

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



**Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en physique énergétique et énergie renouvelable**

Préparé par

M^{lle} HARMA Warda

Thème

**L'étude d'un capteur solaire thermique à air
(Théorique & expérimentale)**

Devant le jury:

Président : Mr. Boussoukaia Taher

Encadré par : Mme. Rabéa KAOUALAL épouse BOUSSEM

Examineur : Mr. Boumedien Omari

Année universitaire 2019/2020

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il m'a donné pour achever ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements et le plus grand respect à mon encadreur Mme Rabéa. KAOULAL, je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance de m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses suggestions pertinentes et sa constante disponibilité tout le long du travail.

Je remercie vivement Mr Boussoukaia, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Mes vifs remerciements vont également à Mr Omari, d'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer, pour l'intérêt qu'il a porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par ses propositions.

Mes sincères remerciements à tous les chercheurs et les travailleurs de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar. Une attention particulière à Mr. SAADI Zine ; Mr. Mohamed Mediani; Tigani cherif et à tous les enseignants de Domaine des Sciences de la Matière.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.



Dédicaces

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :
A l'âme de mon cher défunt père qui nous a quitté trop
tôt. Qu'il repose en paix
À ma très chère mère, qui m'a encouragé tout le parcours
et qui m'a donné tous on amour pour reprendre mes
études
A mes frères, mes sœurs ainsi que tous les membres de ma
famille
À mes très chères amis Hadjer et Abdelwahab
Je prie dieu « Allah » de leurs accorder longue vie et
bonne santé.

Résumé

La croissance de la demande énergétique mondiale a largement stimulé les progrès scientifiques et les techniques dans le domaine des énergies renouvelables. Notre étude porte 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. On calcule le rendement pour tester les performances de ce séchoir solaire.

Mots clés : capteur solaire, performances énergétiques, séchage, modélisation.

المخلص

إن تزايد الطلب العالمي على الطاقة يحفز إلى حد كبير التقدم العلمي والتكنولوجي في مجال الطاقات المتجددة. تتعلق دراستنا أساساً على أحد تخصصات الطاقة الشمسية المهمة بالتحويل المباشر من الطاقة الشمسية إلى الطاقة الحرارية الذي يدعم تكنولوجيا الاستشعار بالهواء. يتم احتساب مردودية لاختبار أداء المجفف.

الكلمات المفتاحية: لاقط شمسي، أداء طاقي، تجفيف، النمذجة.

Table des matières

Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	xii
Nomenclature	xiii
Introduction générale	1

Chapitre I:

Généralités sur le séchage

I.1 Introduction	4
I.2-Définition	4
I.3- Historique	5
I.4- But de séchage.....	5
I.5 Principe de séchage	6
I.6- Modes de séchage.....	7
I.6.1 Séchage mécanique.....	7
I.6.2- Séchage chimique.....	7
I.6.3- Séchage thermique	8
I.6.3.1 Séchage par ébullition	8
I.6.3.2- Séchage par entraînement.....	8
I.7 Caractéristiques de l'air de séchage.....	9
I.7.1 Humidité	9
I.7.1.1 Humidité absolue.....	9
I.7.1.2 Humidité relative	9
I.7.2 Température.....	9
I.7.2.1 Température sèche.....	9
I.7.2.2 Température humide du gaz	9
I.7.3- Vitesse	10
I.8 Différents modes de séchage	10
I.8.1- Séchage par conduction.....	10
I.8.2-Séchage par convection (ou par entrainement)	11
I.8.3- Séchage par rayonnement.....	11
I.8.4- Séchage par micro-ondes	11

I.8.5- La lyophilisation.....	11
I.8.6- Séchage solaire.....	11
I.8.6.1-Séchage à l'air libre ou (Le séchage traditionnel).....	12
I.8.6.2 Séchoir solaire.....	12
I.9 Types de séchoirs solaires.....	12
I.9.1-Les séchoirs solaires directs.....	13
I.9.2 Les séchoirs solaires indirects.....	14
I.9.3 Les séchoirs mixtes.....	15
I.9.4 Les séchoirs hybrides.....	16
I.10 Conclusion.....	17
I.11-Références bibliographiques.....	17

Chapitre II

Synthèse bibliographique Capteur plan à air

II.1-Introduction.....	21
II.2- Principe d'un capteur solaire plan.....	21
II.3-Les différents composants d'un capteur solaire plan.....	22
II.3.1-Couverture transparente.....	22
II.3.2 Absorbeur.....	23
II.3.3 Isolation arrière.....	24
II.3.4 Coffre (le boîtier).....	25
II.4 Différents types des capteurs solaires plans à air.....	25
II.4.1 Capteurs à absorbeur plan.....	25
II.4.2 Capteurs à absorbeur perméable.....	26
II.4.3 Capteurs à absorbeur à géométrie variable.....	27
II.5 Résultats obtenus par certains chercheurs.....	27
II.5.1 Amélioration des performances des capteurs solaires plans à air.....	27
II.5.2- Minimisation des pertes thermiques.....	29
II.5.3- Influence de la configuration de l'absorbeur sur les performances.....	30
II.5.4- Influence des rugosités artificielles sur les performances.....	32
II.5.5- Capteur à rugosité artificielle.....	35
II.6-Conclusion.....	36
II.7-Références bibliographiques.....	36

Chapitre III

Notions et concepts sur la modélisation d'un capteur solaire thermique à air

III.1-Introduction	38
III.2-Principe	38
III.3-Hypothèses simplification	39
III.4 -Bilan thermique global de la paroi absorbante	39
III.5 Expressions analytiques du bilan énergétique	42
III.5.1-Pour la couche du verre (indice v)	43
III.5.3 Au niveau de l'absorbeur (indice abs)	45
III.5.4- Au niveau de l'isolant (indice isol).....	45
III.5.5 Système d'équations globales	46
III.6-Expressions des coefficients de transfert.....	47
III.6.1-Échange thermique par rayonnement	47
III.6.2 Echanges thermiques par convection.....	48
III.6.3 Échange thermique par conduction.....	48
III.7 Calcul des pertes thermiques	49
III.8-Modélisation des coefficients d'échanges thermiques	50
II.11-Références bibliographiques	51

Chapitre IV

Résultats expérimentaux et interprétation

IV.1-Introduction	53
IV.2 Conception et réalisation d'un séchoir solaire à convection forcée	53
IV.2.1 Description De l'unité pilote pour le séchage solaire	53
IV.2.2 Etapes suivies dans la construction du séchoir	54
IV.2.2.1 Le capteur plan à air	54
IV.2.2.2 Armoire de Séchage.....	55
IV.2.2.3 Le ventilateur	58
IV.3 Étude Expérimentale.....	60
IV.3.1 Paramètres mesures et instruments de mesures	60
IV.3.2 Résultats Obtenus.	62
IV.3.2.1 Variation temporelles des températures de la vitre (À l'intérieur et à l'extérieur).....	62
IV.3.2.2-Variation temporelles de température de la plaque absorbant.	63
IV.3.2.3-Variation temporelles des températures entrées et sortie du capteur	63
IV.3.2.4-Variation temporelles des températures entrées et sortie de la chambre.....	64

IV.3.2.5 Variation temporelles de température ambiante	65
IV.3.2.6 Variation temporelles des températures des différentes parties de séchoir solaire	65
IV.4 Préparation des produits à sécher	66
IV.4.1-plantes à feuilles	68
IV.4.1.1-Séchage de la menthe	68
IV.4.1.2 Séchage de Le henné	70
IV.4.2 Sécher les fruits.....	73
IV.4.2.1-Séchage de la pomme	73
IV.4.2.2-Séchage de La banane	74
IV.5 CONCLUSION.....	76
IV.6-Références bibliographiques	77
Conclusion générale et perspective.....	79
Annexe	81

Liste des figures

Figure I.1 : Les étapes de séchage solaire naturel de tomate.....	5
Figure I.2: Séchage solaire	6
Figure I.3 : Présentation schématique d'un produit humide.....	6
Figure I.4 : Séchoir naturel des tomates à l'air libre	12
Figure I.5: (a) Séchoirs solaires directs simples, (b) principe d'un séchoir solaire direct.....	13
Figure I.6: (a) Séchoirs solaires indirect ;(b) principe d'un séchoir solaire indirect.	14
Figure I.7: (a) Séchoir solaire mixte;(b) principe d'un séchoir solaire mixte	15
Figure I.8: Séchoir solaire hybride.	16
Figure II.1 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan.....	21
Figure II.2: Schéma de principe du capteur à air.....	22
Figure II.3 : Les types génériques principaux d'écoulements.....	26
Figure II.4 : Capteurs à absorbeur perméable.....	26
Figure II.5 : différents types d'absorbeur	27
Figure II.6: Disposition des obstacles DCL.....	28
Figure II.7: Disposition des obstacles OCL.....	28
Figure II.8: Capteur muni d'obstacles TL	29
Figure II.9: Conception des capteurs à aérogel de silice	29
Figure II.10: Photo des différents types de capteurs solaires à air	31
Figure II.11: Représentation des trois types de capteurs solaires à air considérés.....	32
Figure II.12: Schéma du capteur plan à air muni de rugosités	32
Figure II.13: Différents dispositions des rugosités cylindriques	33

Figure II.14 : Schéma du Dispositif expérimental.....	34
Figure II.15: Schéma descriptif des chicanes	34
Figure II.16: Schéma du modèle expérimental	35
Figure III.1: Capteur solaire plan à air	38
Figure III.2: Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire.....	39
Figure III.3: Schéma de fonctionnement d'un capteur plan explicitant les divers flux énergétiques	43
Figure III.4: Bilan énergétique au niveau de la vitre.....	43
Figure III.5: Bilan énergétique au niveau du fluide caloporteur	45
Figure III.6: Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante	45
Figure III.7: Bilan énergétique au niveau de l'isolant.....	46
Figure III.8 : Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air	50
Figure IV.1 : Schéma synoptique du séchoir solaire	54
Figure IV.2 : Couverture du capteur solaire	55
Figure IV.3 : Plaque absorbante	55
Figure IV.4 : Chambre de séchage.....	56
Figure IV.5 : Claie de séchage.....	57
Figure IV.6 : La Porte de la chambre	57
Figure IV.7 : Le ventilateur utilisé dans capteur solaire.....	58
Figure IV.8 : Montage le capteur avec le séchoir solaire	59
Figure IV.9 : Ventilateur.....	59

