. 17})$$

Avec :

T_{vi} : Température de la face intérieure de la vitre.

T_{abs} : température de l'absorbeur en [k] .

ε_{abs} : Émissivité de l'absorbeur en [k].

III.3.2.3 Echange thermique par rayonnement entre vitre et le sol :

Le Coefficient d'échange radiatif mis en jeu dans le cadre de cet échange est donné par la relation: [13]

$$h_{r_{ve-sol}} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (T_{ve} + T_{sol}) (T_{ve}^2 + T_{sol}^2) \quad (\text{III. 18})$$

Avec:

T_{sol} : Température de sol est donnée par relation:

$$T_{sol} = T_{am} + 2 \quad (\text{III. 19})$$

III.3.2.4 Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol :

Le coefficient de transfert radiatif entre La face arrière de capteur et le sol : [13]

$$h_{r_{is-sol}} = \frac{1}{2} (1 + \cos(\pi - \beta)) \cdot \varepsilon_{is} \cdot \sigma (T_{isol} + T_{sol}) (T_{isol}^2 + T_{sol}^2) \quad (\text{III. 20})$$

Avec :

ε_{is} : Emissivité de la plaque arrière isolante du capteur. T_{isol} Température de la plaque arrière isolante [K].

III.3.3 Transfert thermique par conduction :

Cet échange effectue à travers les corps solides à cause d'un gradient de température, il existe au niveau de plusieurs couche du capteur : verre, absorbeur et l'isolant.

Le coefficient d'échange de ce mode de transfert s'exprime par relation suivantes :

$$h_{cd_i} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (\text{III. 21})$$

Avec:

λ_i : Conductivité thermique du milieu (w/m.°c).

e_i :Épaisseur du milieu(m).

Le schéma électrique équivalent des différents transferts thermiques est représenté sur la figure III.6.

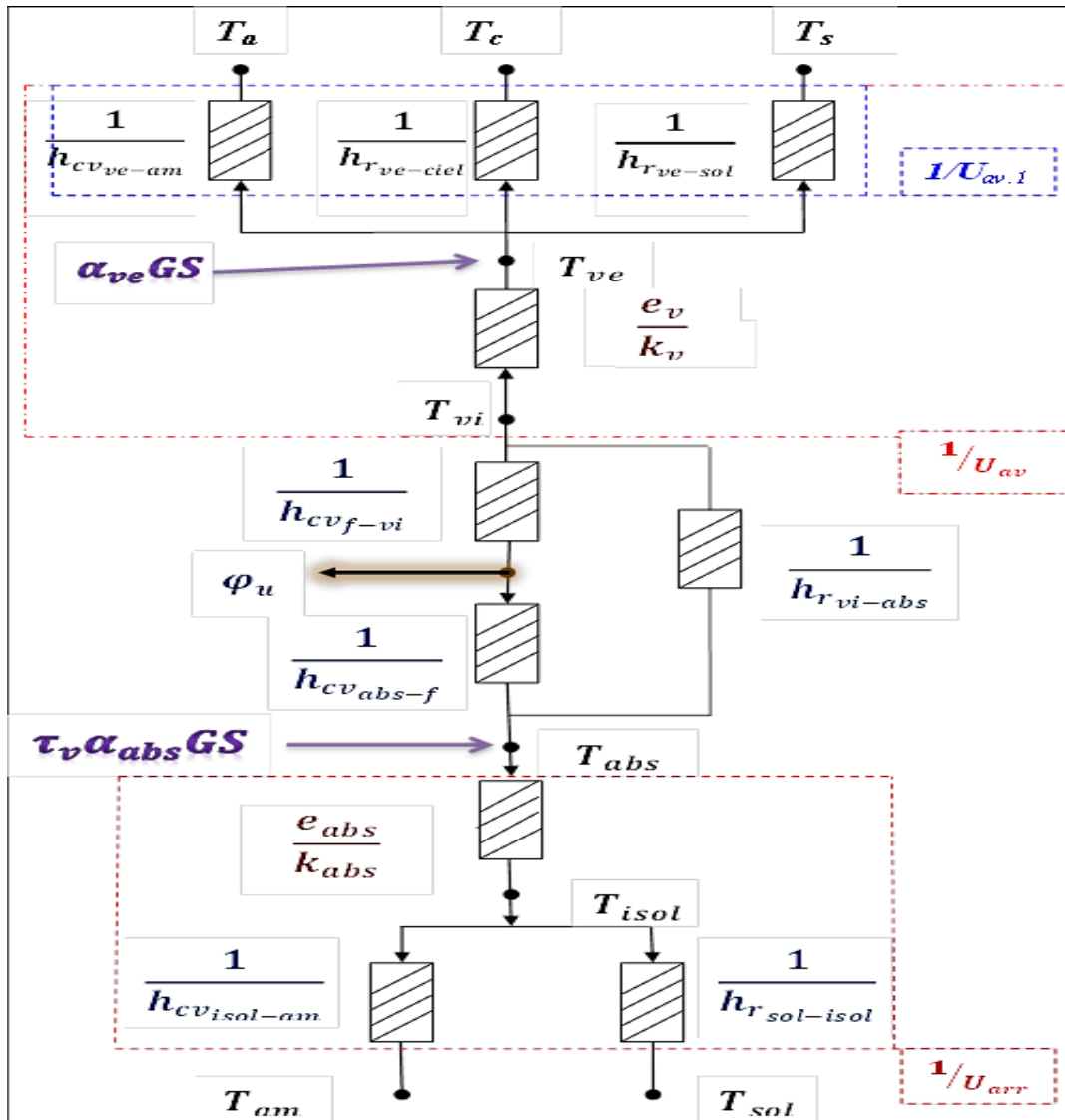


Figure III.6: schéma équivalence électrique-thermique du capteur solaire à air.

III.4 Bilan thermique global de capteur plan a air en régime transitoire :

Le but de la modélisation est de prévoir les températures de chaque couche du capteur (vitre, absorbeur, le fluide caloporteur, isolant.). Pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie qui s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{la variation de l'énergie} \\ \text{interne} \\ \text{(terme accumulation)} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{l'énergie reçue} \\ \text{par élément (entrant)} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{l'énergie perdu} \\ \text{par élément (sortant)} \end{array} \right\}$$

Ou encore sous forme mathématique, en considérant une section quelconque du système à l'instant t. le bilan au nœud « i » s'écrit :

$$M_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_e \varphi_i - \sum_s \varphi_i \quad (\text{III. 22})$$

Où M_i et C_i Sont respectivement la masse et la chaleur spécifique du composant indice "i".

$M_i C_i \frac{dT_i}{dt}$ est la puissance thermique stockée par le composant indice i.

$\sum_e \varphi_i$ est la somme des puissances absorbé parle composant d'indice i par trois modes d'échange thermique (conduction; convection et rayonnement).

$\sum_s \varphi_i$ est la somme des énergies perdues par le composant d'indice i par les trois modes d'échange thermique.

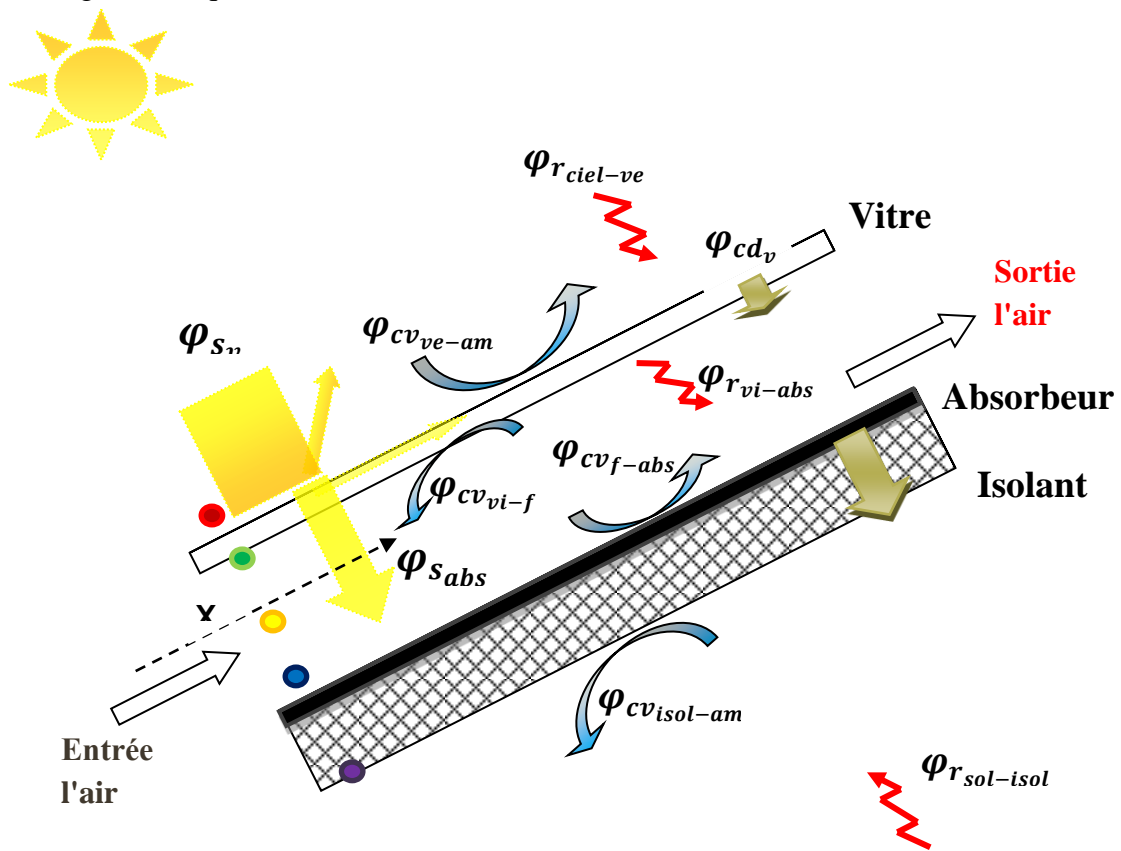


Figure III.7 : Echanges thermiques dans un capteur solaire plan à air

- : Nœud représentant la température du vitrage coté extérieure.
- : Nœud représentant la température du vitrage coté intérieure.
- : Nœud représentant la température du fluide (air).
- : Nœud représentant la température de la couche l'absorbeur.
- : Nœud représentant la température de la couche isolant.

III.4.1 Expressions analytiques de bilan énergétique :

Le bilan énergétique général est donné par les équations suivantes:

➤ **Au niveau du vitrage (coté extérieur) :**

$$M_v C_{Pv} \frac{dT_{ve}}{dt} = \varphi_{s_v} - \varphi_{r_{ve-ciel}} - \varphi_{cv_{ve-am}} - \varphi_{r_{ve-sol}} - \varphi_{cd_{ve-vi}} \quad (\text{III. 23})$$

Flux solaire absorbé par la vitre:

$$\varphi_{s_v} = \alpha_{ve} \cdot G \cdot S \quad (\text{III. 24})$$

Avec:

α_v : Coefficient d'absorption de vitre.

G : éclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur (w/m²).

S : surface de la captation (m).

Finalement cette équation devient:

$$M_v C_{Pv} \frac{dT_{ve}}{dt} = S[\alpha_v G - h_{r_{ve-ciel}}(T_{ve} - T_{ciel}) - h_{cv_{ve-am}}(T_{ve} - T_{am}) - h_{r_{ve-sol}}(T_{ve} - T_{sol}) - \frac{K_v}{e_v}(T_{ve} - T_{vi})] \quad (\text{III. 25})$$

➤ **Au niveau du vitrage (coté intérieur):**

$$M_v C_{Pv} \frac{dT_{vi}}{dt} = \varphi_{cd_{ve-vi}} - \varphi_{r_{vi-abs}} - \varphi_{cv_{vi-f}} \quad (\text{III. 26})$$

Donc cette équation devient:

$$M_v C_{Pv} \frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{K_v S}{e_v}(T_{ve} - T_{vi}) - h_{r_{vi-abs}} S(T_{vi} - T_{abs}) - h_{cv_{vi-f}} S(T_{vi} - T_{vf}) \quad (\text{III. 27})$$

➤ **Pour le fluide caloporteur (air) : [15]**

$$\dot{m}_f C_{Pf} \frac{dT}{dx} = \varphi_{cv_{vi-f}} - \varphi_{cv_{f-abs}} \quad (\text{III. 28})$$

Avec:

\dot{m}_f : Débit massique de l'air (kg/s)

donc :

$$\dot{m}_f C_{Pf} \frac{dT}{dx} = h_{cv_{vi-f}} S(T_{vi} - T_f) - h_{cv_{f-abs}} S(T_f - T_{abs}) \quad (\text{III. 29})$$

➤ **Au niveau de l'absorbeur (couche sélective) :**

$$M_{abs} C_{p_{abs}} \frac{dT_{abs}}{dt} = \varphi_{s_{abs}} + \varphi_{r_{vi-abs}} - \varphi_{cv_{f-abs}} - \varphi_{cd_{abs}} \quad (\text{III. 30})$$

Flux solaire absorbé par absorbeur s'écrit :

$$\varphi_{s_{abs}} = \tau_v \cdot \alpha_{abs} \cdot G \cdot S \quad (\text{III. 31})$$

Avec :

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre par rapport au rayonnement solaire.

α_{abs} : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.

S : Surface de la paroi absorbante (m²)

Cette équation devient :

$$M_{abs} C_{p_{abs}} \frac{dT_{abs}}{dt} = \tau_v \alpha_{abs} G S + h_{r_{vi-abs}} S (T_{vi} - T_{abs}) - h_{cv_{f-abs}} S (T_f - T_{abs}) - \frac{K_{abs} S}{e_{abs}} (T_{abs} - T_{isol}) \quad (\text{III. 32})$$

➤ **Au niveau de l'isolant :**

$$M_{isol} C_{p_{isol}} \frac{dT_{isol}}{dt} = \varphi_{r_{sol-isol}} - \varphi_{cv_{isol-am}} + \varphi_{cd_{abs}} \quad (\text{III. 33})$$

Donc :

$$M_{isol} C_{p_{isol}} \frac{dT_{isol}}{dt} = h_{r_{sol-isol}} S (T_{isol} - T_{sol}) - h_{cv_{isol-am}} S (T_{isol} - T_{am}) + \frac{K_{abs} S}{e_{abs}} (T_{abs} - T_{isol}) \quad (\text{III. 34})$$

III.4.2 Système d'équation global :

D'après les équations (III.25), (III.27), (III.29), (III.32), (III.34), les équations sont regroupées comme suit (système(S)) :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_v C_{p_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = S \cdot [\alpha_v \cdot G - h_{r_{ve-ciel}} (T_{ve} - T_{ciel}) - h_{cv_{ve-am}} (T_{ve} - T_{am}) - h_{r_{ve-sol}} (T_{ve} - T_{sol}) - \frac{K_v}{e_v} (T_{ve} - T_{vi})] \\ M_v C_{p_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = S \cdot [\frac{K_v}{e_v} (T_{ve} - T_{vi}) - h_{r_{vi-abs}} (T_{vi} - T_{abs}) - h_{cv_{vi-f}} (T_{vi} - T_{vf})] \\ \dot{m}_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dx} = S \cdot [h_{cv_{vi-f}} (T_{vi} - T_f) - h_{cv_{f-abs}} (T_f - T_{abs})] \\ M_{abs} C_{p_{abs}} \frac{dT_{abs}}{dt} = S \cdot [\tau_v \cdot \alpha_{abs} \cdot G + h_{r_{vi-abs}} (T_{vi} - T_{abs}) - h_{cv_{f-abs}} (T_f - T_{abs}) - \frac{K_{abs}}{e_{abs}} (T_{abs} - T_{isol})] \\ M_{isol} C_{p_{isol}} \frac{dT_{isol}}{dt} = S \cdot [h_{r_{sol-isol}} (T_{isol} - T_{sol}) - h_{cv_{isol-am}} (T_{isol} - T_{am}) + \frac{K_{abs}}{e_{abs}} (T_{abs} - T_{isol})] \end{array} \right.$$

III.5 Pertes globales d'énergies : [16]

Les pertes thermiques sont dues à la différence de la température entre l'absorbeur et le milieu ambiant. Elle se manifestant selon trois modes de transfert de chaleur .elle se divisent en trois catégories : les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales.

On pose les hypothèses suivantes afin de simplifier la détermination des coefficients des pertes :

- la puissance solaire absorbée par la vitre négligeable.
- les pertes latérales sont faibles devant les pertes avant et arrière

III.5.1 Expression de coefficients de perte thermique vers l'avant du capteur:

$$U_{av} = \left(\frac{1}{h_{r_{ve-ciel}} + h_{r_{ve-sol}} + h_{cv_{ve-am}}} + \frac{e_v}{K_v} \right)^{-1} \quad (\text{III. 35})$$

III.5.2 Expression de coefficients de perte thermique vers l'arrière du capteur :

Ce coefficient peu important celui d'avant, vu que le capteur bien isolé à l'arrière. L'expression évaluant ce coefficient est donné par :

$$U_{ar} = \left(\frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + \frac{e_{bois}}{\lambda_{bois}} \right)^{-1} \quad (\text{III. 36})$$

III.5.3 Coefficient de Perte thermique latérale :

$$U_{lat} = \frac{\lambda_{bois} A_{lat}}{e_{bois} A_c} \quad (\text{III. 37})$$

Avec:

A_{lat} : Aire latérale du capteur

A_c : Aire du capteur.

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des trois coefficients précédents déterminés :

$$U_L = U_{av} + U_{ar} + U_{al} \quad (\text{III. 38})$$

III.6 Rendement instantané:

Le rendement instantané [17] [14] du capteur que l'on définit par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par } m^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan de capteur}} = \frac{Q_u}{A_c G} \quad (\text{III. 39})$$

Q_u : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur (W), elle est donné par :

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (\text{III. 40})$$

Puissance utile = puissance captée – pertes

$$Q_u = A_c (\alpha \tau)_{eff} G - U_L A_c (T_{abs} - T_{am}) \quad (\text{III. 41})$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{A_{abs} [(\alpha \tau)_{eff} G - U_L (T_{abs} - T_{am})]}{A_c G} \quad (\text{III. 42})$$

α et τ : sont respectivement coefficient d'absorption de l'absorbeur et transparence de vitrage.