Figure IV.10: L'acquisition de données utilisée pour la lecture et le stockage des paramètres mesurés	60
Figure IV.11 : emplacement des thermocouples dans le Séchoir solaire	61
Figure IV.12: La variation temporelle des températures de <i>la vitre</i>	62
Figure IV.13 : Variation temporelles de température de la plaque absorbant.	63
Figure IV.14 : Evolution temporelle des températures entrée et sortie du capteur	64
Figure IV.15 : Evolution temporelle des températures entrée et sortie du chambre	64
Figure IV.16 : Variation temporelles de température l'air ambiante	65
Figure IV.17 : Evolution temporelle des températures des différentes parties du séchoir	66
Figure IV.18 : Représente de la Chambre de séchage	67
Figure.19 : Balance électronique à affichage numérique.	67
Figure IV.20 : Nettoyer des échantillons (la menthe)	68
Figure IV.21 : Photo emplacement des claies dans le séchoir.....	69
Figure IV.22: Evolution de la masse la menthe durant séchage.....	69
Figure IV.23 : Représente de Le henné	70
Figure IV.24 : Opération de pesage des échantillons du henné.....	71
Figure IV.25 : Photo emplacement des claies dans le séchoir.....	71
Figure IV.26 : Evolution de la masse Le henné durant séchage.....	72
Figure IV.27 : l'Appareil à emballer sous vide	72
Figure IV.28 : Opération l'Emballage les produits (la menthe et Le henné).....	73
Figure 29 : Les produits secs emballée en sachet plastique.....	73
Figure IV.30: Opération de pesage des échantillons du pomme	74

Figure IV.31: Séchage par séchoir solaire.....	74
Figure IV.32: Evolution de la masse la pomme et la banane durant séchage	75
Figure IV.33: Conservation des fruits séchés	76

Liste des tableaux

Tableau I.1: Quelques exemples des méthodes de séchage.....	7
Tableau II.1: Quelques caractéristiques optiques des verres.....	23
Tableau II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.	24
Tableau II.3 Revêtements des surfaces d'absorbeur	24
Tableau II.4 Quelques propriétés des isolants.....	25
Tableau IV.1: Caractéristique du site d'URER-MS (Route du Reggane, Adrar).....	60

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unité
H_a	Humidité absolue	kg_{eau}/kg_{airsec}
M_a	Masse du gaz	Kg
M_e	Masse humide du produit	Kg
H_r	Humidité relative de l'air	%
p_v	Pression partielle de la vapeur dans le mélange.	Pascal
p_s	pression de saturation	Pascal
m_v	flux massique de vapeur	
m_s	masse du solide sec	Kg
A	Surface à travers laquelle se produit l'évaporation	s^2
η	Rendement instantané	-
ε	Coefficient d'émissivité	-
L	longueur du Capteur	M
Q_u	Flux utile transmis au fluide caloporteur.	W/m^2
Q_p	Flux perdu Vers le milieu extérieur	W/m^2
Q_{abs}	Flux solaire absorbé	W/m^2
Q_{st}	Flux stocké dans le capteur.	W/m^2
u_f	Viscosité dynamique du fluide	Kg/m. s
M_i	Masse d'un corps d'indice i	Kg
T_i	Température d'un corps d'indice i	°C

C_p	Capacité calorifique massique du fluide	J/Kg. K
t	Temps	S
α_{ps}	Coefficient d'absorption	-
G	Eclairement solaire incident sur le capteur	W. m ⁻²
τ_{cs}	Coefficient de transmission	-
S_i	Surface d'un corps d'indice i	m ²
\dot{m}	Débit massique	kg/s
ρ	Masse volumique du fluide	Kg/m ³
C_p	Chaleur massique de l'air	J/Kg.K
hr	Coefficient d'échange thermique par rayonnement	W/ m ² .k
hc	Coefficient d'échange thermique par convection	
V_{vent}	La vitesse du vent.	m/s
σ	Constante de STEFAN-BOLTZMANN.	W/m ² . k ⁴
k_v	Conductivité thermique du verre	w.m ⁻² .°C ⁻¹
e_i	Epaisseur d'un corps	M
β	Inclinaison du capteur	°
$1/hr$	Résistance thermique par rayonnement du capteur	Ω
$1/hc$	Résistance thermique par convection du capteur	Ω
U_i	Résistance thermique par conduction du capteur	Ω
Nu	Nombre de Nusselt	-
Pr	Nombre de Prandtl	-

<i>Gr</i>	Nombre de Grashof	-
<i>Ra</i>	Nombre de Reynolds	-

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et est disponible presque universellement et le plus souvent parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, la source de presque toutes les sources d'énergie utilisées dans le monde. Ce qui résume les concepts généraux de l'énergie solaire et du soleil. Cette énergie peut être exploitée dans plusieurs domaines tels que, le séchage des produits agricoles et du bois, distillation de l'eau de mer, climatisation des locaux, production de l'eau chaude, production de l'électricité, la réfrigération solaires...etc.

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours de saison. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à ce handicap : colature sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits. Le séchage et tout particulièrement le séchage au soleil est l'une des plus anciennes techniques de conservation des produits agroalimentaires utilisée par l'homme. Elle consiste en l'exposition du produit aux rayons du soleil et à l'air libre. Cependant, cette méthode présente plusieurs inconvénients, un étalage direct aux rayons ultraviolets du soleil peut causer la détérioration des vitamines de ce produit. Mais, il est aussi exposé aux intempéries aux insectes et à la poussière. L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, à des valeurs résiduelles inhibant le développement de tout micro-organisme de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation dans des conditions ambiantes à une température ordinaire sur de longues durées.

Le développement scientifique et technologique a permis de diversifier et de mettre en œuvre plusieurs méthodes de séchage et plusieurs séchoirs. Au cours de ces dernières années, plusieurs travaux ont été entrepris dans ce domaine, décrivant les multiples modèles de séchoirs solaires développés et réalisés pour des produits agricoles.

Ce travail présente une étude expérimentale du procédé de séchage des produit agricoles (menthe ; henné, banane ; pomme ...etc) dans un séchoir solaire direct à convection

forcée. D'autre part l'influence de certains paramètres sur le comportement du séchoir solaire proposé et la qualité des produits utilisés est étudié.

Ce mémoire contient quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre on va fournir des informations générales sur le séchage et les séchoirs solaires.
- Lors du second chapitre, nous présenterons une synthèse bibliographique capteur plan à air, ses différents composants, ses classifications, son fonctionnement. Et enfin, une description des capteurs solaires plans à air.
- Dans le troisième chapitre on retrace les notions et concepts sur la modélisation d'un capteur solaire thermique à air et l'étude des différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur ainsi que les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système en régime transitoire.
- Le dernier chapitre comprend les étapes de conception et de réalisation de notre séchoir solaire puis son expérimentation au niveau de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (U.R.E.R/MS) d'Adrar au sud Algérien puis on termine par la présentation des résultats expérimentaux de séchage des produits agroalimentaire désiré.

Le mémoire est clôturé par une conclusion qui englobe les principaux résultats obtenus dans cette étude suivie par des perspectives.

Chapitre I:
Généralités sur le séchage

I.1 Introduction

Le soleil est toujours considéré comme la source d'énergie renouvelable la plus importante. Chaque seconde, le soleil perd environ $4,5 \times 10^9$ tonnes de ses substances qui se transforment en radiations solaires. Cependant, la terre reçoit une très faible quantité de ces radiations, qui correspond à 18×10^{13} kW.

L'utilisation de rayonnement solaire pour le séchage est l'une des applications les plus anciennes de l'énergie solaire. Il a été utilisé depuis l'aube de l'humanité principalement pour la conservation des aliments, mais aussi pour le séchage d'autres matériaux utiles comme les tissus, les matériaux de construction, etc.

Les différents modes de séchage (Séchage par micro-ondes, La lyophilisation) actuellement utilisé, à l'exception du séchage solaire, sont de grands consommateurs d'énergie (10-15 % de la consommation d'énergie industrielle mondiale). De plus, ces processus sont difficiles à réaliser notamment dans les zones rurales où l'alimentation en sources d'énergie (l'électricité, gaz...) est souvent difficile. Donc l'utilisation de l'énergie solaire gratuite est utile et permet de réduire le coût du processus notamment dans les pays en développement.

Dans cette partie on va présenter les paramètres essentiels qui gouvernent le phénomène de séchage, les différentes théories et méthodes de séchage, les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide enfin une présentation des différents types du séchoir utilisé.

I.2 Définition

C'est l'opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide [1].

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes [2], [3].



Figure I.1 : les étapes de séchage solaire naturel de tomate.

I.3 Historique

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figes, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois...), ou pour les textiles (lavage, teinture...) et les peaux.

Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [4].

I.4 But de séchage

Le but du séchage consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaire jusqu'à des valeurs résiduelles inhibant le développement de tout micro-organisme permettant ainsi leur stockage dans des conditions ambiantes.

Le développement scientifique et technologique a permis de diversifier et de mettre en œuvre plusieurs méthodes de séchage et plusieurs séchoirs [5, 6]. L'utilisation des capteurs solaire à air pour le séchage des récoltes est idéale dans le cas du thé, du café, des fruits, des fèves, du riz, des épices, du caoutchouc, du cacao et du bois (Fig.I.2).

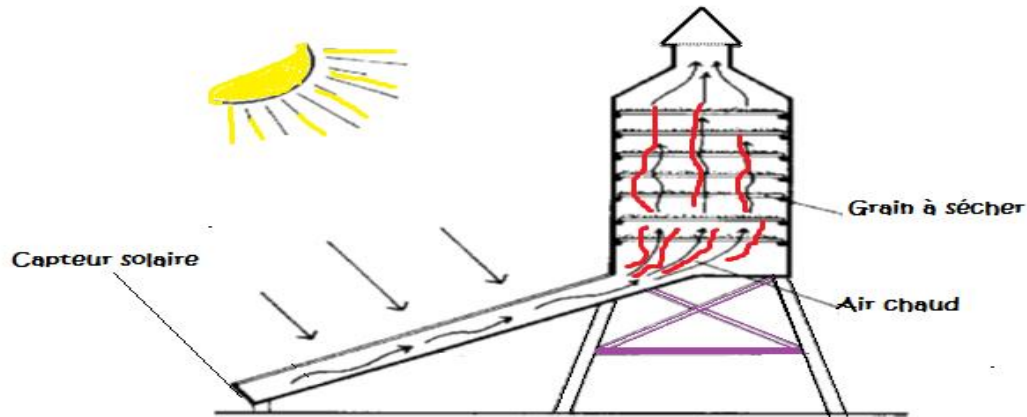


Figure I.2 : Séchage solaire.

I.5 Principe de séchage

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage : 1. Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire ; 2. Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits.

Un produit humide peut se représenter schématiquement comme sur la Figure I.3. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. [7]

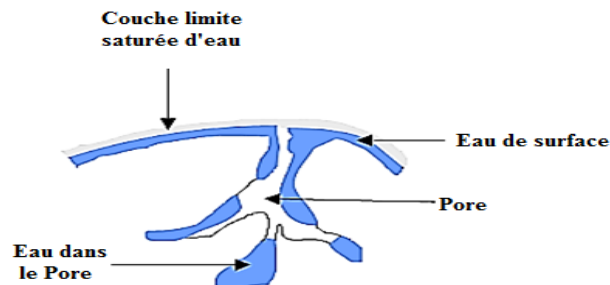


Figure I.3 : Présentation schématique d'un produit humide [7]

I.6 Modes de séchage

Le mode de séchage se base sur deux types de transfert :

- Le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer.
- Le transfert de masse, de l'intérieur de solide vers sa surface, puis le passage en phase gazeuse. La vitesse de séchage est directement liée à la vitesse de ces deux phénomènes.