III.7 Modélisation numérique :

Un système thermique se traduit par des températures, des gradients températures, des coefficients des échanges thermiques etc. Les équations utilisées pour décrire de tels comportements dynamiques incluent quantités inconnues représentant les fonctions recherchées et leurs dérivées appelées équation différentielle, il existe nombreuses méthodes d'approximation numérique des solutions de ces équations :

1. La méthode des différences finies.
2. La méthode des éléments finis
3. La méthode des volumes finis

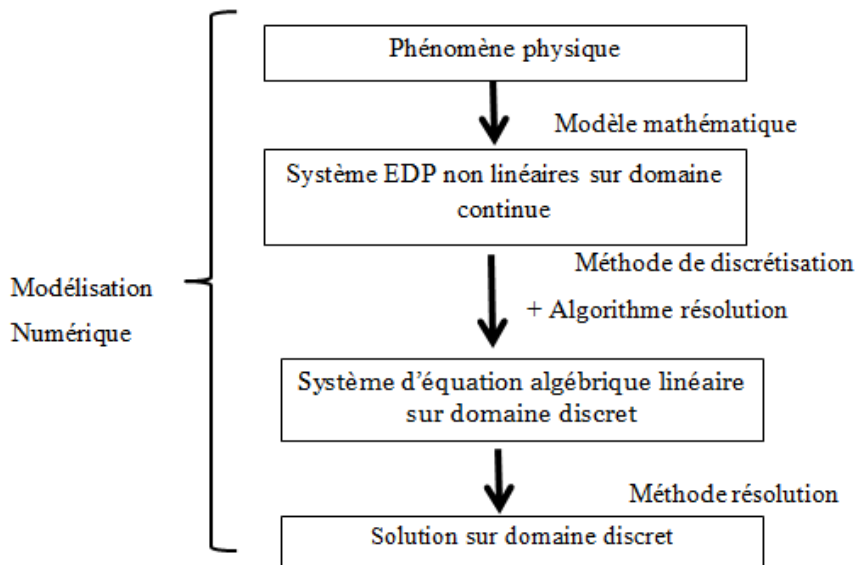


Figure III.8 : le principe du calcul numérique.

Dans cette étude, nous avons utilisé la **méthode des différences finies**.

III.7.1 Principe MDF :

La méthode consiste à approximer les dérivées des équations de la physique au moyen des développements de Taylor et se déduit directement de la définition de la dérivée, cette méthode basé sur l'hypothèse que lorsque domaine spatial est divisé en nombre fini des tranches Δx , et le domaine temporel en nombre finis des pas de temps. [18]

✚ Avantage :

- Grand simplicité d'écriture.
- Faible cout de calcul.

✚ Inconvénients :

- Limitation de la géométrie de domaines de calcul, difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées.

Nous donnons quelques formules d'approximation de la première dérivée :

Dérivée partielle	Discrétisation	Type de dérivée
$\frac{\partial U(x_i, t^k)}{\partial x}$	$\frac{U_{i+1}^k - U_i^k}{\Delta x}$	avant
$\frac{\partial U(x_i, t^k)}{\partial x}$	$\frac{U_i^k - U_{i-1}^k}{\Delta x}$	arrière
$\frac{\partial U(x_i, t^k)}{\partial x}$	$\frac{U_{i+1}^k - U_{i-1}^k}{2\Delta x}$	centré

Tableau III.1: schémas numériques des dérivées partielles.

Pour résoudre les systèmes d'équation (S) de ce modèle, nous avons choisi la méthode de résolution numérique aux différences finies de schéma explicite, on obtient :

$$T_{ve(i+1)} = \frac{\Delta t. S}{M_v C_{pv}} [\alpha_{ve} G + h_{r_{ve-ciel}} (T_{ciel} - T_{ve(i)}) + h_{cv_{ve-am}} (T_{am} - T_{ve(i)}) + h_{r_{ve-sol}} (T_{sol} - T_{ve(i)}) - \frac{K_v}{e_v} (T_{ve(i)} - T_{vi(i)})] + T_{ve(i)}$$

$$T_{vi(i+1)} = \frac{\Delta t. S}{M_v C_{pv}} [h_{r_{vi-abs}} (T_{abs(i)} - T_{vi(i)}) + h_{cv_{vi-f}} (T_{f(j)} - T_{vi(i)}) + \frac{K_v}{e_v} (T_{ve(i)} - T_{vi(i)})] + T_{vi(i)}$$

$$T_{f(j+1)} = \frac{\Delta x. S}{\dot{m}_f C_{pf}} [h_{cv_{vi-f}} (T_{f(j)} - T_{vi(i)}) - h_{cv_{f-abs}} (T_{abs(i)} - T_{vi(i)})] + T_{f(j)}$$

$$T_{abs(i+1)} = \frac{\Delta t. S}{M_{abs} C_{pabs}} [\tau_v \alpha_{abs} G + h_{r_{vi-abs}} (T_{vi(i)} - T_{abs(i)}) - h_{cv_{f-abs}} (T_{f(i)} - T_{abs(i)}) - \frac{K_{abs}}{e} (T_{abs(i)} - T_{isol(i)})] + T_{abs(i)}$$

$$T_{isol(i+1)} = \frac{\Delta t. S}{M_{isol} C_{pisol}} [h_{r_{sol-isol}} (T_{isol(i)} - T_{sol}) - h_{cv_{isol-am}} (T_{isol(i)} - T_{am}) - \frac{K_{abs}}{e} (T_{isol(i)} - T_{abs(i)})] + T_{isol(i)}$$

Pour la simulation, nous avons fait une programmation dans l'environnement MATLAB.

III.8 L'algorithme général :

L'algorithme de calcul des performances du capteur solaire à air se compose des étapes suivantes:

Etape 1 : introduit des données qui ne dépendent pas des températures « inconnues », il s'agit notamment :

- Des dimensions du capteur plan à air (longueur, largeur, épaisseur, inclinaison, ... etc.).
- Les propriétés physiques des éléments du capteur qui échange de chaleur par rayonnement (les émissivités, les absorptivités, les transmittivités)
- Les conductivités thermiques de chaque élément du capteur.
- Les données météorologiques telles que : Le rayonnement global E , la température ambiante T_{am} , la vitesse de vent V_v .

Etape 2 : initialisation des températures moyennes, il s'agit notamment :

- La température moyenne du fluide.
- La température de la vitre.
- La température de l'absorbeur.
- La température de l'isolant.

Etape 3 : toutes les données qui dépendent de la température sont évaluées par le programme suivant les équations de bilan thermique. Une boucle itérative nécessaire aux calculs des différentes températures est lancée. Le travail consiste notamment:

- Au calcul des propriétés de fluide caloporteur (air) **voir annexe**
- Au calcul des coefficients de transfert tels que :
 - Les coefficients de transfert radiatifs
 - Les coefficients de transfert conductif
 - Les coefficients de transfert convectif
- Calcule les coefficients de pertes thermiques :
 - Pert à l'avant, voir équation(III.30)
 - Pert à l'arrière, voir équation(III.31)
 - Pert totale

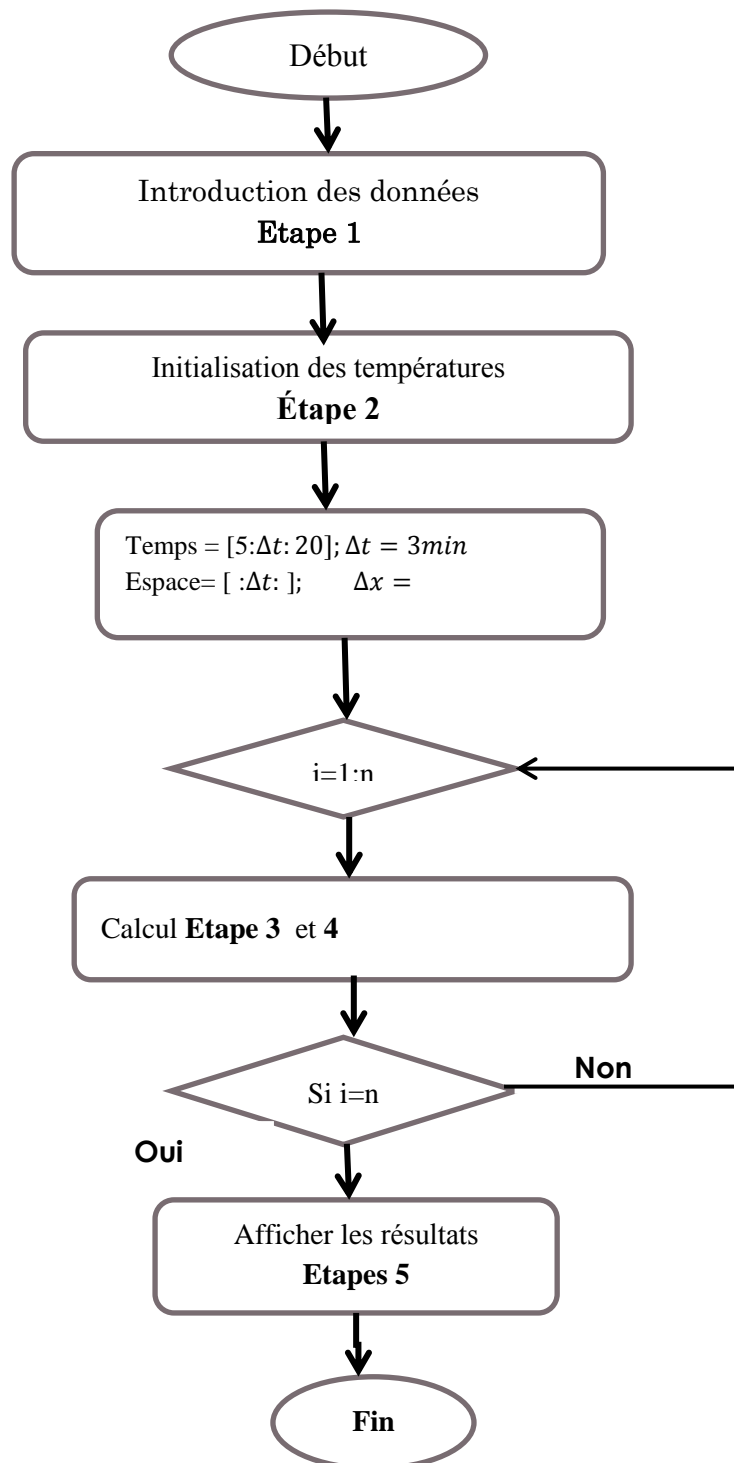
Etape 4 : calcule la puissance calorifique ϕ_u extraite par le fluide, voir équation (III.36).

Calcule le rendement suivant l'équation (III.37)

Des températures : $T_f, T_v, T_{abs}, T_{is}$ sont obtenues par la résolution du bilan énergétique.

Etape 5 : les résultats attendus sont affichées sous forme des courbes, les grandeurs visualisées sont notamment :

- Les températures
- Le rendement thermique



III.9 Conclusion:

Dans ce chapitre, notre intérêt a porté sur une modélisation des phénomènes d'échanges thermique misent en jeu dans les différents constituants du capteur afin d'établir les équations mathématiques différentielles gouvernants le comportement thermique de ce dispositif en régime transitoire. Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode de différence finie pour approximer ces équations et développer un algorithme qui permet de faciliter la déclaration des informations dans le langage de programmation (MATLAB).

Référence:

- [1] <https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-1-2-1-capteurs-solaires-thermiques.html>. (consulté le 19/06/2020 à 20:15 pm)
- [2]<http://www.zoneindustrie.com/Actualite/Capteur-solaire-Reznorsolar-transformez-le-rayonnementsolaire-en-air-chaud-9547.html>. (Consulté le 19/06/2020 à 20:20 pm)
- [3] SAADI, Souad. Effet des paramétrés opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan. Thèse de Magistère en physique, université Mentouri de Constantine ,2010.
- [4]DEHIRI, Zohra .Etude numérique d'un capteur solaire thermique plan dans la région de Boussaâda. Mémoire de Master Académique, université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ,2018.
- [5] AMRAOUI, Mohammed Amine. Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité. Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2012.
- [6] NADJI, Nedjemeddine. Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique. Mémoire de master en énergétique et environnement, université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2017/2018.
- [7] ARBIA, Aissa et CHAOUBI, Ouafa. Contribution à la simulation des transferts thermiques dans un capteur solaire plan pour application de séchage. Mémoire de Master académique en Génie Energétique, université KASDI MERBAH Ouargla , 2015.
- [8] J.B. Saulnier, A. Alexandre, La modélisation thermique par la méthode nodale, Ses principes, ses succès et ses limites, Revue Générale de Thermique 280 (1985) 363 – 372.
- [9] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, Energy and Buildings 66 (2013) 678 – 687
- [10] DAGUENET, Michel. 'Les Séchoirs Solaires: Théories et Pratique'. publication de l'UNESCO, Paris, 1985.
- [11] SLIMANI, Mohamed EL Amine. Etude d'un capteur de type « PV-THERM » pour un séchoir solaire indirect. Conception d'un modèle de simulation numérique. Mémoire Master

spécialité DYNAMIQUE DES FLUIDES *et* ENERGETIQUE, UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE USTHB / ALGER, 2013.

[12] DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley, 1980.

[13] BAHRIA, S.; AMIRAT, M. Influence de l'adjonction des chicane longitudinales sur les performances d'un capteur solaire plan à air. Revue des énergies Renouvelables, 2013, vol.16, n°1, p. 51-63.

[15] KAOULAL, Rabéa. Contribution à l'étude des systèmes solaires intègres aux bâtiments. Thèse de doctorat en physique énergétique, université Tahri Mohammed Béchar, 2016/2017.

[16][14] BOUHEDIBA, Malika. Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS) .mémoire de Master en génie mécanique, Université Hassiba Benbouali de Chlef ,2011-2012.

[17] KAOULAL, Rabéa; et al. Modélisation numérique d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en régime transitoire en vue d'intégration au bâtiment. In: Conférence IBPSA France-Arras-2014. 2014.

[18] Eric Goncalves da Silva. " Méthodes et Analyse Numériques ".archivesouvertes.fr/cel-00556967. Soumis le 18 janvier 2011.



Chapitre IV:

Les étapes de réalisation
de prototype « séchoir
solaire portable »

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons exposer les étapes suivies pour la réalisation et la mise au point d'un prototype de séchoir solaire indirect muni de deux capteur plan à air le premier assure le séchage et le deuxième renforce le phénomène de tirage et une enceinte de séchage qui contient cinq claies en tulle grillage vert, sur les quelles sont posés les produits à sécher. Ce séchoir est construit presque entièrement en matériaux locaux et est utilisable dans les conditions optimales à partir de l'énergie solaire. Le système est simple, Il ne possède pas de source de chaleur auxiliaire. Nous avons s'inspiré l'idée du prototype de notre séchoir solaire du séchoir solaire (KSS STANDARD) disponible sur le marché européen (avec un prix de 175 € c à d environ 26472,60 DA), qui a été inventé par l'ingénieur **Henri Boon**.

La différence qui existe entre les deux capteurs est dans la modification apportée pour la réalisation du passage du fluide caloporteur, pour nous c'est un seul passage avec isolation en dessous (en polystyrène), et avec un prix moins cher en plus testé sous un climat saharien ainsi on sèche des produits locaux. Une autre différence importante c'est que nous avons ajouté deux poignets et deux petites roulettes de meubles en plastique (recyclées) pour faciliter son utilisation et surtout son déplacement.

Après la description du séchoir solaire indirect conçu, ce chapitre présente également les premières expériences de séchage réalisé afin de tester la performance et l'efficacité de notre séchoir solaire.

Le déroulement des expériences a été effectué au niveau de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER-M.S) d'Adrar.

IV.2 Le choix de dispositif expérimental :

Au départ, on s'est basé sur la qualité du produit, pour cela nous avons opté pour les séchoirs solaire indirect qui sont plus performants que les séchoirs direct, car ils présentent l'avantage de mieux préserver les propriétés de l'aliment à s'avoir; sa couleur, son aspect et sa valeur nutritive. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage de produit alimentaire.

IV.3 Description du séchoir solaire :

Nous allons faire une description générale du prototype expérimental réalisé dans de ce mémoire de master. Nous considérons un séchoir solaire de type indirect, il se compose de trois parties importantes :

- **Unité de production d'air chaud:** elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage de 3 mm d'épaisseur, l'absorbeur en tôle métallique galvanisé est peint en noir (coefficient d'absorption =0.90).

L'isolation thermique est en polystyrène de 2 cm d'épaisseur au-dessus du contreplaqué, les parties latérales du capteur sont en bois d'épaisseur 1.5 cm. La distance entre l'absorbeur et le vitrage est de 5.5 cm.

- **Chambre de séchage :** C'est une enveloppe en bois de section rectangulaire (hauteur intérieure =61cm, largeur intérieure=27cm et la profondeur intérieure = 24.5cm). Comprend 4 cadres claires, sur lesquelles on doit posés les produits à sécher. La distance entre elle de 25 cm.

- **Une partie cheminée :** est une boîte parallélépipédique fixée à l'arrière de la chambre de séchage, dont le rôle est d'aspirer l'air chaud chargé d'humidité par le capteur solaire introduit au sommet de la cheminée à fin d'assurer le tirage de l'air humide.



Figure IV. 1: Prototype expérimentale du séchoir solaire.

IV.4 Les étapes de Conception du séchoir solaire:

✚ Matériel :

- Des tasseaux de bois et du contreplaqué,
- Outils pour découper selon dimensions précises.
- De la colle à bois
- Plaque de verre.
- La tôle galvanisée.
- Plaque du polystyrène
- Des vis à bois.
- La Peinture noire.

IV.4.1 Les étapes de la réalisation du capteur à air :

IV.4.1.1 Dimensions du capteur à air :

D'abord, on fait tracer les différentes parties du cadre de capteur conçu par le bois d'épaisseur de 1.5 cm et contreplaqué, puis tracer la surface inférieure de longueur 56cm et de largeur de 30cm, ainsi que les ailes (cotés gauche et droite) de dimensions : 63 cm *9 cm et d'épaisseur de 1.5cm ont été ensuite collées à la base du capteur en utilisant des chevilles et de colle de bois.

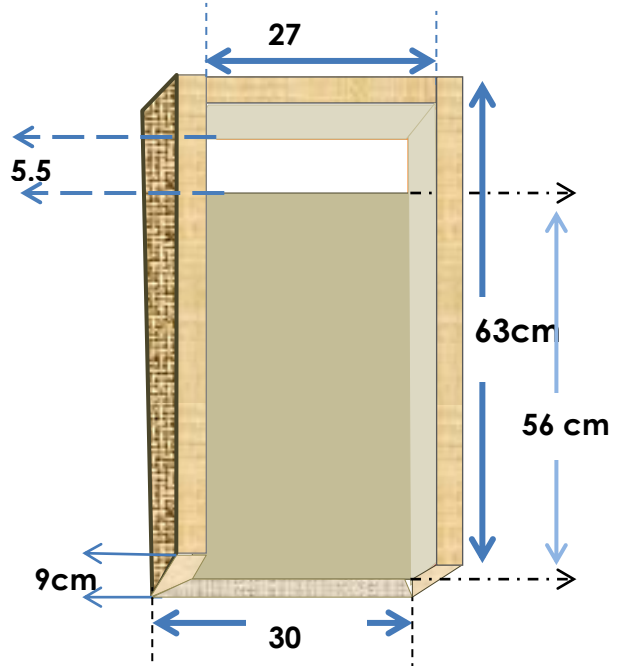


Figure IV.2: dimension du cadre parallélépipédique du capteur solaire.

Dans les côtés du cadre du capteur, nous avons gravé des bords pour passer la vitre et la tôle d'absorbant.

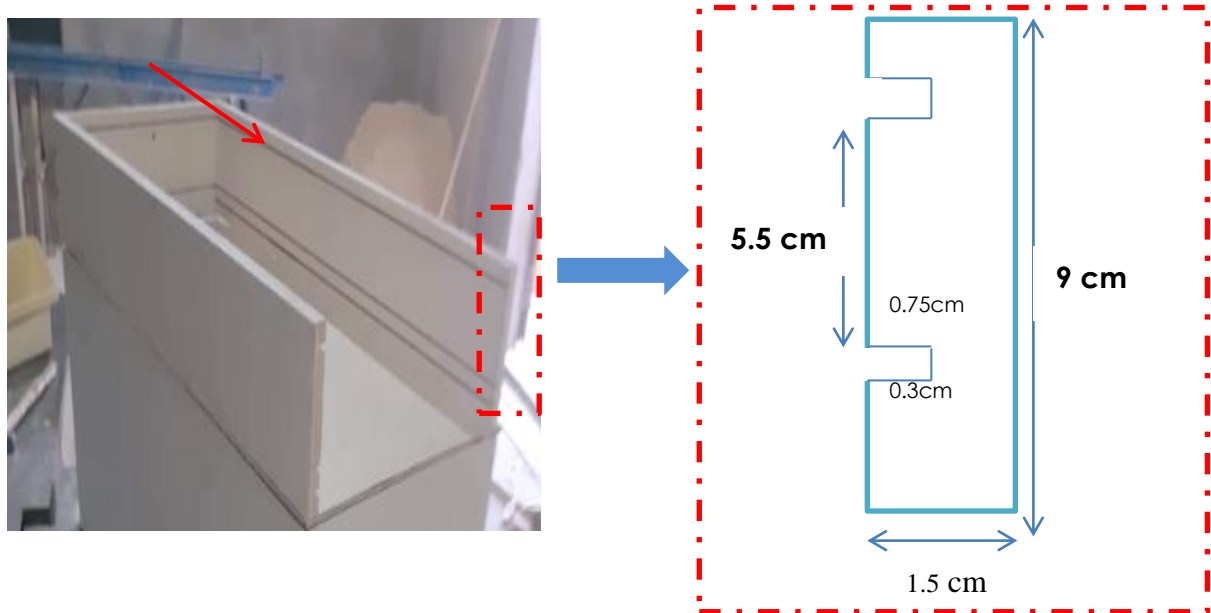


Figure IV.3: Structure et dimension des côtés du capteur.

IV.4.1.2 Isolation thermique :

L'étape suivante nécessite de placer l'isolant pour remplir l'espace intermédiaire entre les deux parois latérales du capteur.

Nous avons utilisé du polystyrène comme couche isolante d'une épaisseur de 2 cm au-dessus de contreplaqué, comme il est illustré à la figure.



Figure IV.4: L'installation de la couche d'isolation.

IV.4.1.3 Découpage de la plaque couverture et absorbante :

Après l'étape précédente, à l'aide de la machine coupante on a coupé des plaques selon les dimensions suivantes:

- Une plaque verre, d'épaisseur de 3 mm et de dimension : 62cm*28.5 cm.
- Une plaque acier galvanisé, d'épaisseur 0.4 mm et de dimension : 56 cm *28.5 cm, après ce coupure ce dernier, nous avons pigment sa surface par peint noir.

Pour la peinture noire, nous avons préparé une peinture naturelle à la maison, saine et non toxique selon les ingrédients suivante :

(L'eau, la farine de blé, d'huile de Lin, savon noir liquide, pigmente noir (le charbon de bois concassée)), les étapes de préparation dans le site [1]



Figure IV.5: Peinture naturelle.

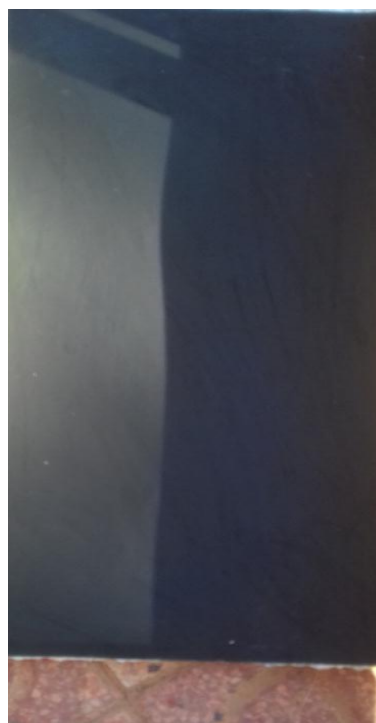


Figure IV.6: Revêtement de la surface d'absorbeur (interne)

IV.4.1.4 Montage :



Figure IV.7: Installation de la plaque absorbante et le vitrage dans le cadre du capteur.

Finalemnt, nous avons collé les coté du capteur par la silicone pour éviter les pertes.



Figure IV.8: Collage des côtés du capteur

La lame d'air d'épaisseur **5.5cm** est située entre l'absorbteur et la vitre est **1cm** pour le positionnement de couvercle.

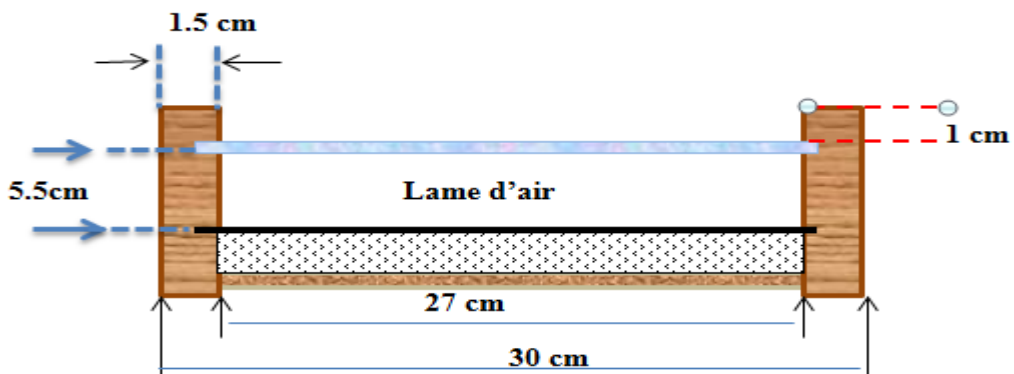


Figure IV.9 : Coupe longitudinale du capteur solaire



Figure IV.10 : Capteur solaire à air.

IV.4.2 Les étapes de réalisation de la chambre de séchage :

IV.4.2.1 La chambre :

La chambre est une boîte parallélépipède, son volume est (27cm*24.5cm*61cm), ses parois sont constituées du bois d'épaisseur 2cm, elle contient cinq supports en bois fixé à l'intérieur des murs latéraux de la chambre et la distance entre elles sont de **25 cm**.

Le capteur solaire précédant se considère comme une porte à la chambre.



Figure IV.11 : La chambre du séchage

La claie (**étagères**) identique à un tamis de section rectangulaire, elle est composée d'une cadre en bois (**26cm*24cm**) fixe à un tulle grillage vert en plastique, sur lesquelles est posé le produit à sécher et permet un meilleur passage d'air.



Figure IV.12: Fabrication des claies

IV.4.2.2 La cheminé :

La cheminé fixé à l'arrière de la chambre, elle se compose de deux partie :

- ✓ Conduite a une forme parallélépipède de dimension : Longueur : 30 cm et largeur : 10 cm, hauteur : 64 cm. est installée à l'arrière du la chambre.
- ✓ Un capteur solaire de surface (50 cm*27.5cm) similaire au capteur précédent.

IV.4.2.3 Le couplage :

Le deuxième capteur glisse comme un tiroir, il est fixé au sommet du conduite par des en acier au carbone galvanisé sous forme de point d'interrogation (vis auto taraudeuse). Ce capteur est pour assurer le phénomène de tirage à fin de faire sortir l'air humide.



Figure IV.13 : Illustration du glissement de capteur dans la conduite.

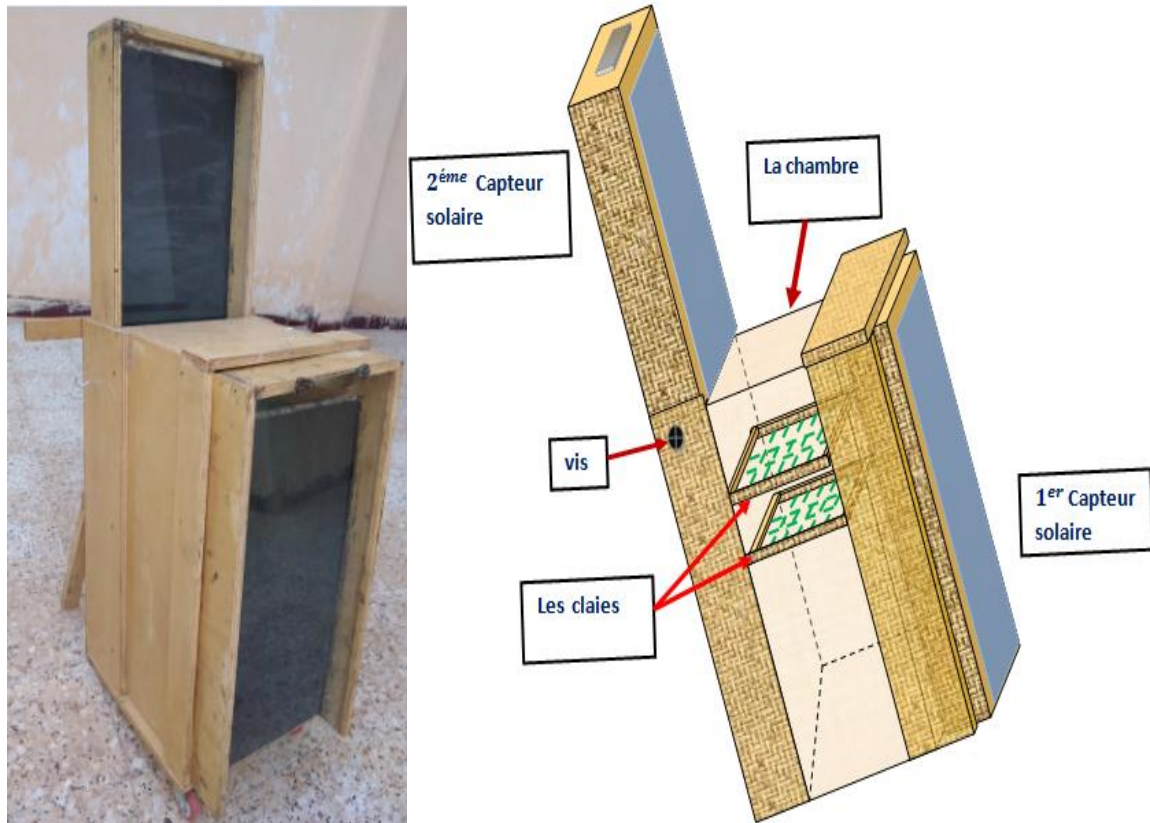


Figure IV.14: Schéma du séchoir solaire indirect.

IV.5 Principe de fonctionnement :

L'air ambiant est aspiré au bas du capteur solaire, il s'échauffe au contact de la plaque noire par convection et il monte jusqu'à la sortie de capteur produit l'air chaud, puis il rentre par le haut de la boîte de séchage, ensuite les produits sont séchés doucement avec le flux d'air descendant (qui se charge d'humidité et devient lourd).

Une fois arrivé en bas, l'air est aspiré à l'arrière de la chambre dans une cheminée, puis il monte et se réchauffe grâce à la seconde capteur est positionné au sommet de la cheminée pour accélérer le tirage d'air vers l'extérieur.

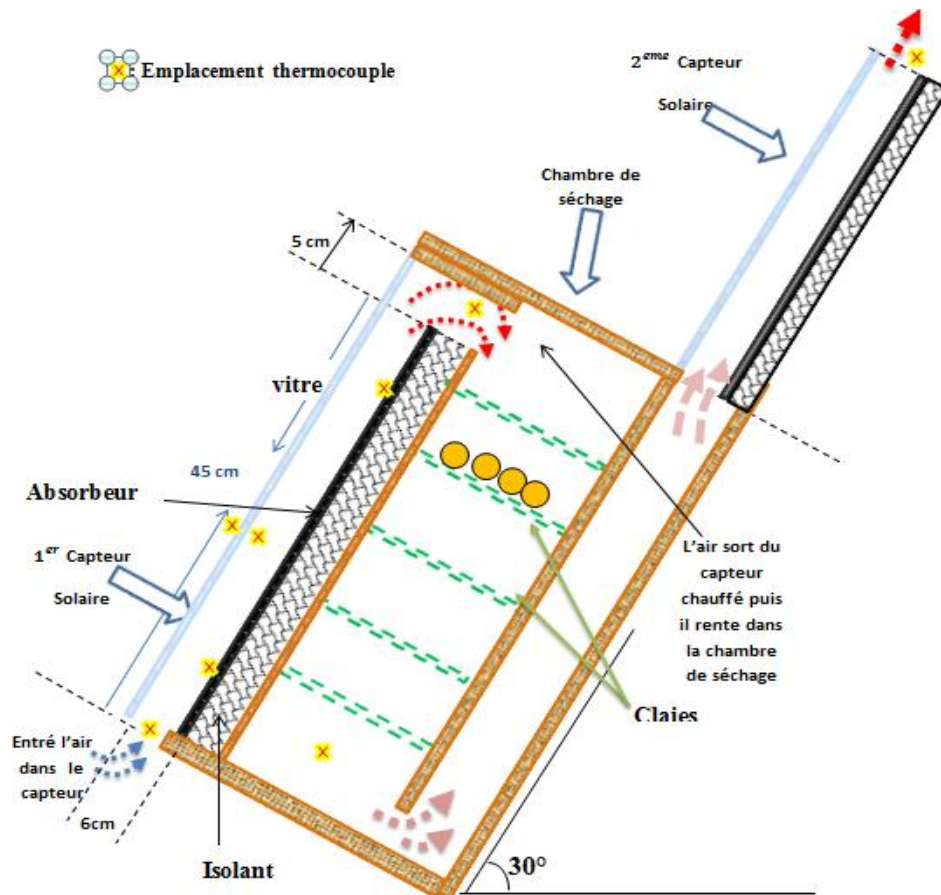


Figure IV.15: Coupe longitudinale du séchoir solaire.

IV.6 Banc d'essai :

Dans cette première partie, une étude expérimentale a été réalisée au niveau de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER-MS) d'ADRAR pour une journée printemps (le 17-03-2020) sous ensoleillement naturel.

Les paramètres du site d'expérimentation sont résumés dans les tableaux ci-dessous :

Surface de la région	Latitude	Longitude	Altitude	Albédo du sol
424,948 km ²	27°53' Nord	0°17' Ouest	269 m	0.2

Tableau IV.1:Caractéristique du site d'URER-MS (Route du Reggane, Adrar)

Le système complet est orienté en plein sud et incliné de (30°) par rapport à l'horizontal, suivant la latitude de lieu(Adrar). Pour capter le maximum du rayonnement solaire.



a) Vue latérale

b) vue de face

Figure IV.16 : Prototype expérimental du séchoir solaire indirect installé à l'UREMS.

IV.6.1 Les instruments de mesure expérimentale :

➤ Mesure des températures :

Les sondes de mesure des différentes températures sont des thermocouples de type (k et J) Pour faire l'étude, on a supposé que la température d'entrée du fluide (air) est égale à la température ambiante.