I.6.1 Séchage mécanique

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,...). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement.

Opération	Technique	Mécanisme	Applications
Concentration	Centrifugation	Sédimentation force	Jus de tomate
	Filtration	Tamisage	Boues résiduelles
	Ultrafiltration	Tamisage moléculaire	Lactosérum
Séchage	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamisage	Cristaux de sucre
	Pressage	Expression	Fourrages

Tableau I.1: Quelques exemples des méthodes de séchage

On pourrait ajouter à cette liste l'osmose inverse (concentration des jus de fruits) bien que cette technique constitue un cas limite plus assimilable à une opération de transfert de masse qu'à un processus de transfert de quantité de mouvement et que l'eau subisse déjà une sorte de changement d'état puisqu'elle passe à l'état de solution dans la membrane.

L'élimination d'eau par voie mécanique se caractérise essentiellement par trois points l'opposant nettement aux techniques faisant appel aux transferts de chaleur.

I.6.2 Séchage chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium...) pour extraire l'eau [8].

I.6.3 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 un 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 [9].

Le séchage thermique se divise lui-même en deux types :

I.6.3.1 Séchage par ébullition

L'ébullition a lieu lorsque la température du produit est élevée (par conduction sur une surface chaude, par rayonnement, par de la vapeur d'eau surchauffée, par immersion dans de l'huile chaude) à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale à la pression totale ambiante : **$p=p_t$** .

Il découle de cette définition que :

- La température d'ébullition dépend de la pression totale (elle est plus basse sous vide qu'à pression atmosphérique) et de l'activité de l'eau du produit.

Le séchage par ébullition est mis en œuvre dans le cas du séchage par conduction, comme le sécheur cylindre.

I.6.3.2- Séchage par entraînement

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que :

- L'air apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation.
- L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau.

La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par l'air. Le produit se met spontanément à une température telle que les transferts de chaleur permettent l'évaporation d'un débit d'eau égal à celui

capable de traverser la couche limite (compte tenu de ce qu'une petite partie de la chaleur est utilisée à chauffer le produit).

I.7 Caractéristiques de l'air de séchage

I.7.1 Humidité

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

I.7.1.1 Humidité absolue

On appelle humidité absolue ou teneur en humidité, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par H_a est donnée par la relation

$$\text{suivante : } H_a = \frac{M_a}{M_e} [\text{kgv} \cdot \text{Kgas}^{-1}] \quad (\text{I.1})$$

I.7.1.2 Humidité relative

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

$$Hr = \frac{P_v}{P_s(T)} \cdot 100\% \leq Hr \leq 100\% \quad (\text{I.2})$$

P_v : pression partielle de la vapeur dans le mélange.

P_s : pression de saturation.

I.7.2 Température

I.7.2.1 Température sèche

On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens Courant [9].

I.7.2.2 Température humide du gaz

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température

prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement [9].

1.7.3 Vitesse

On appelle vitesse de séchage la masse de liquide évaporée pendant l'unité de temps travers une surface unitaire d'évaporation.

Cette vitesse est donnée par :

$$\frac{m_v}{A} = - \frac{m_s dH}{A d\tau} \quad (I.3)$$

m_v = flux massique de vapeur.

m_s = masse du solide sec.

$\frac{dH}{d\tau}$ = variation de l'humidité du solide avec le temps.

A = surface à travers laquelle se produit l'évaporation.

Le signe – indiquant que l'humidité diminue avec le temps.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont

- ❖ La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- ❖ La température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.
- ❖ Les conditions de mise en contact des deux phases ainsi que du mode de transfert de la chaleur [10].

I.8 Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [11].

1.8.1 Séchage par conduction

Dans ce mode de séchage, L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée [12].

1.8.2 Séchage par convection (ou par entraînement)

On envoie sur le produit à sécher un flux d'air chaud. Il s'établit spontanément entre ce produit et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

- Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels [12] et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

1.8.3 Séchage par rayonnement

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible [3].

1.8.4 Séchage par micro-ondes

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge.

1.8.5 La lyophilisation

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur.

1.8.6 Séchage solaire

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect). Ce mode de séchage est plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

1.8.6.1 Séchage à l'air libre ou (Le séchage traditionnel)

Dans ce procédé, l'énergie solaire est utilisée pour chauffer directement les produits qui sont placés sur une plateforme (sol, tapis, béton.). Ils sont laissés jusqu'à ce qu'ils soient asséchés. Pendant la période de séchage, les produits sont soumis à toutes les modifications météorologiques comme les insectes, les tempêtes, et la grêle...etc ; tous ces problèmes entraînent une détérioration de la qualité des aliments en termes de perte de valeur nutritionnelle.



Figure I.4 séchoir naturel des tomates l'air libre

Donc le séchage solaire à l'air libre ne répond pas aux normes de qualité internationales et ne peut donc pas être vendu sur le marché international.

1.8.6.2 Séchoir solaire

Le séchage solaire est souvent différencié du séchage à l'air libre par l'utilisation d'équipements (cabinet de séchage, capteur solaire ...) pour capter le rayonnement solaire afin d'exploiter l'énergie reçu pour le séchage.

I.9 Types de séchoirs solaires

Il existe plusieurs critères pour classer les séchoirs solaires, parmi les plus importants on cite le séchage direct et le séchage indirect, séchoirs mixtes, séchoirs hybrides [13].

I.9.1 Les séchoirs solaires directs

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud (Fig. I. 5). La chaleur est générée par absorption des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage [14].

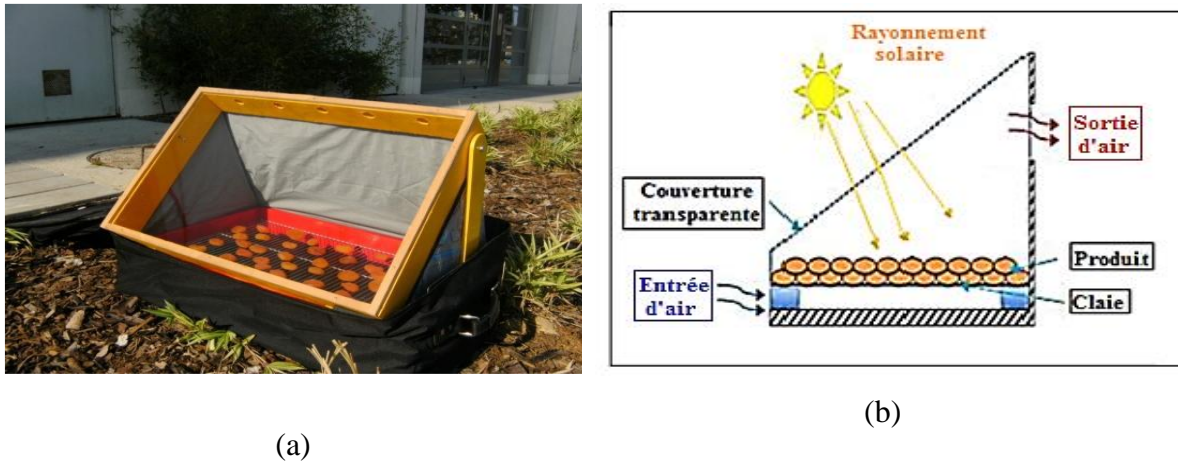


Figure I.5: (a) Séchoirs solaires directs simples, (b) principe d'un séchoir solaire direct.

◀ Les avantages et les inconvénients

a- Les avantages:

- Les produits sont mieux protégés contre les poussières, des mouches et autres insectes, et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

b- Les inconvénient

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration [15].
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil la destruction des nutriments [16].

1.9.2 Les séchoirs solaires indirects

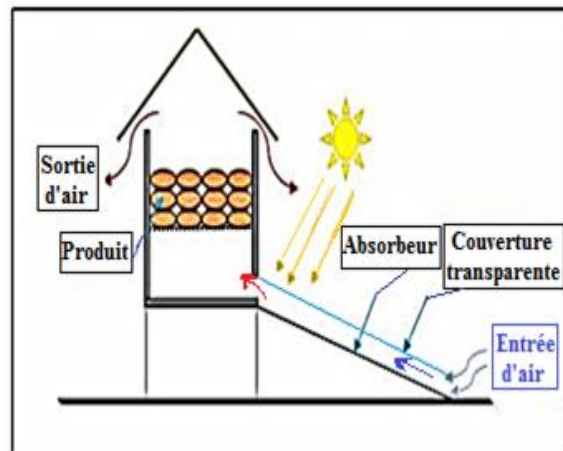
Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage (Fig. I. 5). Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire.

Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage.

Les séchoirs solaires indirects présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive, etc.) [17]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires.



(a)



(b)

Figure I.6: (a) Séchoirs solaires indirect ;(b) principe d'un séchoir solaire indirect.

a-Avantages

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit [18].
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [19].

b-Inconvénients

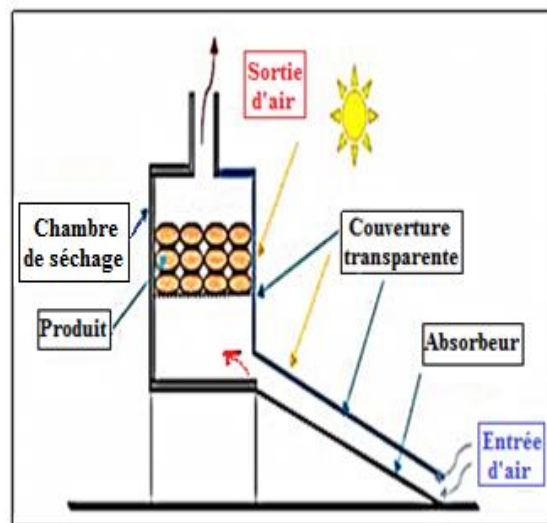
- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

1.9.3 Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs [14].



(a)



(b)

Figure I.7: (a) Séchoir solaire mixte;(b) principe d'un séchoir solaire mixte

1.9.4 Les séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir : -Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet tout simplement de préchauffer l'air [14].



Figure I.8: Séchoir solaire hybride.

Les avantages et l'inconvénient

a-Avantages

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage [20].
- Forte augmentation de la production par rapport aux autres types des séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin

b-Inconvénient

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

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différentes notions de base et définition du séchage solaire et ses outils complémentaires, on constate que le séchage solaire est un axe de recherche vaste et prometteur soit de point de vue théorique ou expérimental. En effet, le séchage a globalement moins d'inconvénients que d'autres procédés de conservation (appertisation, congélation ou traitement aseptique). Ainsi que, le séchage des fruits, des légumes et des épices reste encore une méthode très répandue de conservation de ces aliments à cause de son efficacité.