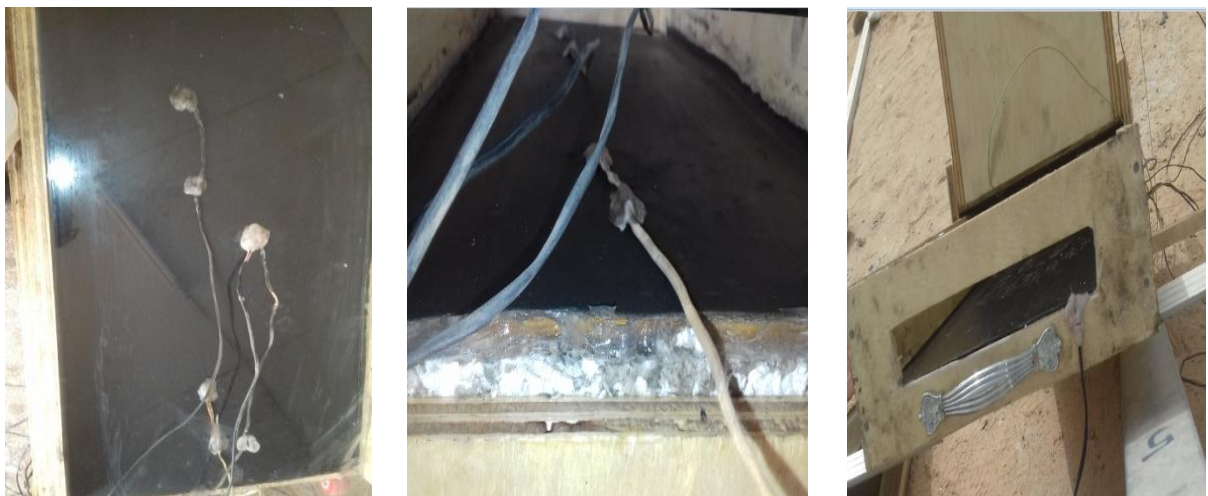


Figure IV.17: Installation des thermocouples

Tous les thermocouples sont reliés à un enregistreur appelé « acquisition de données » à carte mémoire de marque FLUKE2625 A, qui fait les enregistrements à un pas d'une mesure par 3minute pendant toute la durée du test.



Figure IV.18: Raccordement des différents thermocouples à l'acquisition des données.

➤ **Mesure du rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire à la surface du capteur est mesuré à l'aide d'un **pyranomètre**, placé à mi-distance du plus grand côté du collecteur. Les valeurs du rayonnement solaire sont enregistrées sur la même acquisition. [3]



Figure IV.19 : Pyranomètre.

IV.7 Etude expérimentale :

✚ **La journée du 17/03/2020:** nous avons testé le séchoir solaire (à vide).

Les paramètres considérés dans notre expérience sont :

- Eclairement global
- Température ambiante.
- Température du fluide (air) à l'entrée et à la sortie du capteur.
- Température de la vitre (coté extérieur et intérieur).
- Température de l'absorbeur (entré et la sortie).
- Température dans la chambre.
- Température à la sortie de séchoir.

Tous les résultats obtenus sont représenté dans des tableaux.

T (°C) Temps (h)	Ts, C1	Ts, chamb	T e, C1	Tabs, s	Tabs, e	Tv, in	Tv, ex	Ts, C2
11 :40	46,63	42,50	35,68	90,26	77,93	54,00	53,27	49,69

Tableau IV.2: Echantillon des résultats obtenus

IV.7.1 Les résultats expérimentaux :

IV.7.1.1 Les données météorologiques :

La première expérience a été effectuée le 17 mars, sous un ciel dégagé, la valeur de la température ambiante varie de **19 °C** à **30 °C**, et atteint sa valeur maximale vers 13 h. la vitesse du vent très faible, ces données climatiques ont été mesuré par la station météorologique disponible au niveau du site d'Adrar. [2]

- **La variation temporelle de l'éclairement solaire global de 17/03/2020**

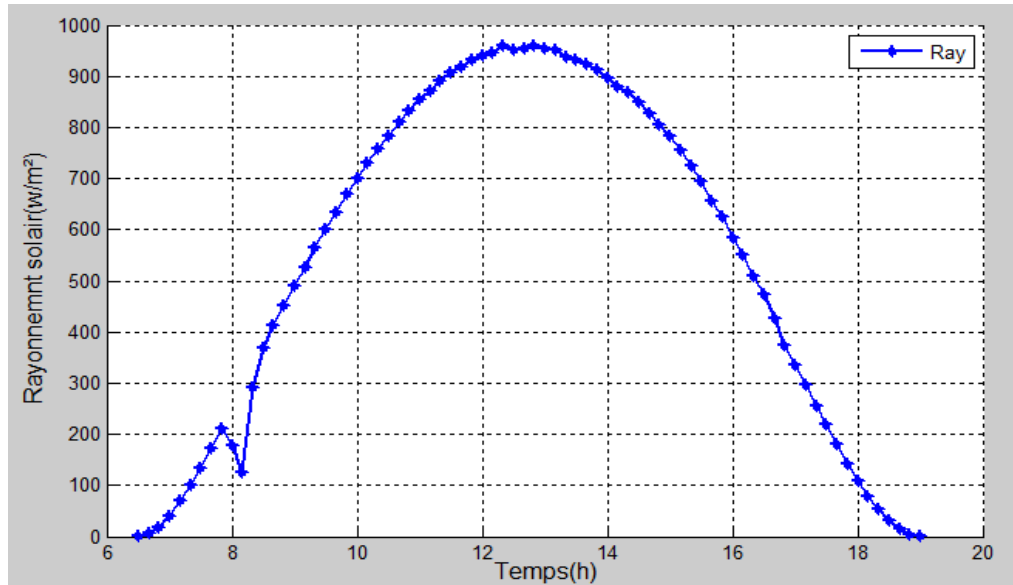


Figure IV.20: Eclairage solaire.

Nous avons observé que le rayonnement solaire prend la forme cloche au cours de la journée, il augmente avec la croissance du temps jusqu'à arrive à une valeur maximale de **980 w/m²** à **13 h** (à après-midi) et après ça diminue jusqu'à il devenu nulle (coucher du soleil), prenant une forme symétrique par rapport à l'axe de **13 h**.

➤ **La variation temporelle de la température ambiante :**

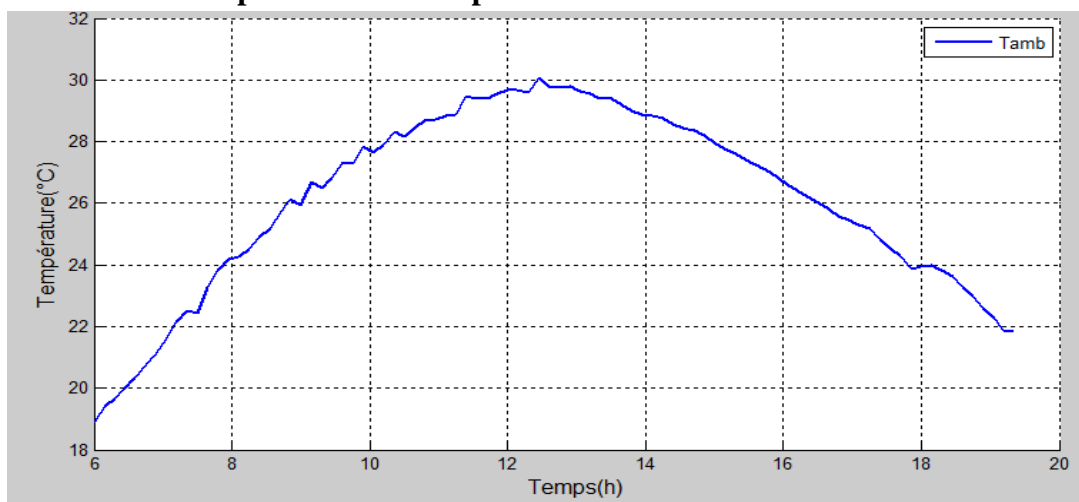


Figure IV.21: Température ambiante mesurée.

D'après le **figure IV.21** qui représente la variation de la température ambiante en fonction de temps, la valeur minimale est **19°C** à **6h** et la valeur maximale **30°C** dans l'intervalle de temps [**13h-15h**], puis elle diminue.

IV.7.1.2 Les profils des températures des différentes composantes du capteur solaire à air :

➤ **La variation temporelle de la température de la plaque absorbante :**

La figure IV.22 représente variation de la température au niveau de plaque absorbante coté inférieure et supérieure de la plaque « à l'entrée et à la sortie du capteur » :

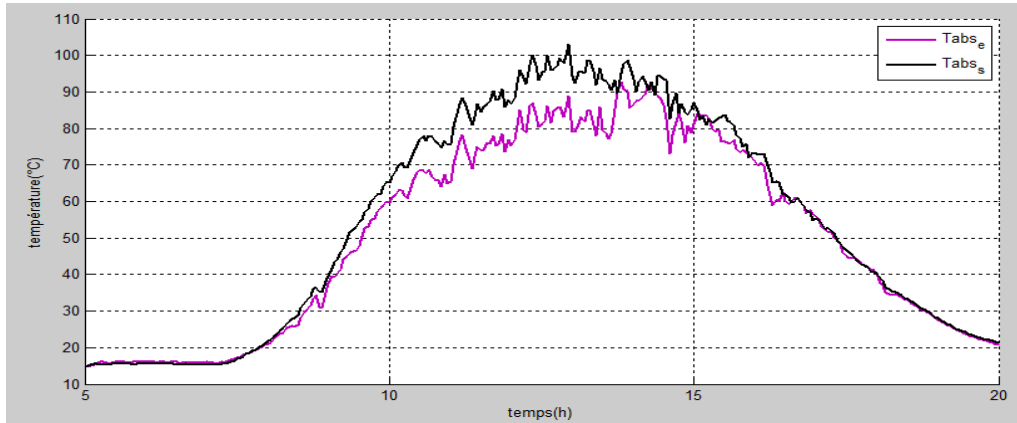


Figure IV.22: Variation temporelle de la température au niveau d'absorbant

Nous remarquons que les températures à la sortie et l'entrée de la plaque (T_{abs_s}, T_{abs_e}) commencent à se chauffer après 7h30min du matin avec une valeur minimale d'environ de 17°C jusqu'à elle atteint des valeurs maximales 100°C et 90°C respectivement à 14 h; puis elle commence à diminuer.

Les deux courbes (T_{abs_s}, T_{abs_e}) ont été évaluée presque de la même manière mais la température à la sortie est supérieure que celle de l'entrée, cependant on trouve que les écarts entre ces deux températures augmentent entre 10h et 15h puis se réduisent après 15h. On mentionne une synchronisation avec l'éclaircissement se qui confirme bien que le temps de réponse est réduit.

➤ **La variation temporelle de la température de la vitre (externe et interne)**

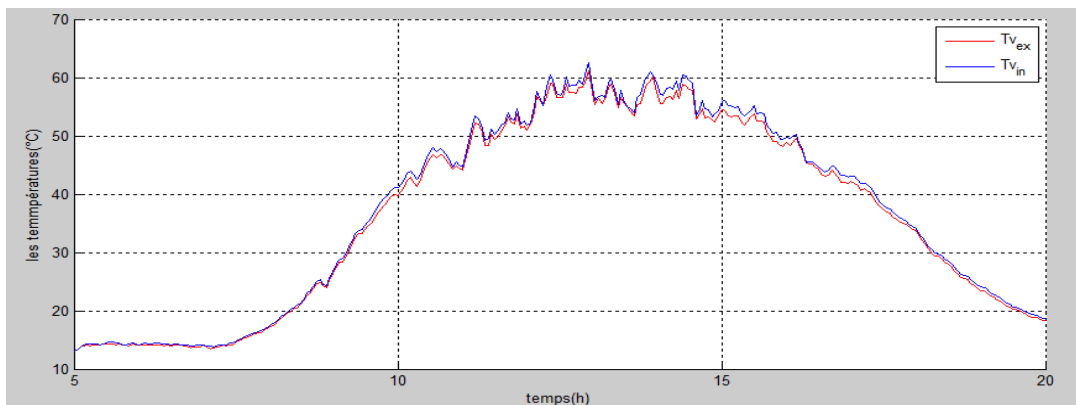


Figure IV.23: La variation temporelle de la température au niveau vitrage

Les deux courbes $T_{v_{in}}$ et $T_{v_{ex}}$ sont presque identiques (montent et descendent ensemble) et avec un très faible écart entre eux environ 2°C .

Nous remarquons que la température de la face interne du verre est un peu supérieure que celle de la face externe, les deux commencent à se chauffer à partir de 7h et 30 min, puis elles augmentent jusqu'à atteignent ses valeurs maximales environs 60°C et 58°C respectivement dans la période [12h-14h]; après elles diminuent.

➤ **La variation temporelle de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur**

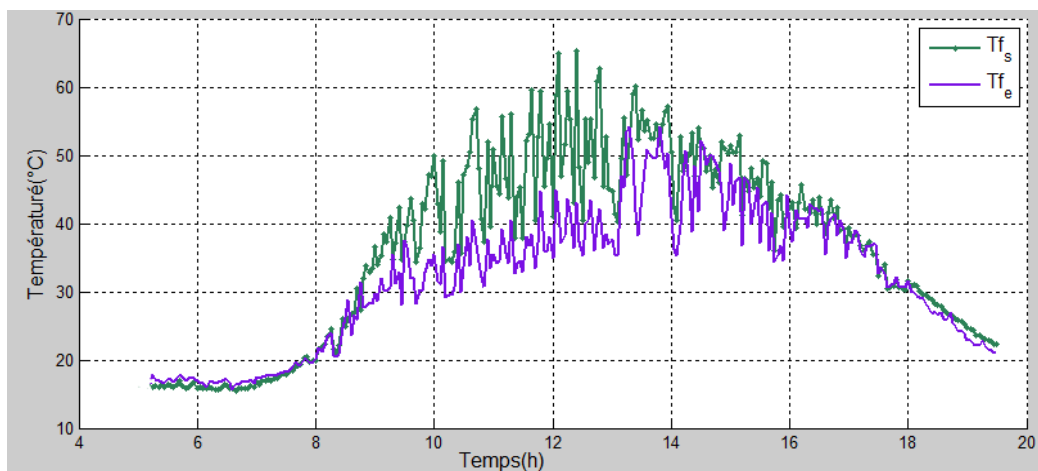


Figure IV.24: Evolution temporelle de la température de l'air à l'entrée et sortie du capteur.

La température de l'air à la sortie et l'entrée du capteur T_{f_s} et T_{f_e} ont le même comportement que celui du rayonnement solaire, leurs valeurs maximales sont respectivement : 45°C et 65°C dans l'intervalle de temps compris entre 12h et 14 h, ensuite elles diminuent.

Nous constatons un faible écart entre l'entré et la sortie du capteur, ceci est dû à la surface réduite du capteur solaire.

➤ **La variation temporelle de la température de l'ensemble des composants du capteur à air :**

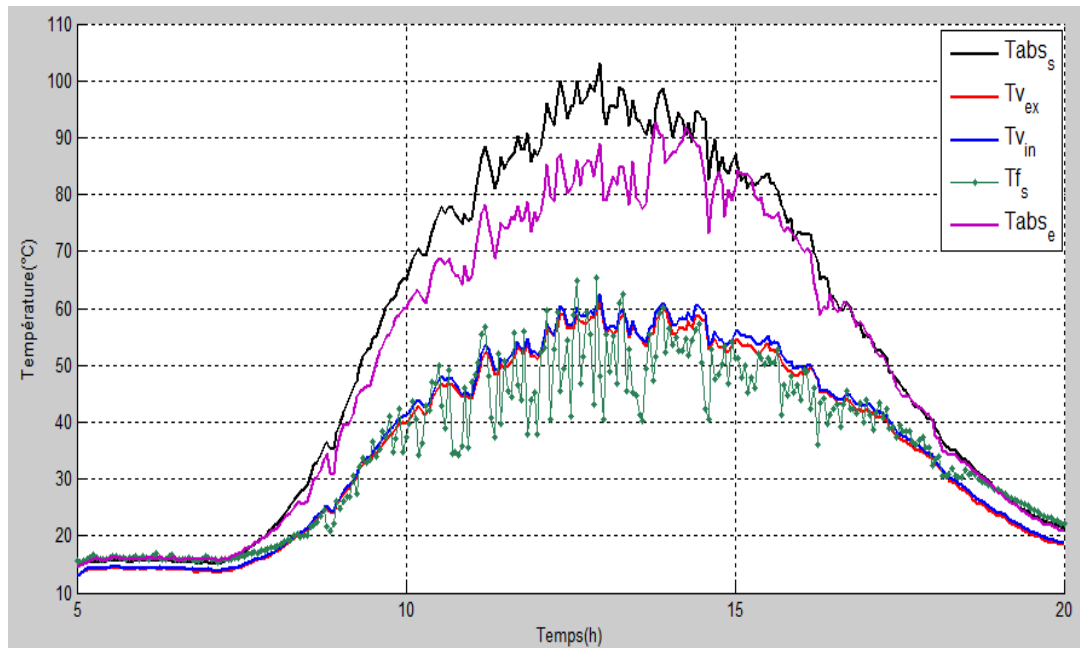


Figure IV.25 : Allure de température des différentes couches du capteur pour l'expérimentation.

IV.7.1.3 Discussions et analyse des résultats :

La figure **IV.25** représente l'allure de l'évolution instantanée des températures mesurée expérimentalement des différents composants du capteur solaire à air en convection naturelle.

Nous remarquons tous les températures ont le même comportement, leurs profils sont identique à celui du rayonnement solaire. Les températures résultantes atteignent leurs valeurs maximales à environ 13 h alors que la valeur maximale de rayonnement solaire est atteinte à 12:40 min.