I.11 Références bibliographiques

- [1] Techniques de l'ingénieur – *génie des procédés Séchage Théorie et calculs*. Par André Charreau et Roland cavailé, j 2480-2 ; 2480-22.
- [2] BOUGHALI, Slimane. *Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agroalimentaires dans les zones Arides et désertiques*. 2010. thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [3] N.Chalal, *Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect*. Mémoire de magister. Université Mentouri-Constantine (2007).
- [4] A.Bensedik, *Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée*. Mémoire de magister. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen. (2011).
- [5] H. Rakotondra miarana, D. Morau, L. Adelard and J.-C. Gatina, *Modélisation du séchage solaire : application au séchage en couche mince des boues solides des stations d'épuration, 12ème journées internationales de thermique JITH*, vol. pp.2005.
- [6] H. Amadou, *Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines*, Strasbourg 1, 2007.
- [7] Souheyla Khaldi; *Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie*; thèse de doctorat Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018.

- [8] Bahadj Ahmed, *Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre*. Mémoire de master, Kasdi Merbah- Ouargla (2014).
- [9] H. Ben cheikch, M. Ould Sidi med et Y. Draoui, *Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif*. Mémoire de l'ingénieur d'état. Université Kasdi Merbah –Ouargla. (juin 2011).
- [10] D. Schnell , *Technique de séchage, Traduit de l'allemand*, GMBH, Eschborn,(1983)
- [11] Mujumdar, A.S. and A.S. Menon, *Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers*. Handbook of industrial drying, 1995.1: p. 1-39
- [12] Mujumdar, A.S., *Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement*. Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec., 2000.
- [13] A. Boulemtafes , D. Semmar, « *Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect* », Rev énergies renouvelables,(1999)97-100.
- [14] Sharma, A., C.R. Chen, and N. Vu Lan, *Solar-energy drying systems: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009.13(6): p. 1185-1210
- [15] A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. Kalenga Saka "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ", Renewable Energy, 27 (27 - 37)(2001).13
- [16] Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A.Jamali, "Thin layer convective solar drying an mathematical modeling of prickly pear peel ", Energy 29 (211 - 244) -(2004).14
- [17] Toshniwal, U. and S. Karale, *A review paper on solar dryer*. International Journal of Engineering and Research and Applications, 2013.3(2).
- [18] B. K. Bala, M. R. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. Daschowdury and S. Janjai "Solar drying of pineapple using solar tunnel drier", Renewable Energy 28(183-90) (2003).18
- [19] I. N. Simatc "Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryers ", Renewable Energy, 28 (435 - 453) - (2003).19

[20] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "*Design, development and performance testing of new natural convection*", Energy 27(579-590) (2002).20

Chapitre II :

Synthèse bibliographique Capteur plan à air

II.1 Introduction

Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou collecteur solaire) est un dispositif utilisé pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur, Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.

II.2 Principe d'un capteur solaire plan

Un capteur solaire (figure II.1) est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide "fluide caloporteur". Ce système de captage a pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3 μm), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante [1].

L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 μm). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée subit une élévation de température à la traversée du capteur [2].

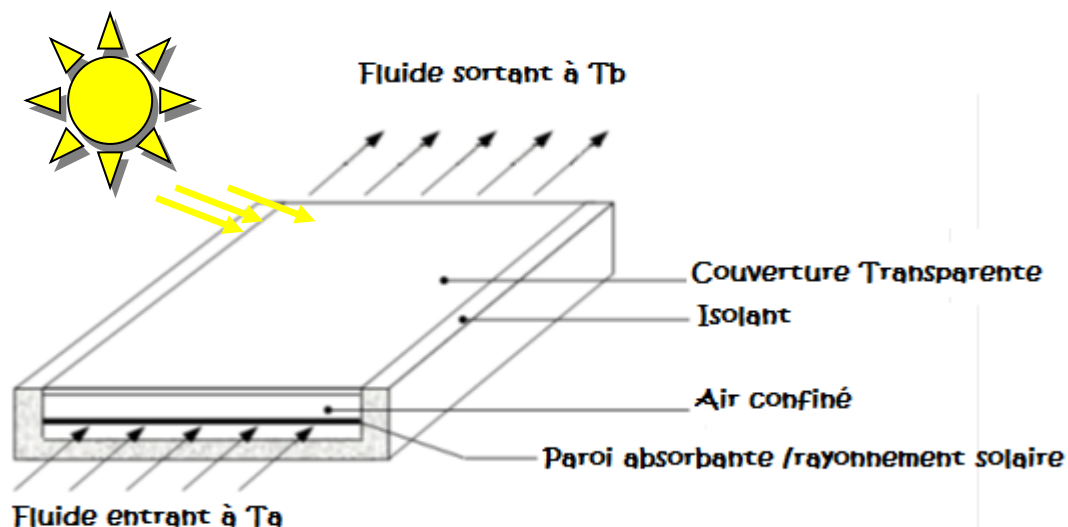


Figure II.1- Schéma de principe d'un capteur solaire plan

II.3 Les différents composants d'un capteur solaire plan

Un capteur solaire plan est généralement composé d'un coffre, d'un vitrage, d'une isolation, d'un absorbeur (et des fois des tubes permettant le passage du fluide caloporteur comme pour les capteurs à eau). Nous allons étudier chaque élément séparément, en donnant les indications nécessaires pour réaliser ou choisir un bon capteur [3].

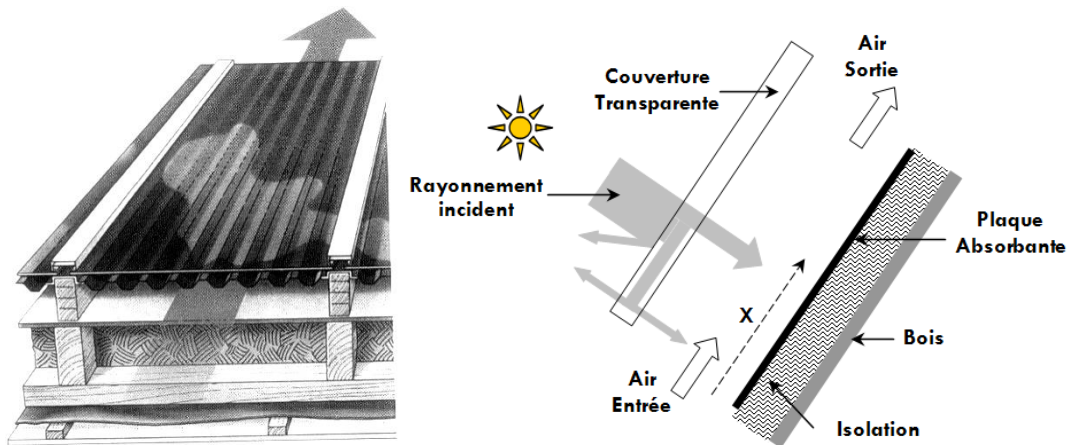


Figure II.2: Schéma de principe du capteur à air [17].

II.3.1 Couverture transparente

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques (brusque refroidissement en cas d'orage), le verre sécurisé est principalement utilisé comme couverture transparente. Il est de préférence pauvre en oxyde de fer afin d'être le plus transparent possible à la transmission du rayonnement solaire. Dans le cas de capteurs intégrés en toiture, des matières synthétiques sont parfois utilisées. Leur durée de vie est plus faible que celle du verre ordinaire, mais elles sont plus légères, moins chères et plus faciles à mettre en œuvre.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse ainsi la fraction réfléchiée du rayonnement solaire incident, afin de diminuer un éventuel éblouissement.

Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont :

- ✚ Le coefficient de transmission (η).
- ✚ l'émissivité (ϵ).

Les propriétés de divers types de verre sont données au tableau I.3 [4]

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre Clair	8%	9%	83%
Verre basse teneur en Fe 2 O3	8%	2%	90%

Tableau II.1: Quelques caractéristiques optiques des verres

Le vitrage n'absorbe que faiblement le rayonnement solaire d'où il transmet donc un maximum d'énergie vers l'absorbeur.

Actuellement le verre le plus utilisé pour les capteurs solaire plan est le verre prisme.

Sa particularité est de diminuer la partie du rayonnement réfléchi (1.5%). Contrairement au verre trompé classique. Lorsque l'angle d'incidence est faible, ce verre peut atteindre jusqu'à 96% de transmission

II.3.2 Absorbeur

L'absorbeur joue le rôle principal dans le capteur solaire plan. C'est généralement un corps noir qui absorbe tous les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il converti le rayonnement solaire capté en énergie calorifique.

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Un bon coefficient d'absorption.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et le mode de construction a une grande influence sur la qualité du capteur. Du fait de leurs conductivités élevées, les absorbeurs son généralement en cuivre, en acier ou en aluminium.

Au tableau II.2 est donné les caractéristiques de divers métaux peuvent être utilisés comme absorbeur [5].

Matière	Conductivité (w/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	240	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Tableau II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

Pour diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont souvent revêtus d'une couche sélective. Pour la plupart des capteurs, le revêtement sélectif est obtenu à partir de nickel et de chrome. Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au tableau II.3

Revêtement	Absorption	Emission
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Inox (sélectif)	0,95	0,05

Tableau II.3 Revêtements des surfaces d'absorbeur

II.3.3 Isolation arrière

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ceux-ci doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan. L'isolation doit généralement avoir une épaisseur de l'ordre de 5 à 10 cm. Les matières isolantes utilisées ont été des laines minérales, soient des matières synthétiques (de laine de verre, mousses expansives de polyuréthane ou polystyrène). Elle doit résister aux hautes températures atteintes à l'intérieur du capteur. Pour choisir un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

- La masse volumique.
- La température maximale d'utilisation en régime permanent.
- La résistance au feu aux rongeurs et à la putréfaction.

- La sensibilité à l'humidité et son coût.

Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau II.4

Isolant	Conductivité thermique à 500w/m. °C max	Température max
Laine de verre	0,041	150
Polyuréthane	0,027	110
Polystyrène	0,039	85

Tableau II.4 Quelques propriétés des isolants [5].

II.3.4 Coffre (le boîtier)

Le coffre du capteur renferme les différents actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques, il réalisé soit en fine feuille de métal (acier galvanisé, aluminium, inox) avec protection par revêtement stable aux intempéries et doit permettre d'assurer sa fixation sur la couverture tout en lui permettre de se déplacer librement. Le vitrage est généralement posé avec un joint élastomère insensible aux rayonnements ultraviolets et avec un profile mécanique autorisant des opérations de montage et démontage aisées des celui-ci [5].

II.4 Différents types des capteurs solaires plans à air

Un certain nombre de détails différencient les capteurs les uns des autres, principalement, la structure, la surface des absorbeurs, les circuits hydrauliques et la perte de charge, le vitrage [6] On distingue trois grandes catégories de capteurs plans à air :

- 1- capteurs à absorbeur plan.
- 2- capteurs à absorbeur perméable.
- 3- capteurs à absorbeur à géométrie variable.

II.4.1 Capteurs à absorbeur plan

L'absorbeur est une plaque en tôle plane, leur variété réside dans le nombre des veines d'écoulement d'air [7].

On distingue quatre types des capteurs selon leurs modes d'écoulement :

- Type 1 avec écoulement d'air au-dessus de l'absorbeur.
- Type 2 avec écoulement en dessous l'absorbeur.
- Type 3 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur de même sens.
- Type 4 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur au sens contraire.