La température de l'absorbeur est la plus élevée, puisque la plaque absorbante est en acier galvanisée et elle est recouverte par une couche sélective (peinturé en noir), d'une faible émissivité ($\varepsilon = 0.25$) et d'une faible masse thermique et de facteur d'absorption solaire élevé ($\alpha = 0.95$). La chaleur recueillie par cet élément de base (l'absorbeur) est transmise au fluide (air). Nous notons également que les températures mesurées de l'air et le vitrage (coté interne) sont suffisamment rapprochées. Ce phénomène est expliqué par la convection entre l'absorbeur et le verre avec la présence de l'effet de serre dans cette situation; ce phénomène physique prouve une augmentation de mouvement moléculaire d'air.

Nous remarquons que la température de la face intérieur de la vitre est supérieure à celle du côté extérieure, ceci s'explique par l'absorption du rayonnement incident émis par

l'absorbeur d'une part et la chaleur cédée par l'absorbeur sous forme de rayonnement I.R, ce dernière est piégé entre l'absorbeur et la face intérieur de la vitre (l'effet de serre). Puis, la température de vitre extérieure légèrement inférieure à celle de la face intérieure, ceci est dû à son affectation par l'action du vent qui cause des déperditions thermique par convection avec l'air ambiant.

IV.7.1.4 Evolution de la température dans le séchoir solaire:

La température de l'air est mesuré dans les trois positions, l'entrée et la sortie de la chambre; et la sortie du cheminé. Cette figure montre que les températures ont la même allure et atteignent leurs valeur maximale à 12 h varient respectivement: 45 °C ,55°C et 65 °C.

Nous notons une légère diminution de température apparait à la sortie du premier capteur (le séchoir), cela est justifié par l'augmentation de la vitesse de l'air dans la cheminé par rapport à la chambre de séchage.

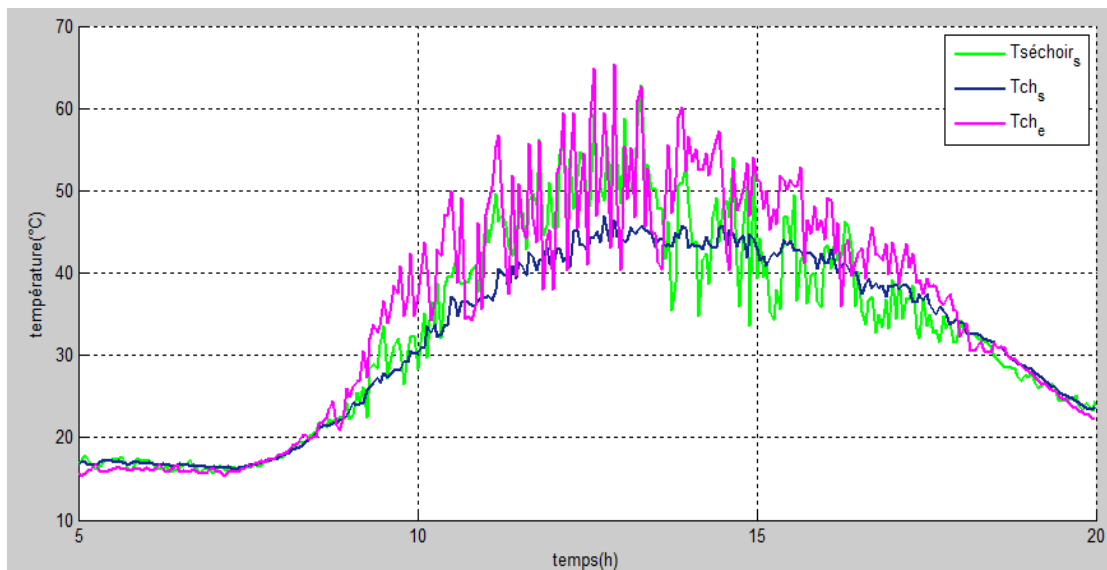


Figure IV.26: Variation temporelle de la température de l'air dans la chambre et la cheminé.

IV.8 Les résultats numériques:

La résolution du système d'équations permettre de déterminer la variation de température pour chaque élément du capteur solaire à air et le rendement thermique instantanée en utilisant des données météorologiques. Les courbes illustratives sont :

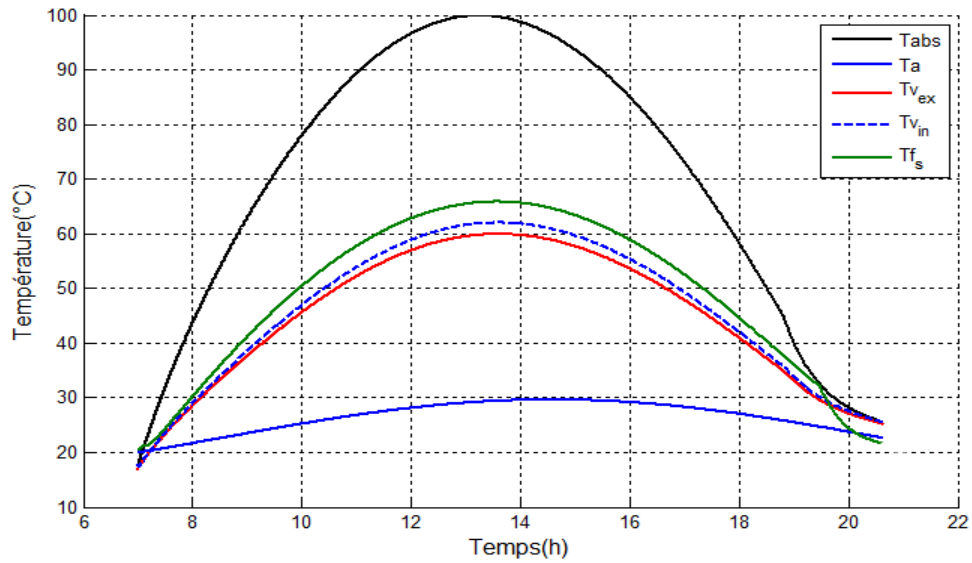


Figure IV.27: la variation temporelle de la température simulée des différentes composantes du capteur à air.

➤ **Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de plaque absorbeur:**

Dans ce cas nous avons fixé le temps à midi, pour tracer le profil de température de l'air dans la conduit du capteur (lame d'air).

La figure (IV.28) représente le comportement de l'air à travers lame d'air. L'air rentre avec une température ambiante de **20°C**.

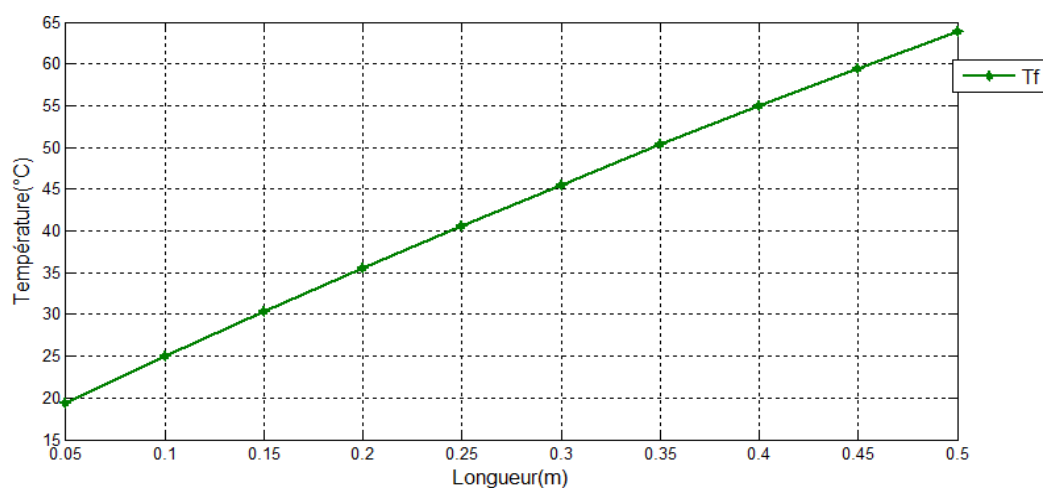


Figure IV.28: évolution de la température de l'air le long du capteur.

Nous remarquons que la température de l'air augmente d'une façon presque uniforme forme de l'entrée à la sortie du capteur, l'air sort avec une température de **63°C**, ce qui explique que l'air absorbe la chaleur cédée par l'absorbeur par convection.

➤ **Le rendement:**

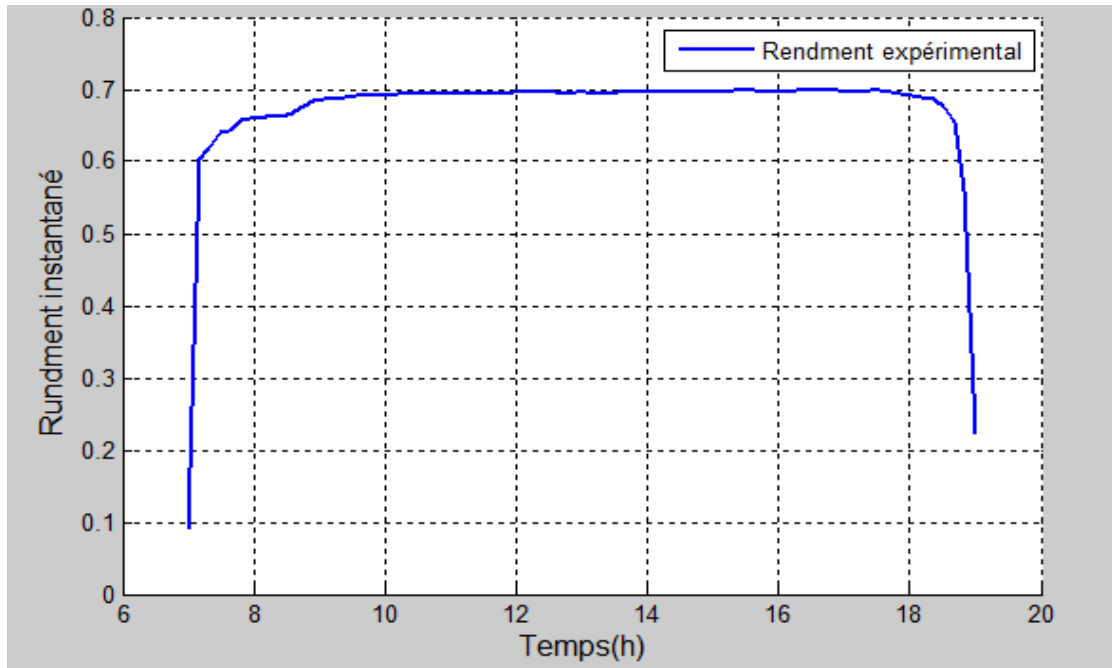


Figure IV.29: Rendement thermique instantané

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par } m^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan de capteur}} = \frac{Q_u}{A_c G} \text{ (Voir les détails dans le chapitre III)}$$

IV.9 Validation du modèle de simulation par les résultats expérimentaux:

Nous avons fait une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus de la journée **17mars 2020** et les résultats numérique des performances thermique (les températures et le rendement ...) pour le même intervalle du temps [**7h-20h30min**]; l'ensemble de ces valeurs simulées et mesurées sont présentées sur les figures suivantes:

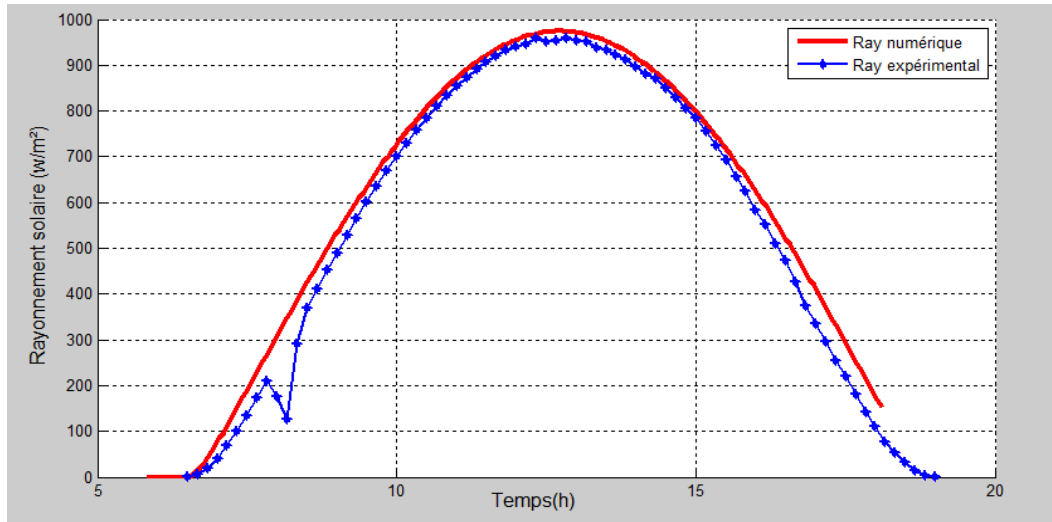


Figure IV.30: Eclairage simulé et expérimentale.

D'après la figure, nous constatons un très bon accord entre les mesures effectuées et la simulation.

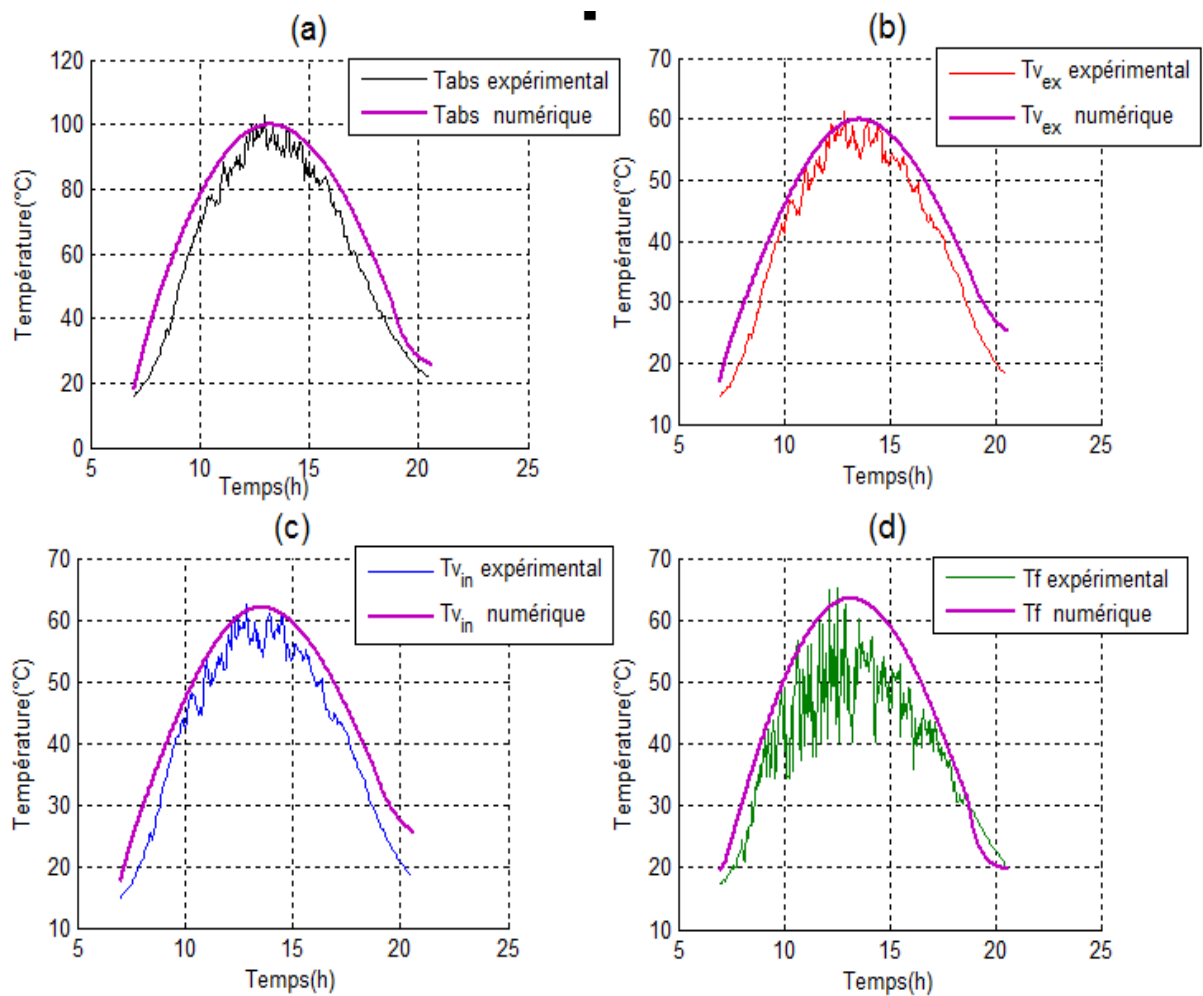


Figure IV.31: les températures mesurées et simulées, (a) la plaque absorbante, (b) la partie externe du vitre, (c) la partie interne du vitrage et (d) la température de sortie de l'air.

D'après la figure IV.31, nous notons que les résultats numérique et expérimentale se coïncident bien avec un faible écart entre les deux; cet écart observé à cause de la différence des conditions climatique comme (rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante dans une journée) et aussi à cause de l'estimation des propriétés des différents composants du capteur solaire à air (conductivité et coefficient d'absorption de la plaque absorbante ...).

IV.10 Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de décrire les étapes suivis lors de la construction du séchoir solaire et les moyens utilisés, il a été testé avec succès.

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

Références :

[1] **M. Capderou**, Atlas solaire algérien, Tomel, Edition école polytechnique d'architecteur et d'urbanisme, Algérie, 1986.

[2] Station météorologique « ENER MENA » installé à l'URER/MS Adrar.

A decorative scroll graphic with a black outline and grey shaded ends, framing the text. The scroll is oriented vertically, with the top edge on the right and the bottom edge on the left.

Chapitre V:

Résultats du séchage de
quelques produits
alimentaires (fruits et
plantes)

V.1 Introduction :

L'objectif essentiel de ce chapitre est de déterminer les courbes de la vitesse du séchage de perte d'humidité relative, et de la température des différents produits (la pomme, la banane, le laurier, verveine..) au cours de l'opération de séchage. Dans cette étude expérimentale effectuée au moyen de notre séchoir solaire de type indirect conçu et étudié en détail précédemment (chapitre **IV**), qui fonctionne en mode de convection naturelle destiné pour le traitement thermique à moyenne durée des produits agroalimentaires. Dans cette partie on s'est intéressé à l'influence des quatre paramètres (la masse initiale, la disposition, et l'épaisseur de découpage du produit) sur la vitesse de séchage.

En évidence, nous allons tracer les différentes courbes interviennent durant l'opération du séchage telle que : la variation de la masse du chaque produit, la température ambiante et les températures d'entrée et de sortie de l'enceinte de séchage.

A la fin, nous avons estimé la qualité et la durée du séchage de chaque produit en déterminant la température nécessaire pour le séchage.

V.2 Période des tests :

Les différents tests se sont effectués dans l'URENMS pendant les journées suivantes :

- ✚ Le 24/06/2020: séchage de pomme.
- ✚ Le 29 /06/2020:séchage des plantes aromatiques (la menthe et le laurier).
- ✚ Le 30/06/2020: séchage des feuilles de verveine.
- ✚ Le 14/08/2020 : séchage de banane (à la maison).

V.2.1 Grandeurs mesurées:

V.2.1.1 Mesure des températures :

On procède, à l'aide des thermocouples qui sont liées à l'acquisition pour des intervalles du temps de 3min, on mesure les températures suivantes:

- Température de l'air ambiant
- Température de l'air à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage.

V.2.1.2 Mesure d'humidité de l'air:

L'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre de séchage est mesurée par un thermo-hygromètre de marque TESTO. Cet appareil est muni d'une carte mémoire qui enregistre les mesures qui sont récupérées après son branchement à un ordinateur.



Figure V.1: Hygromètre.

V.2.1.3 Mesure des masses humides:

Les masses humides du produit sont effectuées au moyen d'une balance électronique à affichage numérique de précision $\pm 0.001g$. Cette méthode de mesure permet de suivre la diminution du poids du produit au cours de séchage.



Figure V.2: Une balance électronique.

V.3 Cinétique de séchage des produits: *cas des plantes aromatique et médicinale.*

V.3.1 La menthe verte :

La menthe est une plante vivace de la famille des lamiacées, du genre *Mentha*, cultivée comme plante aromatique, cette plante est jugé très importante dans la cuisine algérienne.

V.3.1.1 Préparation de produit :

1. Retirer et Recueillir la menthe du jardin de la maison.

2. Lavage manuellement de la plante par de l'eau pour éliminer les impuretés.
3. Placer la menthe sur le papier absorbant pour égoutter d'eau.
4. Séparer les grosses tiges des feuilles.
5. Distribution des feuilles sur la claie pour le séchage.



Figure V.3: Les étapes de préparation de la menthe.

V.3.2 La feuille de laurier :

Laurel Nobili, le Laurel vrai ou simplement Laurel, est une espèce d'arbustes à feuillage persistant de la famille des Lauracées .Très présent dans les régions méditerranéennes, Le laurier possède des feuilles, dont la forme est dite "lancéolée" (en fer de lance), des fleurs jaunes, parfois presque blanches, ainsi que de petites baies. [1]



Figure V.4 : Le Laurier. [2]

V.3.2.1 Préparation du produit :

La Laurel a été achetée du marché local (souk bouda – Adrar ville) et nous avons choisi les plantes longues avec des feuilles minces de grande taille, nous les avons ensuite lavé manuellement avec de l'eau potable pour enlever les impuretés et les résidus de pesticides et d'autres polluants. Enfin, elles sont étalées sur l'étagère d'une manière qui laisse les feuilles intactes les unes à côté des autres.

V.3.3 Protocole expérimentale :

Après la préparation des plantes, nous étalons une masse initiale de **25 g** du produit (Laurel) dans la première claie et la seconde contient **30 g** des feuilles de menthes, pour suivre la perte de masse des produits au cours de séchage, nous avons effectué les mesures de poids à l'aide d'une balance, l'intervalle du temps de pesée est une heure au début de l'expérience puis 30 minutes vers la fin.

L'ensemble de l'appareillage doit fonctionner au moins une demi-heure avant l'introduction des claies chargées dans la chambre de séchage.



Figure V.5 : Les claies chargées par les produits à l'intérieur de la chambre de séchage.

Chaque pesée donne la masse humide du produit $M_h(t)$. L'expérience de séchage est arrêtée lorsque la masse du produit devient constante.

Le tableau suivant donne les variations du poids obtenus pendant l'essai :

		Temps (h)						
		8 :10	9 :10	10 :10	11 :10	11 :40	12 :10	12 :40
Poids (g)	1 ^{er} Claies : Feuilles laurier	25	22	17	13	10	8.5	8
	2 ^{eme} Claies : Feuilles menthe	30	25.5	18.7	12.5	7.9	6.8	6.5

Tableau V.1: Variation du poids mesuré durant le séchage.

V.3.4 Evolution de la masse humide pendant le séchage :

✚ Le cas du laurier:

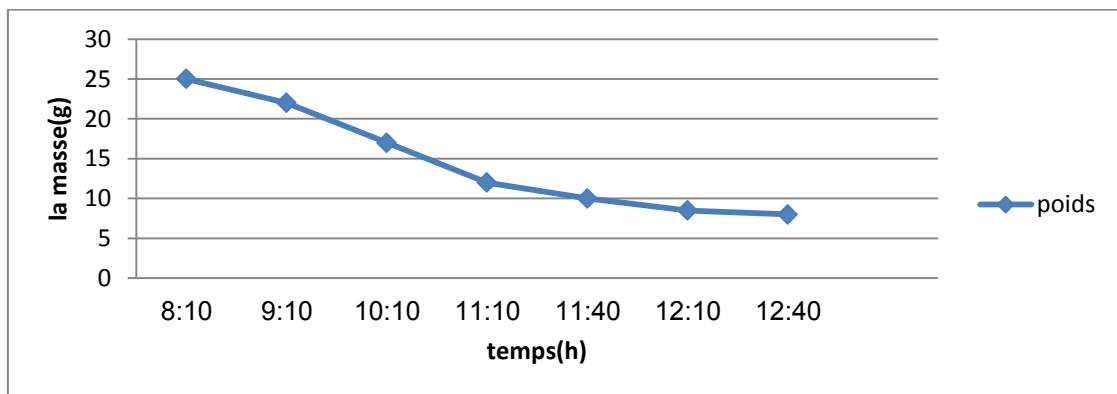


Figure V.6 : Variation de la masse de produit et teneur en eau (La Laurel).

D'après la **figure 6**, nous observons que la variation de poids de Laurel diminue au cours du temps, la masse est abaissée de 25g à 16g dans les deux premières heures et a atteint sa moitié à 11h : 10min puis elle a diminué jusqu'à arriver à une valeur constant.

Le produit a perdu du poids au bout de 4h jusqu'à stabilisation, l'indice de la fin de séchage.

✚ Le cas de la menthe:

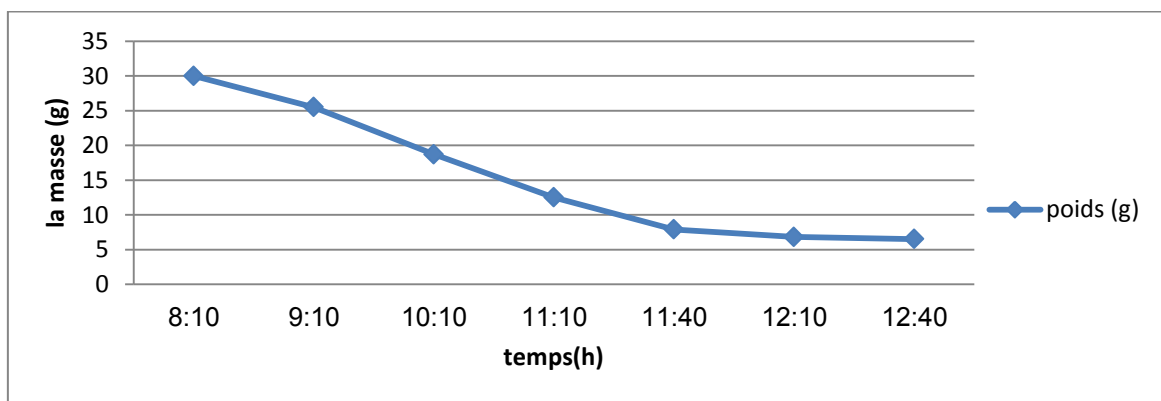


Figure V.7: Variation de la masse et teneur en eau (la menthe).

La figure V.7, représente la diminution du poids des feuilles de menthe au cours du temps. La perte de masse est considérable au début de séchage (la masse a passé de 30g à 18.7g dans les deux premières heures et a atteint sa moitié à 10h30min puis après, elle a diminué jusqu'à une valeur constante indiquant que le produit est bien séché.

D'après les remarques notées précédemment on peut confirmer que le produit sèche plus vite dans la première claie, ce qui est tout à fait normal. Puisqu'au fur et à mesure que l'air avance dans le séchoir, sa température diminue et son humidité augmente.

V.3.5 Les résultats expérimentaux :

➤ Conditions opératoire:

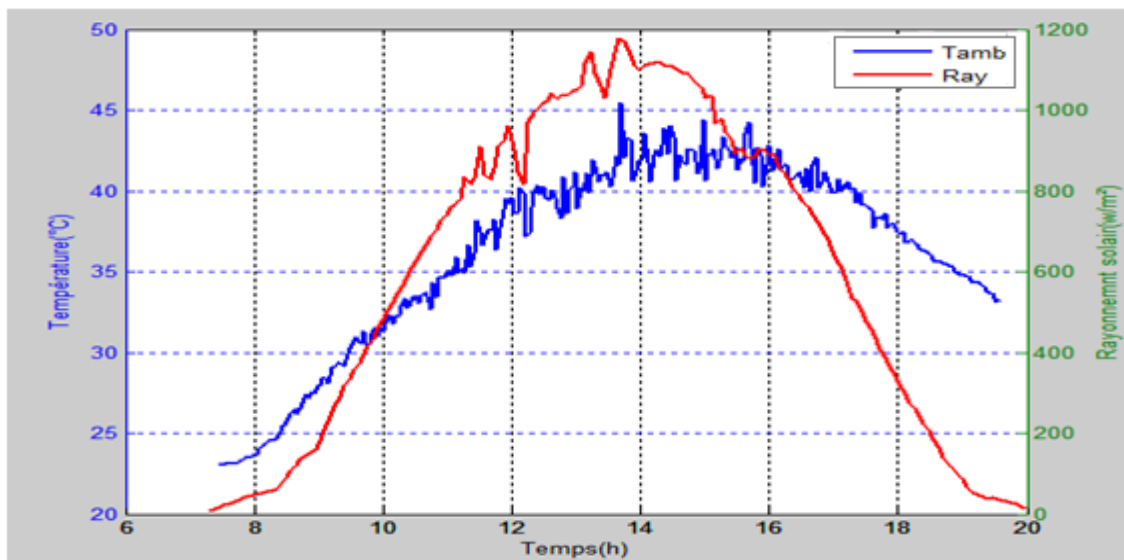


Figure V.8 : Variation de l'éclairement solaire et de la température ambiante **Le 24/06/2020**

Nous observons que le rayonnement solaire a fortement augmenté de 7h30min jusqu'à 13 h30min, il a dépassé les 1000W/m² entre 13h et 14h30min. Il est à noter que la température ambiante a atteint des valeurs importantes, plus de 40 °C.

En raison de passage partiels des nuages, il y a également des fluctuations aléatoires du rayonnement solaire.

➤ Evolution de la température de l'air dans la chambre du séchage:

Les figures montrent que la variation des températures de l'air à l'entrée, sortie de la chambre ont le même comportement que celui du rayonnement solaire, leurs maximales sont respectivement : 60°C à 65°C, 50°C à 54 °C dans l'intervalle du temps compris entre 13h et 14h30min.

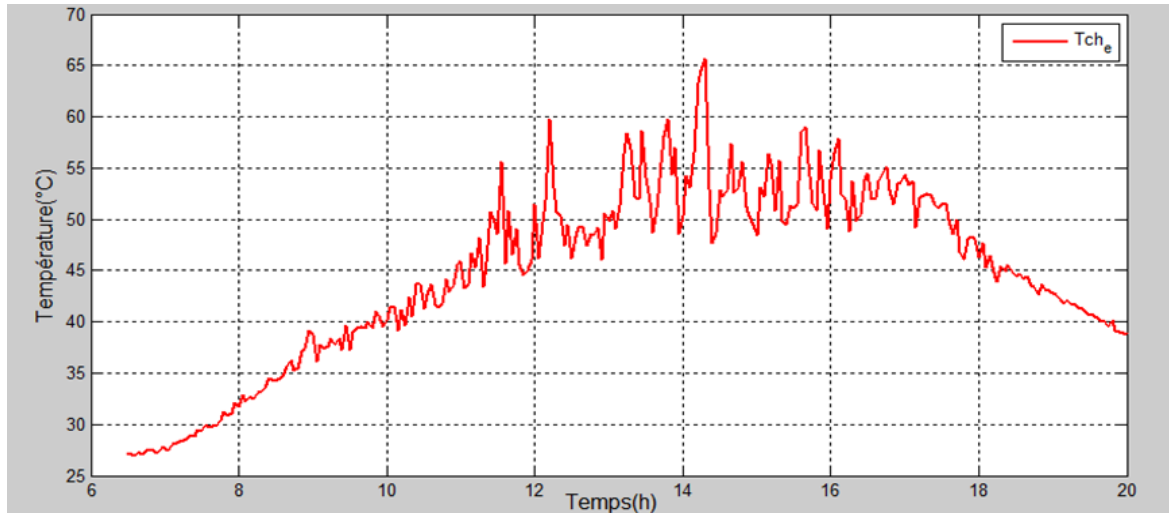


Figure V.9: Variation de la température à l'entrée de la chambre.

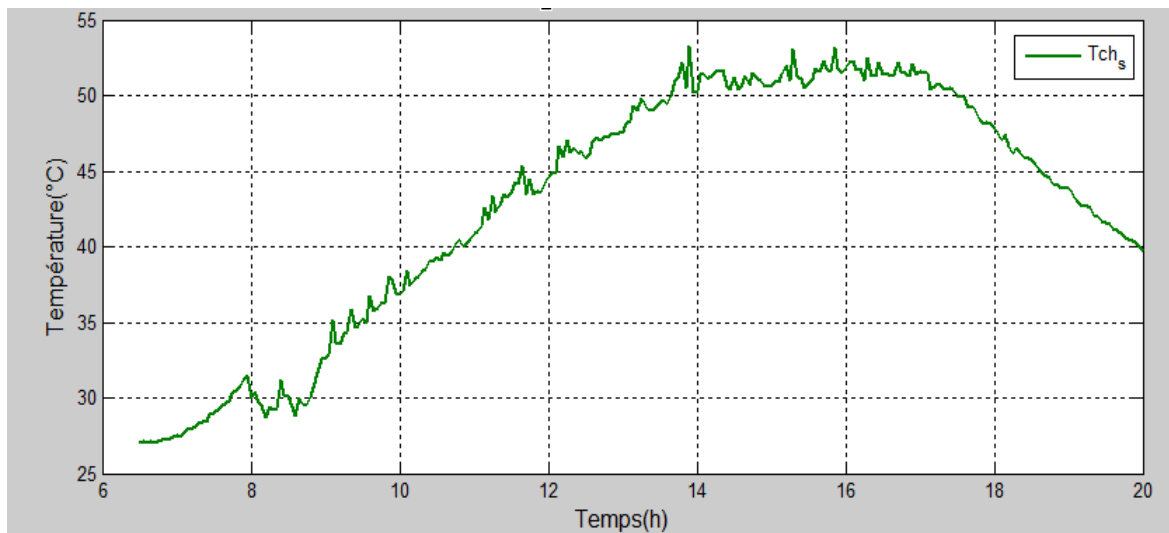


Figure V.10: Variation de la température à la sortie de la chambre.

Nous apercevons que les valeurs des températures de l'air à la sortie de la chambre est abaissées par rapport à celle d'entré car l'air asséchant pénètre les claies, il se charge en vapeur d'eau du produit et ainsi il perd sa température.

➤ **Evolution d'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre:**

Les valeurs expérimentales de l'humidité enregistrées durant la journée du test (la figure 11), montrent qu'au départ une valeur de 17 % à 6h30min puis elle s'est diminuée pour devenir minimale, 5% à 17h ensuite elle s'accroissait légèrement pour arriver à une valeur de 7% à 19 h.

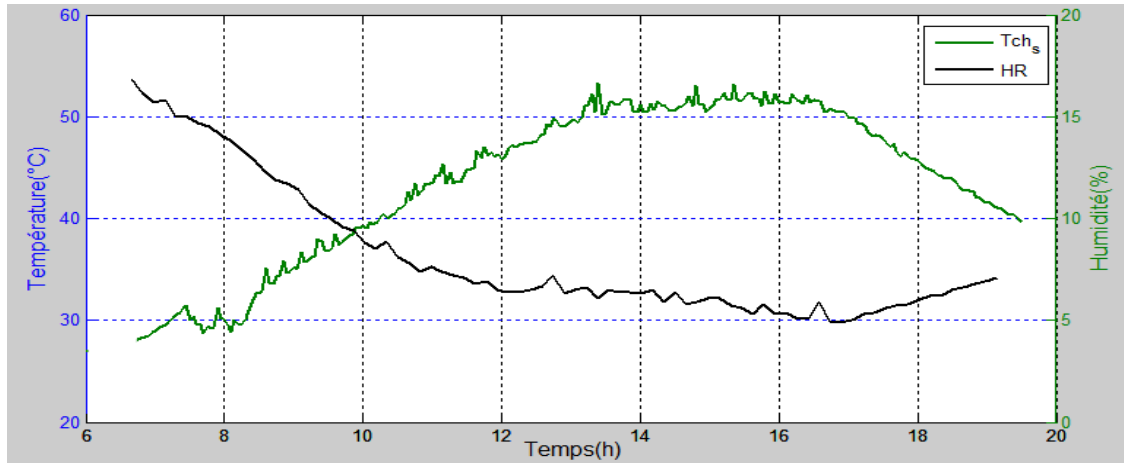


Figure V.11: Evolution temporelle de la température d'air asséchant et l'humidité relative à la sortie de la chambre.