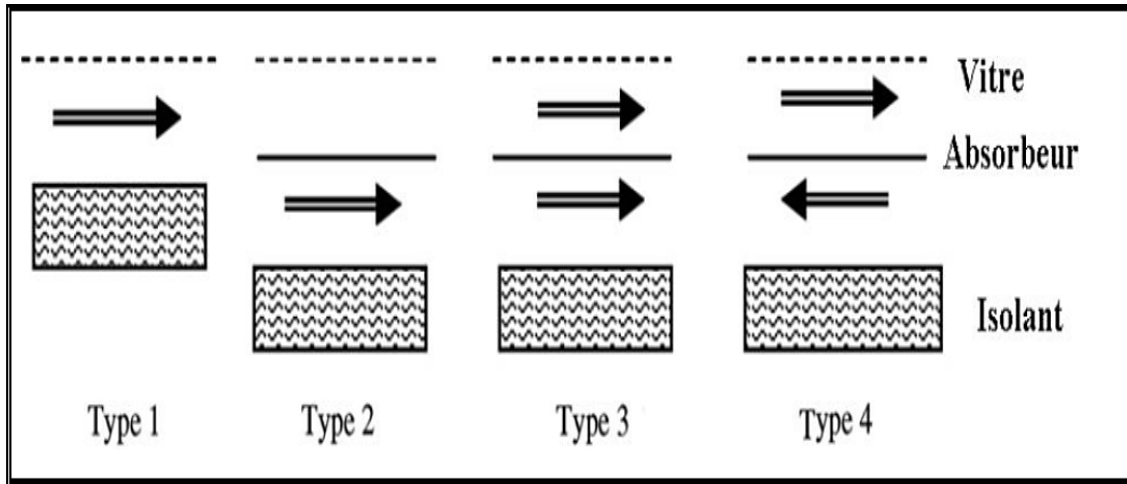


Figure II.3 Les types génériques principaux d'écoulements [7].

II.4.2 Capteurs à absorbeur perméable

L'amélioration du rapport surface d'échange sur projection de la surface d'absorbeur consiste à utiliser un absorbeur poreux.

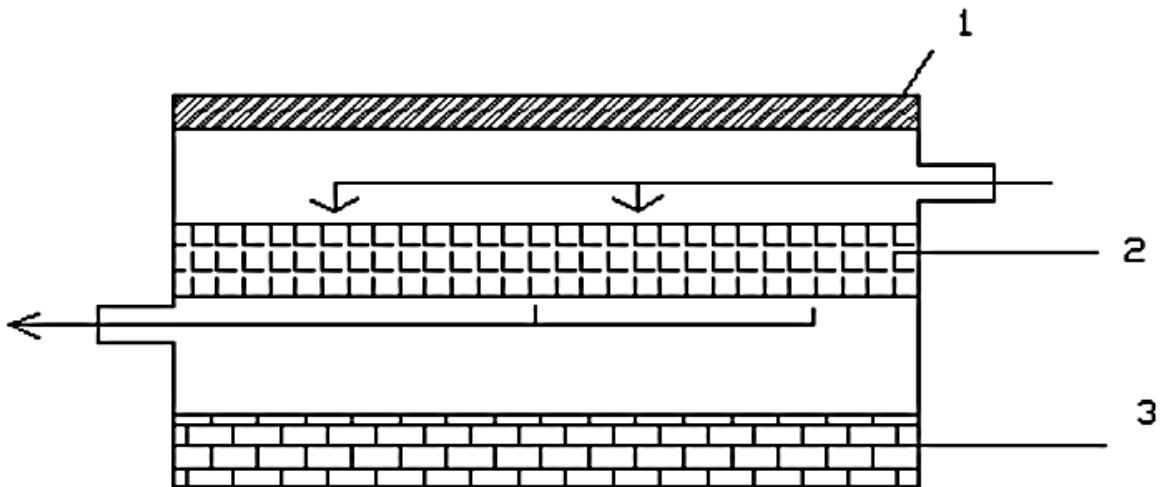


Figure II.4- Capteurs à absorbeur perméable [9] 1-vitre. 2-absorbeur poreux. 3-isolant

On peut utiliser à cet effet du tissu noir, de la fibre de verre noircie, des écrans rainurés et étirés, de la laine d'acier ou des assemblages de lamelles [8].

II.4.3 Capteurs à absorbeur à géométrie variable

Si l'on veut utiliser le vitrage comme une garde pour réduire les pertes de chaleur il faut que le transfert de chaleur ait lieu entre le dos de l'absorbeur et l'air. L'absorbeur constitue alors la paroi frontale du canal d'air et le revêtement intérieur de l'isolation constitue le fond du canal. On peut augmenter la surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur et à la face interne de l'isolation, soit en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée. Les formes les plus utilisées sont les suivantes :

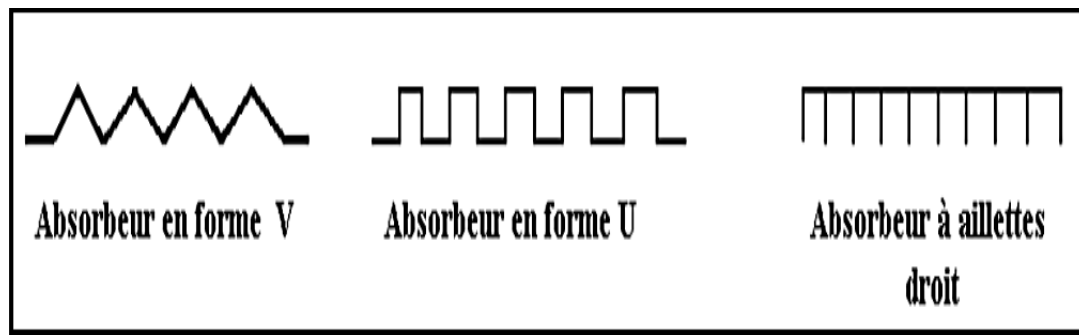


Figure II.5- différents type d'absorbeur [10].

II.5 Résultats obtenus par certains chercheurs

II.5.1 Amélioration des performances des capteurs solaires plans à air

Dans le but de favoriser le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide de travail dans un capteur à air, **A. Ahmed-Zaïd, A. Moulla, M. S. Hantala et J.Y. Desmons** [11] présentent une comparaison entre les résultats obtenus dans les cas du capteur solaire muni d'obstacles et du capteur sans obstacles (SC).

Les différentes formes étudiées, à la fois simples et intéressantes, concernant, les chicanes Delta Cintrées Longitudinalement (DCL), ogivales Cintrées Longitudinalement (OCL) et Transversales-Longitudinales (TL).



Figure II.6: Disposition des obstacles DCL [11]

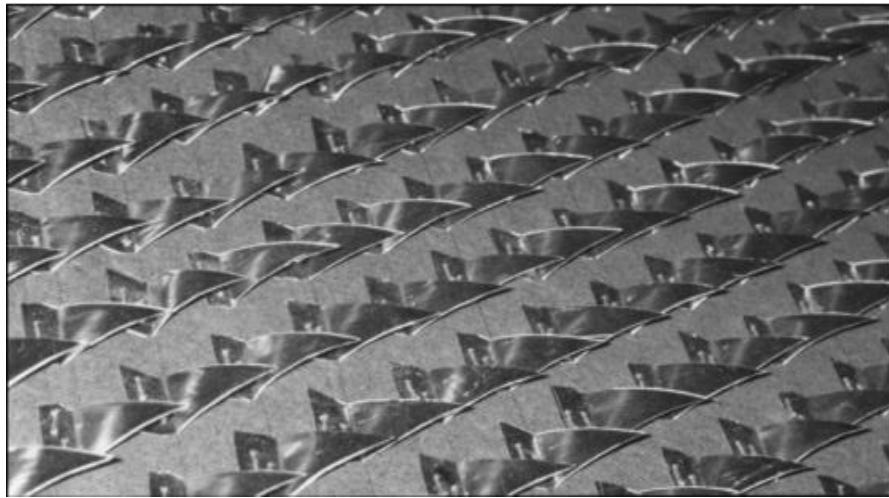


Figure II.7: Disposition des obstacles OCL

Dans cette étude expérimentale, par la simulation de l'énergie solaire, ils ont cherché à améliorer le couple Rendement-Ecart de température du capteur en introduisant des chicanes (obstacles) lesquelles sont déposées dans la veine dynamique du capteur. Les transferts thermiques, la température de sortie et le rendement du capteur sont nettement améliorés. Une application des meilleurs systèmes est présentée pour sécher l'oignon jaune et le hareng dans des temps intéressants [11].

Leurs résultats expérimentaux ont montré que les chicanes (TL) présentent un rendement meilleur par rapport aux chicanes (DCL), (OCL).

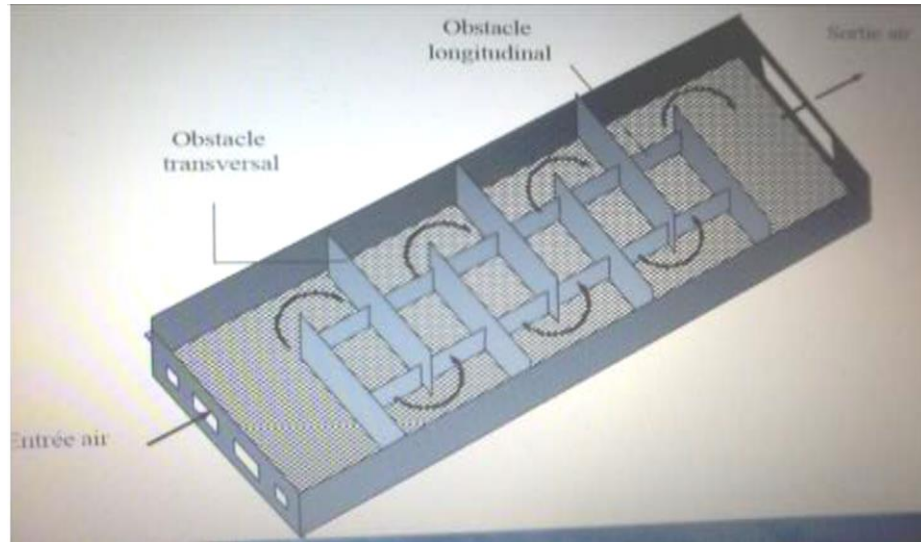


Figure II.8: Capteur muni d'obstacles TL [11].

II.5.2 Minimisation des pertes thermiques

Dans le but de minimiser les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, **Feyza Benyelles et Al** ont proposés de placer un isolant " aérogel de silice " au-dessus de l'absorbeur comme le montre la figure II.11.

Les auteurs ont choisis l'aérogel de silice pour ses propriétés. C'est un matériau solide à basse densité variant de 80 à 270 kg/m³, transparent, poreux (porosité de 35% à 90%). Son indice de réfraction est compris entre 1.2 à 1.05. Pour une épaisseur de l'ordre de 20 mm, la transmittance solaire normale est de 90%. Sa conductivité thermique est de l'ordre de 0.02W/m. K [12].