V.3.6 Produit séché:

Après un temps nécessaire pour l'opération du séchage, nous avons obtenu des feuilles de menthe séchée avec un même arôme que celui de la menthe fraîche et une couleur foncée.



Figure V.12: La menthe avant et après le séchage.

Par observation de l'état finale du laurier après séchage on peut remarquer une belle apparence et un arôme naturel du laurier, la taille de leurs feuilles est réduite avec un petit changement de couleur par rapport à celle d'origine.



Figure V.13: Le laurier avant et après le séchage.

V.4 Cinétique de séchage des produits: *Cas de la pomme.*

Dans cette partie d'expérience nous avons ciblé l'influence de la position de la claie qui supporte la matière à sécher dans la chambre sur la durée de séchage.

V.4.1 Préparation de produit :

Les pommes mûres ont été choisies et lavées par l'eau du robinet, puis coupées en tranches fines d'épaisseur **0.5 cm**, elles sont trempées dans le jus de citron pour éviter qu'elles brunissent lors du séchage. En fin, elles ont été réparties sur les claies du séchage.



Figure V.14: Les étapes de préparation de la pomme.

V.4.2 Mode opératoire :

Après la préparation du produit (pomme), nous avons réparti les rondelles de la pomme d'une masse totale 300g sur les deux claies du séchoir c à d 150 g/claie, la perte de masse est suivie de le départ jusqu'à la fin de l'expérience (8 h:10 -15h :20).

Le produit est pesé chaque heure en utilisant la balance électronique. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

temps(h)	8:10	9:10	10:10	11:10	12:10	13:10	13:40	14:10	14:40	15:10	15:20
1 ^{er} claie	150 g	129 g	103 g	82g	60g	48g	39g	35g	33 g	32g	32g
2 ^{eme} claie	150 g	133g	113g	94g	77g	62g	54g	48g	43g	39g	37g

Tableau V.2: Evaluation de poids de produit

A prés séchage et refroidissement des tranches à température ambiante normale, elles sont sauvegardées dans des sacs en plastique.



Figure V.15 : L'emballage du produit.

V.4.3 Évolution de la masse humide pendant le séchage:

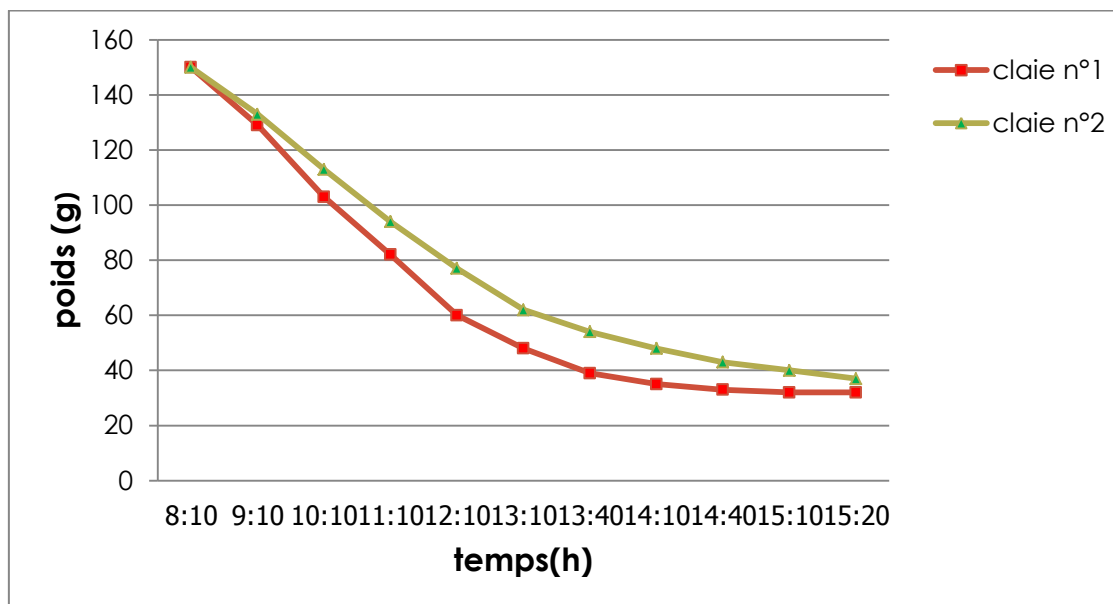


Figure V.16 : L'évolution de poids du produit durant l'opération de séchage.

La figure montre que les allures ont la même forme, nous remarquons clairement des écarts entre l'évolution des poids des deux claies.

Nous notons que :

Pour la première claie, le produit perd une grande quantité de sa masse et atteint 32 g après seulement 7 h de séchage, tandis que le produit disposé à la deuxième claie atteint la même valeur après 8h, ce qui nous permet de dire que le produit sèche plus vite dans la première claie, comparé au produit posé sur la deuxième ; ce qui est tout à fait normal. Puisqu'au fur et à mesure que l'air avance dans le séchoir, sa température diminue et son humidité augmente. Autrement dit, le produit humide cède son eau à l'air puisqu'il régit une pression partielle de vapeur d'eau plus faible dans l'air qu'à la surface du produit.

V.4.4 Les résultats expérimentaux :

➤ Conditions opératoire:

Durant la journée de séchage de la pomme (le 29/06/2020), La température de l'ambient a fortement augmenté de 7h30 min à midi, il a atteint des températures élevées de plus de 42°C pendant le temps [13 h-16h], puis elle diminue au coucher du soleil.

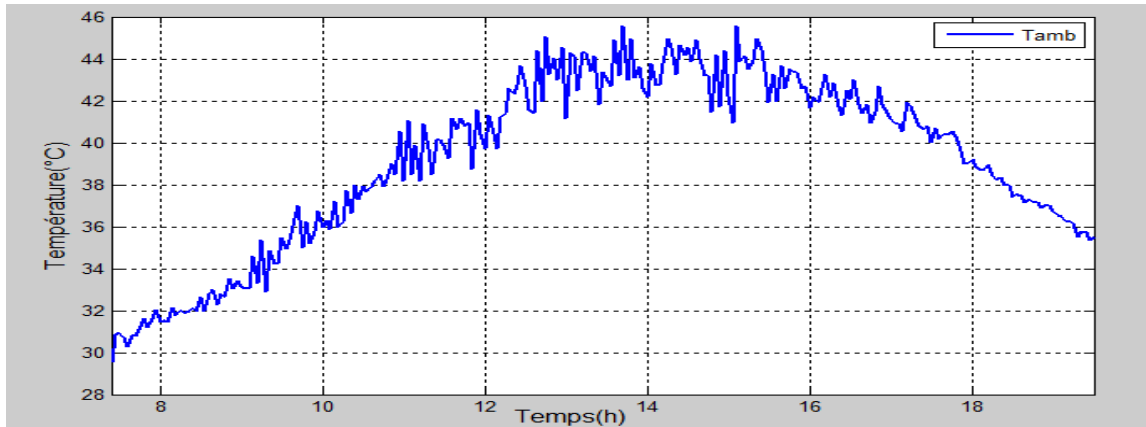


Figure V.17 : Variation température ambiante au cours du temps.

➤ Evolution de la température de l'air dans la chambre du séchage:

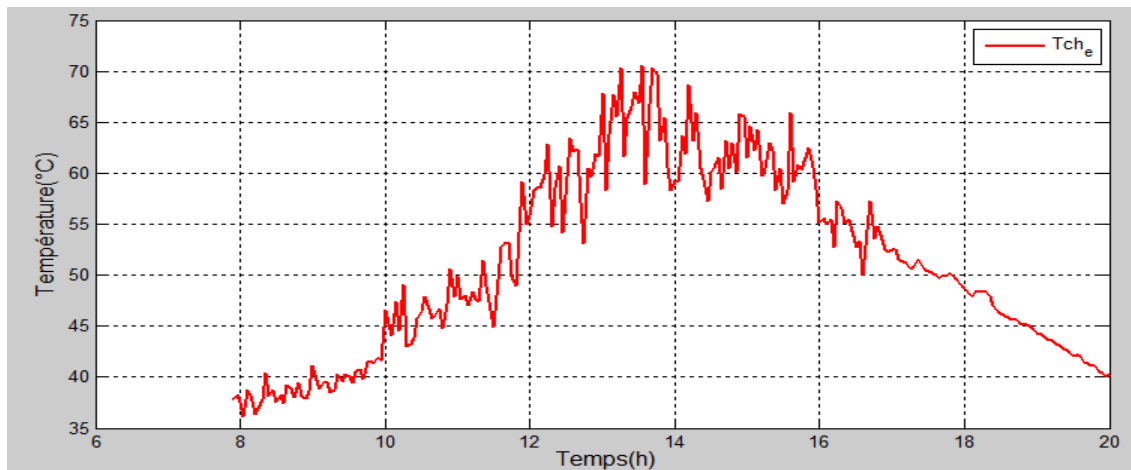


Figure V.18 : Variation temporelle de la température à l'entrée de la chambre

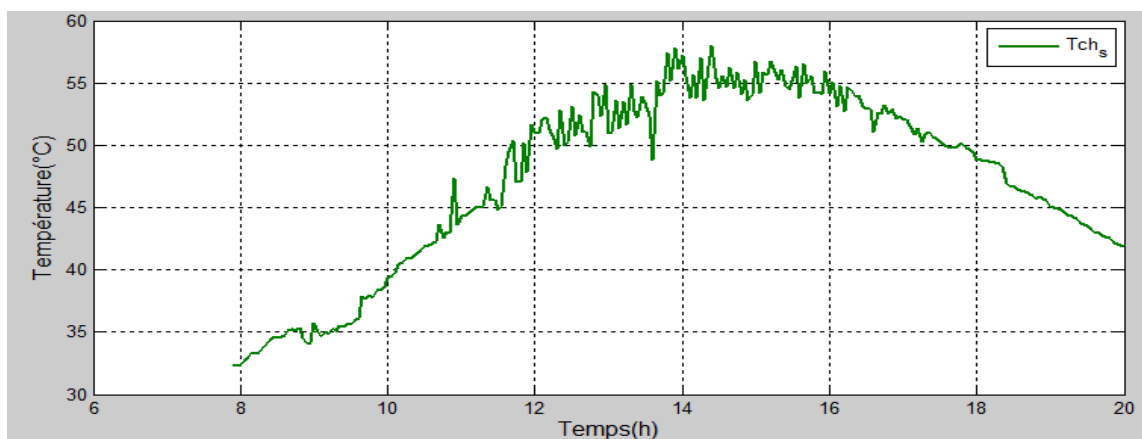


Figure V.19 : Variation temporelle de la température à la sortie de la chambre.

D'après la figure V.17 la température moyenne à l'entrée de la chambre est 53°C dans la Période de séchage (8 h: 10 à 15h 20min), cette température était suffisante pour séché les fruits.

V.4.5 Produit séché :

Le produit finale est des chips de la pomme, elles ont une couleur claire, un bon goût et une belle apparence ce qui reflète sa bonne qualité.



Figure V.20 : La pomme avant et après le séchage.

V.5 Cinétique de séchage des produits : *Cas feuilles verveine*

V.5.1 La verveine :

La verveine est un arbrisseau cultivé dans les jardins, communément appelé « Louisa ou tisane ». C'est dire combien la popularité de la verveine odorante est grande en Algérie. Cette plante ramifiée est caractérisée par un parfum très agréable rappelant l'odeur du citron, que ces feuilles et ses fleurs exhalent. On la surnomme parfois herbe de tous les maux, pour ses nombreuses vertus médicinales.



Figure V.21 : Feuilles de verveine

Parmi les utilisations de cette plante séchée c'est qu'elle agit pour raffermir la peau et unifier sa couleur, elle est aussi idéal pour des soins anti-âge grâce à ses composés antioxydant.

Elle est réputée (tisane) pour calmer les personnes stressées et anxieuses, aussi délicieuse en cuisine et infusion. [3]

V.5.2 Protocole expérimentale :

Les feuilles vertes de la verveine sont dégarnies des tiges après lavage, puis réparties uniformément sur la claie. Les échantillons préparés sont pesés avant de commencer l'expérience et à chaque demi-heure durant l'expérience afin de déterminer leur masse $M_{pr}(t)$.



Figure V.22 : Les claires chargées par les produits à l'intérieur de l'enceinte de séchage.

L'expérience de séchage est arrêtée lorsque la masse du produit devient constante.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Temps(h)	9 :00	9 :30	10 :00	10 :30	11 :00	11 :30	12 :00
$M_{pr}(g)$	35	27	22	17	12	10	10

TableauV.3: Variation du poids de verveine mesurés au cours du séchage.

V.5.3 Évolution de la masse humide pendant le séchage:

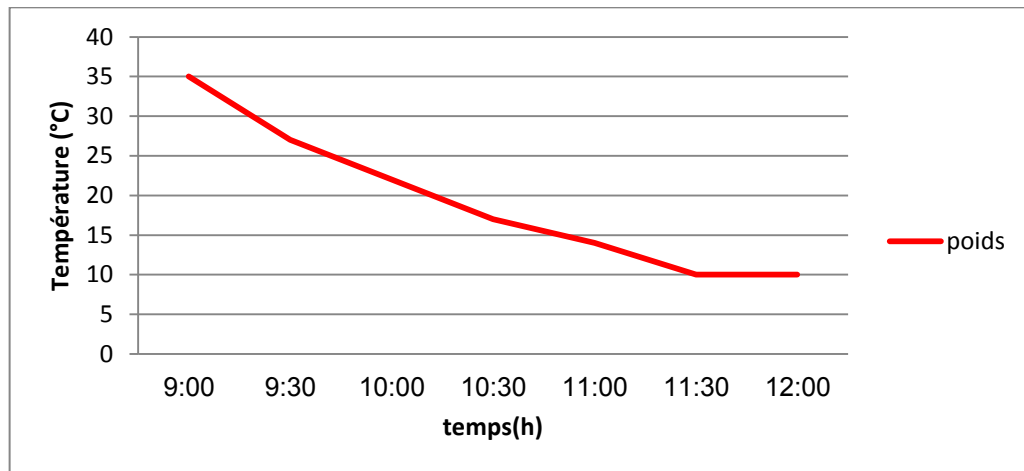


Figure V.23 : représente la diminution du poids des feuilles de verveine en fonction de temps.

D'après la figure qui montre le poids du produit est diminué au cours de temps, nous avons remarqué que le produit a perdu sa masse après 2h30min, elle passe de 35 g jusqu'à atteindre une masse stable environ 10 g à 11h30min.

V.5.4 Produit séché:

Après 2 h30 min, nous avons obtenu des feuilles de Luisa séché ont le même arôme que les feuilles fraîches; il y'a un peu changement leurs couleur avec la taille des feuilles réduit.



Figure V.24 : photo les feuilles verveine avant et après le séchage.

V.6 La journée 14/08/2020 : séchage la banane

Nous avons fait le séchage à la maison pour comparé l'épaisseur de échantillon de banane et estimer la qualité final du produit.

V.6.1 Les ingrédients :

-Bananes.

-Jus de citron.

V.6.2 Les étapes de préparation :



1) Lavage



2) Epluchage



Couper 1cm



3) Couper en rondelle



4) Trempez les morceaux dans jus citrons



6) Répartie les rondelles sur les claies

7) Mise en place les claies dans le séchoir

Figure V.25 : les étapes de séchage.

Note : Le processeur du séchage démarre à 8h 30 min du matin.



Figure V.26 : Fonctionnement séchoir solaire.

V.6.3 Produit séchée :

À 13 h les fruits sont peu humides au toucher.

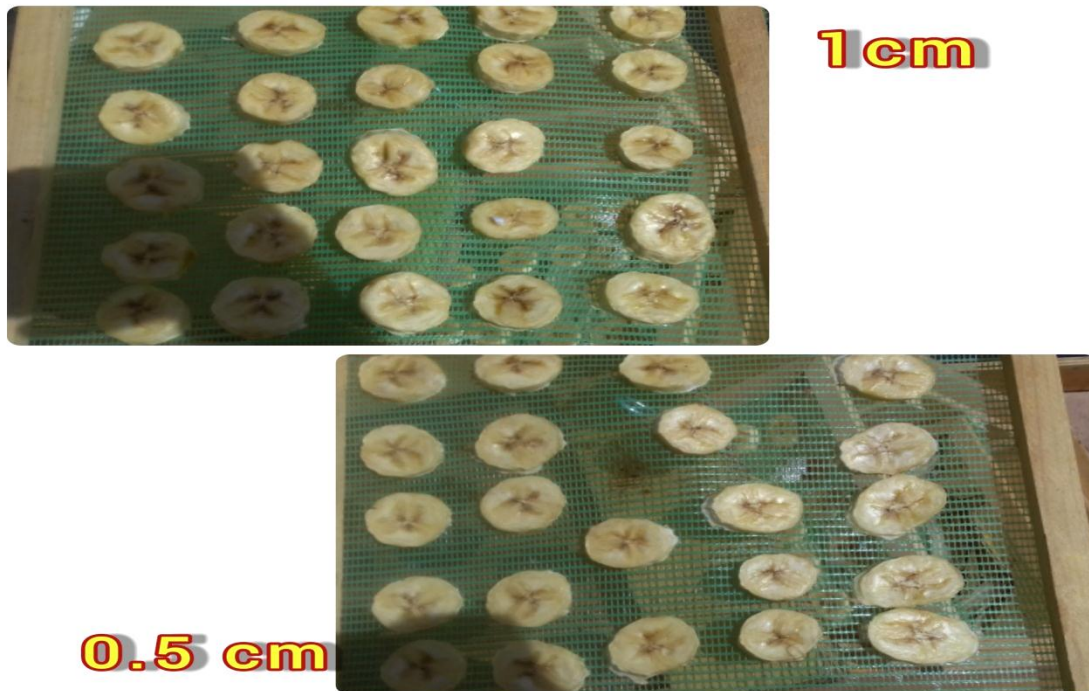


Figure V.27 : Etat du produit après le séchage à 14 h.

À 17 h, les tranches de banane sont sèches au toucher, elles ont une couleur jaune sombre.

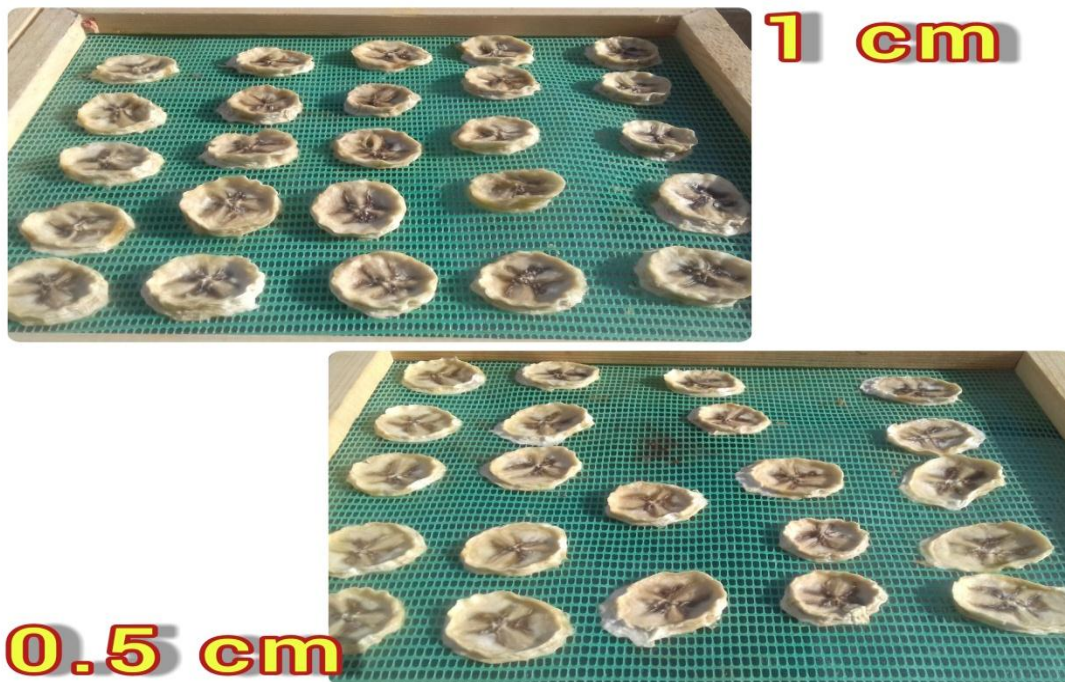


Figure V.28 : Etat du produit à 17 h.



Figure V.29 : L'aspect final des rondelles de banane séchée (épaisseur=1 cm).



Figure V.30 :L'aspect final des rondelles de banane séchée (épaisseur=0.5cm).

À 19 h, le résultat final : des tranches de banane séchée avec une couleur dorée.

V.7 Conclusion:

Cette partie du travail est consacré au séchage de différent produit agroalimentaire. Le but essentiel dans cette étude expérimentale est de suivre l'évolution de la perte de masse des produits séchés et estimé la qualité finale du produit (couleur, odeur et apparence).

Les résultats obtenus par notre séchoir solaire à convection naturelle apparaissent nettement satisfaisante et encourageante et ils sont récapitulés comme suit :

- ✚ Les plantes sont très fragile et se sèches à température moyenne de 42 °C en durée de 4 h et 30 min pour les feuilles de menthe et 3h et 30 min pour le laurier.
- ✚ Une duré de 8h et une température moyenne de 53°C, étaient suffisantes pour sécher les tranches de la pomme d'épaisseur de 0.5 cm.
- ✚ Les feuilles de verveine sont séchées à court temps en gardant une belle couleur et un arôme naturel.
- ✚ Les chips de banane d'épaisseur 0.5 cm ont un plus beau aspect comparons à la banane (d'épaisseur 1 cm) car elles ont conservées la forme et la couleur dorée.

Par le biais des expériences nous avons conclu que l'air préchauffé au niveau du capteur solaire traverse les claies ou le produit est déposé, il y a création d'un gradient de température et de pression entre le produit humide et l'air asséchant ce qui engendre un échange couplée de chaleur et de masse. En effet, le produit perd sa masse au cours du temps.

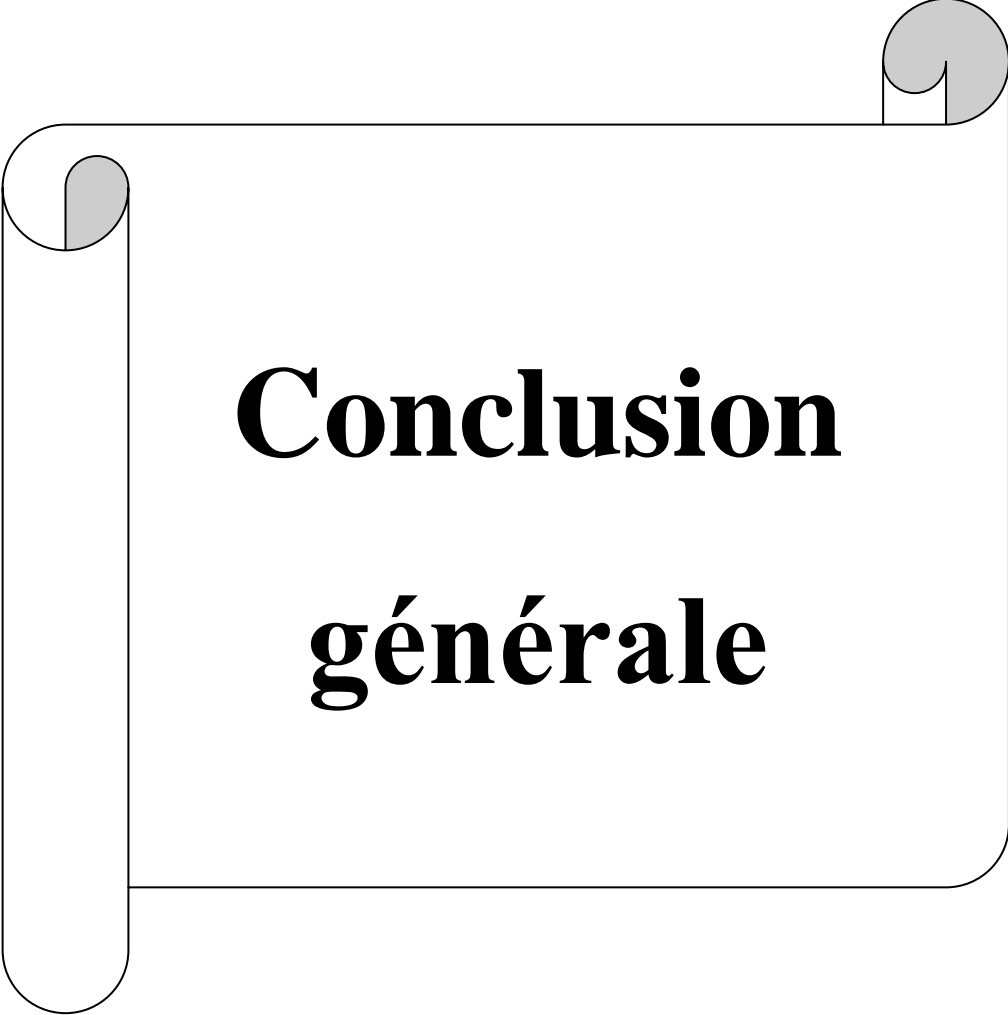
Les résultats illustrent bien que les rondelles de la pomme qui se trouve dans la première claie sèche plus rapidement que celle répartie au niveau de la claie suivante. Car l'air chaud pénètre les claies, il cède de la chaleur aux fruits existant dans la première claie et il se charge en vapeur d'eau qui se dégage par le produit, alors que la deuxième claie reçoive moins de chaleur et un air plus humide, ce qui affecte leur temps de séchage.

Références:

[1]<https://www.doctissimo.fr/html/sante/phytotherapie/plantemedicinale/laurier.htm#composition-du-laurier>

[2]https://www.google.fr/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.jeanwilmotte.it%2F2012%2F05%2F07%2Fun-produit-local-les-feuilles-de-laurier%2F&psig=AOvVaw2M3Cm52NmJNW_b-7mvQTXb&ust=1600901628753000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCLDC18bt_esCFQAAAAAdAAAAABAJ

[3]<https://www.rustica.fr/fleurs/recolter-conserver-verveine,5884.html>



Conclusion
générale

Conclusion générale

Parmi toutes les méthodes de conservation des aliments, le séchage reste une opération très avantageuse en raison de la durée de conservation longue, de la facilité de stockage à température ambiante et de la réduction de masse (transport).

En effet, notre travail a consisté à l'étude théorique et expérimentale du séchage solaire de quelques produits agroalimentaires (fruits et plantes) par convection naturelle dans un séchoir solaire portatif indirect fonctionnant en régime transitoire sous un climat saharien, construit dans la région d'Adrar-Algérie, en utilisant des matériaux localement disponibles. L'aspect portatif (portable) offre l'avantage de pouvoir déplacer le séchoir d'un point de récolte à un autre afin d'éviter la dégradation des produits frais due à la chaleur lors des transports.

Notre contribution consiste à fournir une nouvelle approche de modélisation destinée à l'évaluation des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air à simple vitrage (le dit capteur équipant le séchoir solaire portatif conçu), et de mener un travail expérimental pour discuter certains indices de performance thermique. Un modèle thermique transitoire, basé sur les bilans thermiques des différents composants a été développé. En outre, la méthode nodale thermique a été utilisée pour appréhender le comportement thermique de ces composants soumis à des sollicitations diverses. Le système d'équations différentielles qui régissent les bilans thermiques a été résolu en utilisant la méthode des différences finies.

Nous avons aussi modélisé le flux solaire en vue de différentes applications possibles. En appliquant les résultats de modélisation du flux solaire au capteur plan, nous avons pu l'optimiser. Les résultats de l'optimisation nous ont permis de valider l'utilisation du capteur plan. En effet, nous avons ainsi obtenu une température de sortie du capteur élevée qui représente également la température à l'entrée de l'enceinte de séchage. Cette température de sortie permet donc de sécher plus facilement les produits agro-alimentaires.

Dans la suite de notre travail, nous nous sommes penchés sur l'influence de certains paramètres sur la cinétique du séchage, ce qui nous a permis de conclure que la température de l'air asséchant représente le paramètre le plus important agissant sur la cinétique du séchage ainsi que la variation de l'épaisseur des tranches du produit agroalimentaires à sécher. Sachant que, notre objectif principal pendant l'expérience a été de réduire le temps de séchage tout en enlevant au maximum l'eau libre du produit qui est en partie responsable de la dégradation des produits frais après la récolte. Cette réduction du taux d'humidité permet donc

de conserver les produits séchés le plus longtemps possible afin de répondre aux problèmes de conservation des produits alimentaires et de leur disponibilité en toute saison.

Nous avons respecté toutes les recommandations des premières études réalisées en mode de séchage par convection naturelle qu'ont montré que la nature du produit est importante en raison du taux d'humidité initiale de ce produit et qu'il faut sécher sur trois claies préférentiellement et que plus la masse du produit à sécher est importante plus le temps de séchage sera long quelque soit la nature de ce produit.

Nous n'avons pas pu étudier tout les paramètres qui influent sur l'efficacité du séchoir, pour cela, il serait souhaitable d'envisager la poursuite des travaux sur un séchoir de plus grande taille, voire de taille industrielle et sécher d'autres produits locaux tels que l'henné.







Annexes

Annexe A: Les propriétés thermo-physiques

A.1) propriété des éléments du capteur solaire à air:

Les caractéristiques techniques (thermo-physique) du capteur à air sont illustrées dans le tableau suivant :

Désignation	Symbole	Nature et ordre de grandeur	Unité	Eléments du capteur
Couverture épaisseur : transmissivité Absorptivité émissivité conductivité chaleur spécifique	e_p τ_v α_v ε_v λ_v C_{pv}	Verre ordinaire 0.003 0.84 0.06 0.93 0.78 840	m w/m.°C J/kg. k	
Absorbeur épaisseur : Absorptivité : Emissivité : conductivité chaleur spécifique	ep_v α_{abs} ε_{abs} λ_{abs} C_{pv}	Acier galvanisé 0.001 0.95 0.25 180 52	m w/m.k J/kg. k	
Isolant -épaisseur : Conductivité chaleur spécifique	ep_i λ_i C_{pi}	Polystyrène 0.02 0.045 1300	m w/m.°c J/kg.k	
Boitier -nature : -épaisseur : Dimension		Bois 0.15	m	


Lame d'air		5.5	cm	
-------------------	--	-----	----	--

Tableau A. 1: caractéristique technique de capteur solaire à air

A.2) caractéristiques techniques de la chambre de séchage :

Les caractéristiques techniques de la chambre de séchage sont illustrées dans le tableau suivant :



désignation	unité	Nature et dimensions	Photo chambre
Chambre -nature : -épaisseur : -dimension		Bois 1.5	
Claies -nature : -épaisseur : -dimension :	Cm cm	Cadre en bois 1.5 26*24	

Tableau A. 2: présente les données techniques de la chambre de séchage.

Annexe B: Analyse économique

Les matériels	Dimension (m)			Prix(DA)
	Longueur	Largeur	Epaisseur	
plaque de bois	2	1	0.15	3900
Vitres ordinaire (x2)	62	28.5	0.003	500
	51	29		
Tôle acier galvanisé (x2)	57	28.5	0.001	600
	51	29		
Plaque polystyrène (x2)	57	27	0.02
	49	27		
Colle silicone transparente	-----	-----	-----	300
Colle AB	-----	-----	-----	250
Pinceau	-----	-----	-----	140
Vernis	-----	-----	-----	300
Huile de bois	-----	-----	-----	60
Pigment noir	-----	-----	-----	120
Appareil de silicone	-----	-----	-----	250
Des vis	-----	-----	-----	50
Main d'œuvre				2000
Prix totale :				8470 DA

Tableau B. 1: la fiche technique du séchoir solaire.

Comment fabriqué soi-même de la peinture naturelle à la farine ?**Les ingrédients:**

70 cl eau, 70 g de farine de blé, 200g pigments ,10 cl d'huile de lin, 1 cl savon noire.

Les étapes de préparation:

1-faites chauffer 20 cl d'eau en ajoutant progressivement la farine jusqu'à ce que le mélange épaisse.

2-ajoutez le reste de l'eau, puis faites bouillir 10 min tout en remuant pour obtenir un mélange bien lisse

3-ajoutez les pigments. Incorporez l'huile de lin et chauffe encore à feu doux pendant 15 min.

4-ajoutez en fin le savon noir liquide pour finir de lier la préparation

5- laissez refroidir avant utilisation.

Annexe C: Séchage des produits (travaux antérieurs)

Mode de séchage	Le produit à sécher	Tempe de séchage (°C)	Le temps de séchage (h)	référence
Séchage solaire indirecte en convection naturelle Algérie	200 g de Menthe	30 °C à 80 °C	30 h	MIRI, R., et al. Étude expérimentale d'un séchoir solaire. Revue des Énergies Renouvelables, 2002, 41-48.
	300g de laurier		28 h	
	300g de verveine		30 h	
Séchoir solaire indirect muni d'un appoint électrique en convection forcé	33.5 g de menthe	50 °C	5 h	BENAOUDA.N., et al. Conception, réalisation et expérimentation d'un séchoir à chauffage partiellement solaire fonctionnant en convection forcée
Séchoir solaire indirecte modulaire(C.D.E.R)	Feuille de menthe	Entre 30°C et 50°C	5h	BENAOUDA, Nour-Eddine. Développement de séchoirs solaires pour plantes aromatiques et médicinales (PAM).
	Feuille de laurier		3h	
séchoir solaire indirect à convection forcée	100g de Feuille menthe	Pour T=45°C Pour T=50°C ($D_v=200m^3/h$)	375min 270min	B., TOUATI. étude théorique et expérimentale du séchage du solaire des feuilles de la menthe vert (Mentha viridis), thèse doctorat, université de Tlemcen et INSA de Lyon, 2008.

Mode de séchage	Le produit à sécher	Température de séchage (°C)	Le temps de séchage (h)	référence
Séchoir indirect par convection forcé	150 g de feuille Laurel	Entre 44°C et 58°C.	3 h	mémoire MESAI A et TEMACINI B
	250 g de menthe	41°C et 58°C	90 min	
Séchoir solaire indirect convection naturel	La Banane La pomme	42 °C		www.Kit séchoir solaire.com

Tableau C. 1: séchage les produits par les chercheurs antérieur

Les étapes de montage du séchoir solaire :





Les étapes de séchage solaire :

- 1) Exposé le séchoir au soleil.
- 2) Préparez les produits.
- 3) Mise en place des claies chargées par le produit dans la chambre du séchage.
- 4) Après un temps, le produit est séché.
- 5) L'emballage du produit (sac ou boîte).



Finalement



Les produits séchés :

Banane



Pomme



Laurier



Luisa





Figure : les produits après emballage