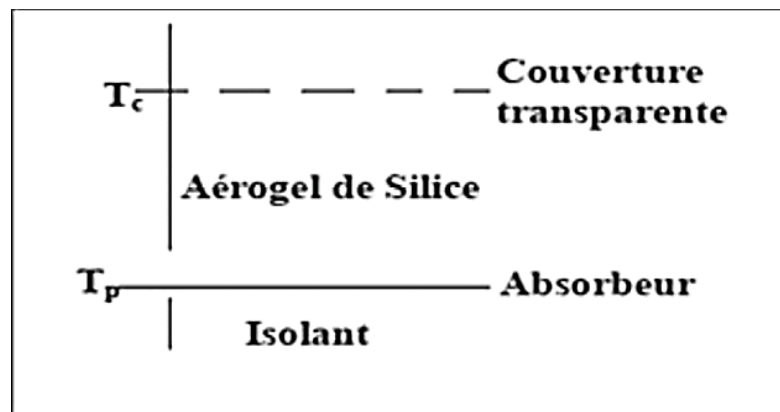


Figure II.9 : Conception des capteurs à aérogel de silice

Plusieurs capteurs dans les mêmes conditions expérimentales ont été comparés,

- ✚ Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif.
- ✚ Capteur simple vitrage à absorbeur sélectif.
- ✚ Capteur double vitrage à absorbeur non sélectif
- ✚ Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif muni d'un isolant à aérogel de silice.

Les auteurs ont trouvé que la température de la vitre d'un capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif peut atteindre 50°C, alors qu'elle n'atteint que 20 °C pour un absorbeur muni d'un isolant aérogel de silice. En outre, le coefficient de pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, dans ce cas est minime. Ils ont déduit que l'aérogel de silice est un super isolant transparent de la face avant du capteur, et contribue ainsi à l'amélioration du rendement du capteur solaire.

II.5.3 Influence de la configuration de l'absorbeur sur les performances

F.Mokhtari et al 2001, Une campagne de mesures a été effectuée au site de Bouzaréah (C.D.E.R) durant six jours pour les deux modes de circulation de l'air dans le capteur [13] : (forcée, naturelle)., on a programmé le déroulement des tests durant une période de six (6) jours. Lors de chaque journée, les tests sont pris entre 8 h 00 jusqu'à 16 h 00 avec un pas de quinze (15) minutes. Ils ont fait une étude expérimentale sur les capteurs solaires à air, leur objectif est d'évaluer l'effet de la plaque absorbante sur la température de sortie du fluide caloporteur. C'est-à-dire le coefficient d'échange par convection, pour cela ils ont étudié trois configurations de capteurs solaires à air.

Les trois capteurs sont de dimensions (1.92×0.94m), l'entrée de chaque capteur est munie d'un ventilateur qui débite une vitesse de l'air de l'ordre de 2,6 m/s en convection forcée. Figure (II.12).



Figure II.10: Photo des différents types de capteurs solaires à air [13].

- ✚ La première configuration (a) est la plus simple, elle a un passage d'air sous l'absorbeur qui est en tôle peinte en noir ($\alpha=0.95$), la couverture est un vitrage de (0.03 m)
- ✚ La deuxième configuration (b) constituée comme la première, seulement la plaque absorbante est placée sur la diagonale du capteur entre la couverture et l'isolant, l'entrée de l'air se trouve au-dessus de l'absorbeur tandis que la sortie est située sous l'absorbeur. Elle est munie d'un orifice de section rectangulaire de (150 x 600 mm). Pour permettre l'évacuation de l'air chaud.
- ✚ La troisième configuration (c) est constituée des mêmes éléments que la première configuration, seulement le passage d'air se trouve au-dessus de la plaque absorbante (entre le vitrage et la plaque absorbante).

D'après les résultats expérimentaux trouvés, le transfert thermique est important quand il y a contact direct entre la plaque et l'air couplé à une double circulation de l'air, c'est donc la configuration (c) qui a donné les meilleurs résultats et plus exploitable dans le domaine du séchage solaire [14].

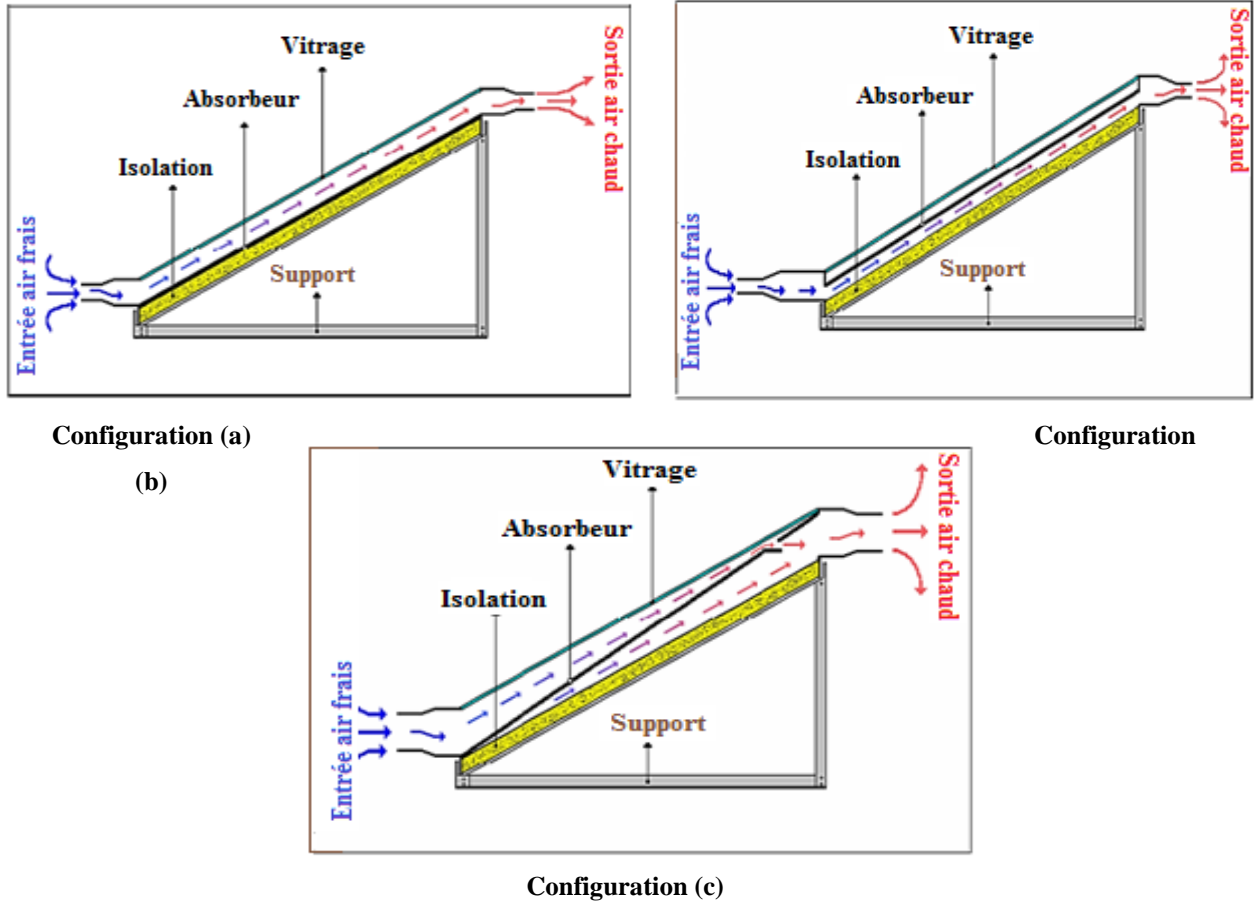


Figure II.11 : Représentation des trois types de capteurs solaires à air considérés [13].

II.5.4 Influence des rugosités artificielles sur les performances

K. Aoues et Al 2008 [14] ont mené un travail théorique en vue d'améliorer le coefficient de transfert convectif entre l'air et l'absorbeur, en plaçant des chicanes cylindriques perpendiculairement à l'écoulement dans la veine d'air dynamique entre l'absorbeur et l'isolant (figureII.14).

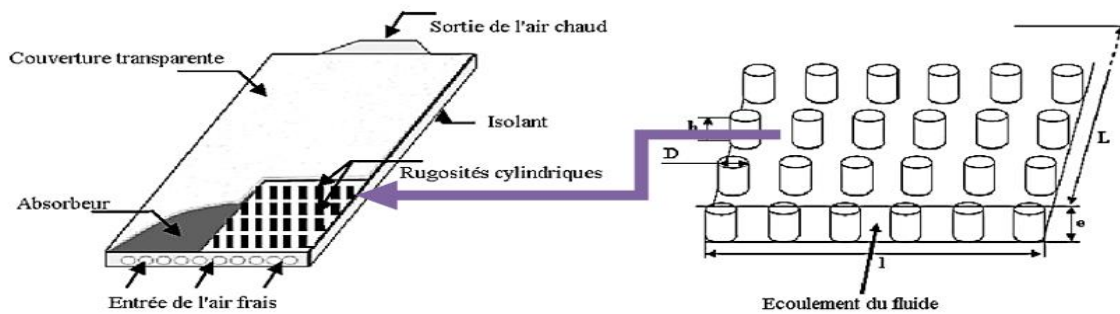


Figure II.12 : Schéma du capteur plan à air muni de rugosités [14].

Les chercheurs ont étudié les trois cas suivants (figure II.15) :

- Le capteur plan à air dépourvu de chicanes.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en rangés alignés. **(a)**.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en quinconces. **(b)**.

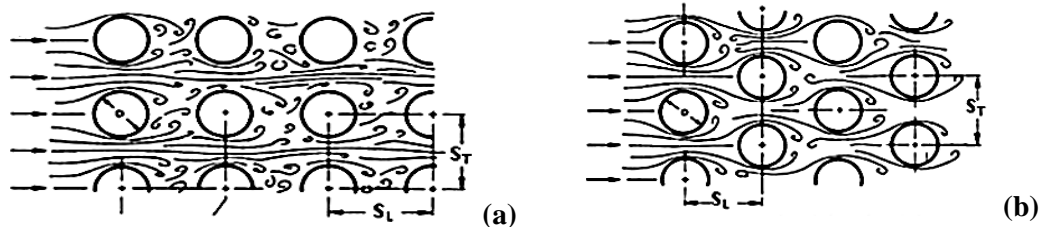


Figure II.13 : Différentes dispositions des rugosités cylindriques [14]

Les auteurs ont trouvé que le meilleur rendement est obtenu avec des chicanes cylindriques arrangées en quinconce, et le plus bas pour le capteur lisse.

En plus **K. Aoues et al** 2009 [15] (étude expérimentale dans la région de Biskra) Ont fait une étude expérimentale sur un capteur solaire à air à simple passe d'une surface de captation égale à $1,74 \text{ m}^2$, d'une longueur $L_c = 1.95 \text{ m}$ et d'une largeur $l_c = 0.89 \text{ m}$, dont le but d'optimiser les performances thermiques.

Les principaux composants du capteur comme suit :

- Une seule couverture transparente de verre d'épaisseur 5 mm.
- Une plaque absorbante mince en acier galvanisé peinte en noir mat d'épaisseur 0.4 mm.
- La hauteur entre la couverture transparente et la plaque absorbante est égale à 25 mm.
- L'isolation arrière est assurée grâce à une feuille de polystyrène de 40 mm d'épaisseur et puis elle est assurée également par le boîtier en bois de 5 mm d'épaisseur.

Le dispositif expérimental est illustré par la Figure II.15

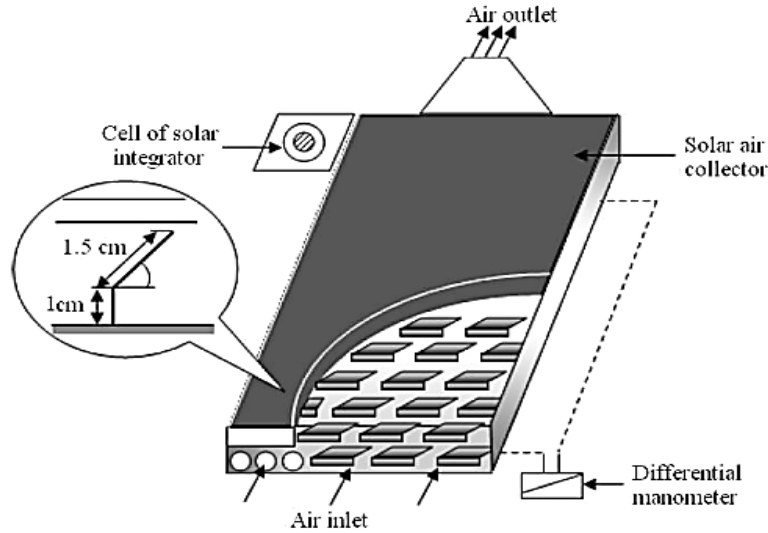


Figure II.14 : Schéma du Dispositif expérimental [15]

La veine d'air dynamique d'une hauteur de 25 mm est comprise entre la plaque absorbante (corps noir) et une plaque inférieure en acier galvanisé placée sur l'isolant. Cette veine est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement de l'air sur la plaque inférieure. Ces obstacles présentent une différence dans la forme résidant dans la partie inclinée d'angle α respectivement égale à 60° et 120° . Ces chicanes sont espacées d'une distance respectivement à $d=10$ cm et $d=5$ cm suivant deux configurations A et B qui se différencient par le nombre de rangés respectivement égale à 152 et 256 chicanes (Figure II.16).

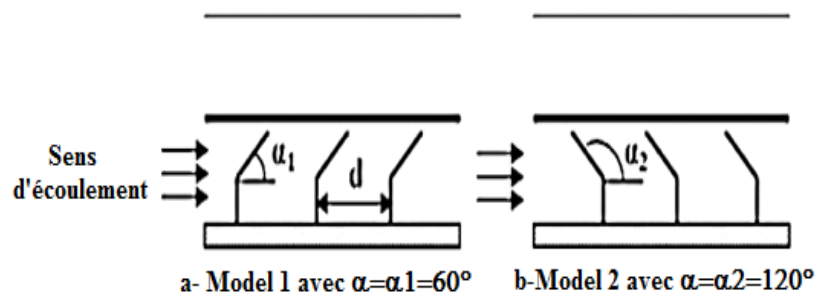


Figure II.15: Schéma descriptif des chicanes

Après une série de tests expérimentaux, les auteurs ont conclu que la géométrie de passage dans la section droite perpendiculaire à l'écoulement joue un rôle important et ont

trouvé que les chicanes modèle 1 ($\alpha=60^\circ$) placées dans les configurations A1, B1 donnent les meilleurs résultats par rapport à ceux des configurations A2, B2 qui sont des chicanes modèles 2 ($\alpha=120^\circ$). Cela s'explique par le fait que les chicanes du modèle 1 permettent l'orientation du fluide caloporteur en écoulement vers la plaque absorbante, d'où l'augmentation des échanges convectifs. Par contre, les chicanes du modèle 2 orientent le fluide caloporteur vers la plaque inférieure.

II.5.5 Capteur à rugosité artificielle

A.Labed et al [16] ont fait une étude expérimentale sur un capteur solaire à air à simple passe d'une surface de captation égale à $1,76 \text{ m}^2$, d'une longueur $L_c = 1.96 \text{ m}$ et d'une largeur $l_c = 0.9 \text{ m}$, il est composé d'une seule couverture transparente de verre d'épaisseur 5 mm , d'une plaque absorbante en acier galvanisé peinte en noir mat avec une épaisseur de 0.4 mm , d'une plaque arrière en acier galvanisé placée sur l'isolant et d'une isolation arrière d'une épaisseur de 0.4 mm . Les rugosités artificielles sont de petits canaux, dont la base est de forme trapézoïdale d'une hauteur de 25 mm , elles sont placées entre les deux plaques en acier galvanisé (figure II-17).

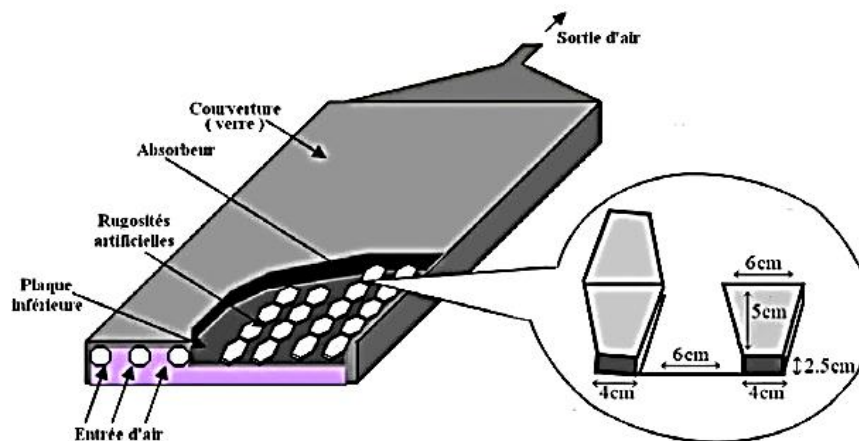


Figure II.16: Schéma du modèle expérimental [16].

Les auteurs ont conclu que les chicanes introduites dans la veine d'air utile agissent favorablement sur le transfert thermique, cependant elles engendrent des pertes comparativement à un canal lisse. Les résultats théoriques sont validés par les résultats expérimentaux.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre une étude descriptive est présentée sur le capteur solaire plan à air, ses composants et les principaux types. Nous avons aussi passé en revue aux résultats obtenus par certains chercheurs où on a remarqué que beaucoup de recherches et d'études concernant les capteurs solaires à air ont trouvé plusieurs aboutissements qui permettent d'améliorer l'efficacité thermique et d'exploiter le maximum possible la production énergétique de ces capteurs à partir de l'amélioration des différents paramètres ayant une influence.

II.7 Références bibliographiques

- [1] K. Salima. "Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Thèse de magister (2009) 03-15.
- [2] A. Dalila. "Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives". Thèse de magister (2010) 17-39.
- [3] Mohamed Mogharbi et Daoud Hallassa, « Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air ». Master, Université Kasdi Merbah de Ouargla .2011.
- [4] Benkhelifa Abdelaziz, « Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur », Mémoire MASTER Université Kasdi Merbah Ouargla 2012.
- [5] Abdelaoui Med Khimmusti et Guricha Foud,« Etude expérimentale d'un bassin d'eau utilisé comme capteur solaire plan» ,université de Ouargla.
- [6] F. Khaldia, Z. Boussaid , « Détermination expérimentale et modélisation des isothermes de sorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) à différentes températures »,mémoire master académique, 2017 université Ahmed draia Adrar p.14.
- [7] P. Neyer. Energie solaire thermique. Guide des Energies Renouvelables, (2003).
- [8] R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.

- [9] Hwang, R. R, Chow, Y. C., Peng, Y.F. (1999) "Numerical study of turbulent flow over-two dimensional surface-mounted ribs in a channel", International journal for Numerical Methods in Fluids. 37, pp. 767-785.
- [10] Yuan, Z.X. and Tao, W.Q. (1998), "Numerical prediction for laminar forced convection heat transfer in parallel-plate channels with streamwise-periodic rod disturbances", Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 28, pp. 1371-87.
- [11] A. AHMED-ZAÏD, A. MOULLA, M. S. HANTALA ET J.Y. DESMONS « Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air: Application au Séchage de l'Oignon Jaune et du Hareng », Rev. Energ. Ren. Vol.4, PP 69-78. 2001
- [12] F. BENYELLES, B. BENABADJIA, B.BENYOUCEF et Z.ZIANI, « Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d'autres capteurs plans », 13emes Journées Internationales de Thermique.2007
- [13] F.Mokhtari et D. Semmar« L'Influence de la Configuration de l'Absorbeur sur les Performances Thermiques d'un Capteur Solaire à Air » Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 159-162.
- [14] K, Aoues; N, Moummi; A, Moummi; M, Zellouf; A, Labed; E, Echouri. Etude de l'influence des rugosités artificielles sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air, Revue des Energies Renouvelables, Vol 11, N°2, p219-227. (2008)
- [15] K, Aoues; N, Moummi; M, Zellouf; A, Moummi; A, Labed; E, Achouri ; A,Benchabane. Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air :, Revue des Energies Renouvelables, vol 12,N°2, p 237-248. (2009).
- [16] A, Labed; N, Moummi; K, Aoués; M, Zellouf; A, Moummi. Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561. (2009).
- [17] Kaoulal, Rabéa. Contribution à l'étude des systèmes solaires intègres aux bâtiments. Thèse de doctorat en physique énergétique, université Tahri Mohammed Béchar, (2016/2017).

Chapitre III :

Notions et concepts sur la modélisation d'un capteur solaire thermique à air

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente une modélisation globale du capteur solaire à air. Les équations de bilan thermique transitoire sont présentées pour les quatre composants du capteur à savoir : la vitre, le fluide, l'absorbeur, et l'isolant.

Cette modélisation qualifiée de globale repose sur une bonne connaissance des mécanismes d'échanges convectifs et radiatifs entre chaque composant et ses voisins directs.

III.2 Principe

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, huile, sel fondu ...). Le schéma de principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est donné sur la figure III.1

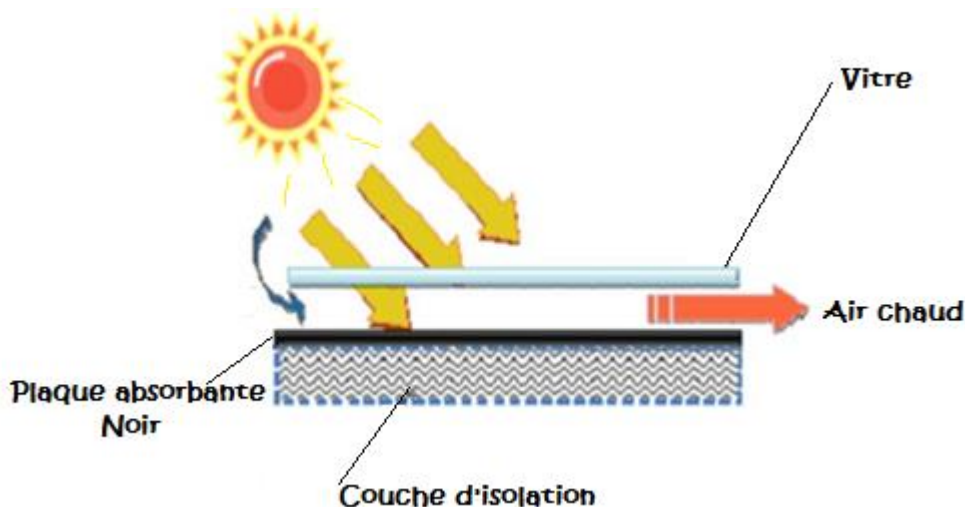


Figure III.1: Capteur solaire plan à air

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous (sur) cette paroi récupère par convection et rayonnement, une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température $\Delta T = T_{fs} - T_{fe}$ à la traversée du capteur.

III.3 Hypothèses simplification

Avant d'aborder les calculs il est nécessaire de considérer certaines hypothèses :

- + Le régime des échanges thermiques au système est considéré transitoire.
- + Pour absorber un maximum d'énergie, l'absorbeur est représenté par une tôle d'acier peinte noire mat
- + La température ambiante est la même autour du capteur.
- + La température dans le fluide et dans l'absorbeur ne dépend que de la dimension

Longitudinale (sens de l'écoulement).

- + Les propriétés des matériaux sont supposées constantes.
- + Le vent est supposé soufflant parallèlement aux faces du système.

III.4 Bilan thermique global de la paroi absorbante

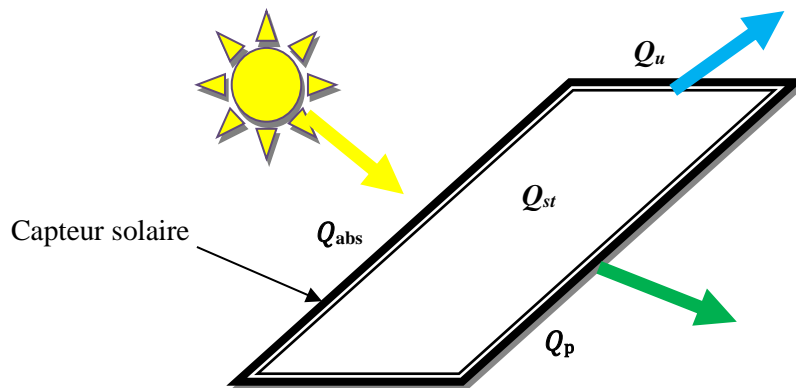


Figure III.2: Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire

Le bilan thermique s'écrit simplement pendant un intervalle de temps dt sous la forme suivante :

$E \text{ sorties} - E \text{ entrées} + E \text{ stockages} = 0$

$$Q_u + Q_p - Q_{abs} + Q_{st} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Ou en écrivant que l'énergie reçue se répartie en :

$$Q_{abs} = Q_u + Q_p + Q_{st} \quad (\text{III.2})$$

$Q_{st} = 0$, et donc l'équation du bilan devient:

$$Q_{\text{abs}} = Q_u + Q_p \quad (\text{III.3})$$

Avec :

Q_{abs} : Flux solaire absorbé.

Q_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur.

Q_p : Flux perdu Vers le milieu extérieur.

Q_{st} : Flux stocké dans le capteur.

➤ **Flux stocké**

Le flux stocké ou l'accroissement d'énergie dans le capteur s'écrit :

$$Q_{\text{st}} = M_f C_f \frac{\partial T}{\partial t} (W) \quad (\text{III.4})$$

Où :

M_f : Masse en fluide du capteur définie par : $m_i c_i = M_f c_f$, i représentant les différents éléments constitutifs du capteur

T : Température moyenne du capteur

t : Temps

➤ **Flux absorbée Q_{abs}**

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$Q_{\text{abs}} = \tau_{cs} \alpha_{ps} G S (W) \quad (\text{III.5})$$

Où Q_{abs} : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)

G : Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur (W.m^{-2})

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

τ_{cs} : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire

S : Surface de la paroi absorbante.

➤ **Flux utile Q_u :**

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

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fe})(W) \quad (III.6)$$

Où :

\dot{m} : Débit massique (kg/s)

C_p : Chaleur massique de l'air (J/Kg.K)

T_{fe} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur

T_{fs} : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

➤ Flux perdu Q_p :

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$Q_p \rightarrow = h_p (T_{pm} - T_a) S(w) \quad (III.7)$$

Où :

h_p : Coefficient global de pertes du capteur

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante

T_a : Température de l'air extérieur

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

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \quad (^\circ C) \quad (III.8)$$

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

➤ Rendements d'un capteur solaire

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

$$\diamond \text{ Le rendement global : } \eta = \frac{Q_u}{G} \quad (III.9)$$

❖ Le rendement interne : $\eta_i = \frac{Q_u}{Q_{st}}$ (III.10)

❖ Le rendement optique (radiatif): $\eta_o = \frac{Q_{st}}{G}$ (III.11)

On définit également des rendements moyens sur une période donnée (jour, mois, année). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan (III.1) sur la période choisie :

$$\int_0^t Q_{abs} = \int_0^t Q_u + \int_0^t Q_p$$

Soit $Q_{abs} = Q_u + Q_p$

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

$$\bar{\eta} = \frac{Q_u}{\int_0^t G S dt} ; \bar{\eta}_i = \frac{Q_u}{Q_{st}} ; \bar{\eta}_o = \frac{Q_{st}}{\int_0^t G S dt}$$

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

III.5 Expressions analytiques du bilan énergétique

Un schéma simplifié du capteur solaire étudié est présenté sur la Figure III.3 Ses principaux composants sont :

- ✚ Une seule couverture transparente de verre qui assure le phénomène d'effet de serre.
- ✚ Une plaque absorbante mince (en fer galvanisé peinte en noir mat) qui transmet la chaleur au fluide caloporteur(air).
- ✚ Les isolations arrière et latérale sont assurées grâce à un boîtier, afin de limiter les pertes thermiques vers l'extérieur

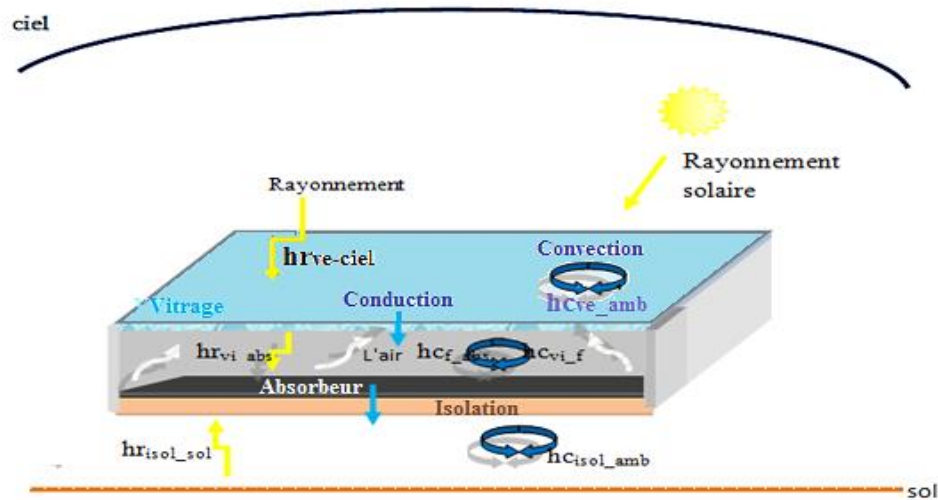


Figure III.3: Schéma de fonctionnement d'un capteur plan explicitant les divers flux énergétiques

III.5.1 Pour la couche du verre (indice v)

La vitre reçoit le rayonnement direct et diffus sur sa face supérieure et échange par convection et par rayonnement avec le milieu ambiant, le fluide caloporteur et l'absorbeur.

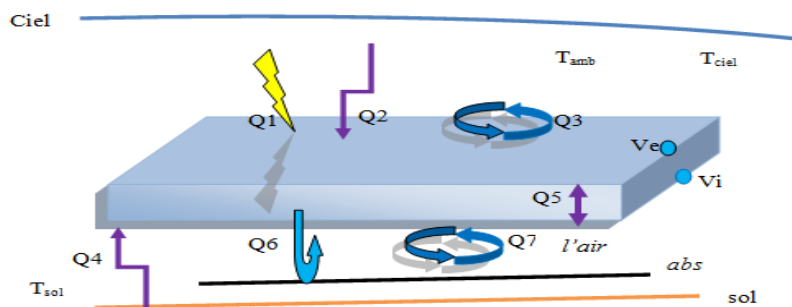


Figure III.4: Bilan énergétique au niveau de la vitre

Où :

Q_1 : Puissance de rayonnement solaire incident sur le verre

Q_2 : Puissance échangée en transfert thermique par rayonnement entre la couverture de vitre et le ciel

Q_3 : Puissance échangée en par transfert thermique convection entre la vitre et l'air ambiant.

Q_4 : Puissance échangée en transfert thermique par rayonnement entre la couverture de vitre et le sol

Q5 : Puissance échangée en transfert thermique par conduction entre

Q6 : Puissance échangée en transfert thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre

Q7 : Puissance échangée en transfert thermique par convection entre le fluide caloporteur et la vitre.

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

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

$$M_v C_{p_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5$$

$$M_v C_{p_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \alpha_{ve} S G + h r_{ve-ciel} S (T_{ciel} - T_{ve}) + h c_{ve-amb} S (T_{amb} - T_{ve}) + h r_{ve-sol} S (T_{sol} - T_{ve}) - U_v S (T_{ve} - T_{vi})$$

(III.12)

➤ *Au niveau du vitrage (coté lame d'air):*

$$M_v C_{p_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = Q_5 + Q_6 + Q_7$$

$$M_v C_{p_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = U_v S (T_{ve} - T_{vi}) - h r_{vi-abs} S (T_{abs} - T_{vi}) - h c_{vi-f} S (T_f - T_{vi}) \quad (III.13)$$

III.5.2 Pour le fluide caloporteur l'air (indice f)

Le fluide caloporteur (air) échange de la chaleur avec l'absorbeur et la vitre.

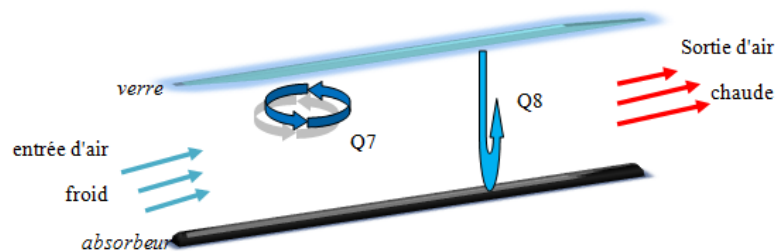


Figure III.5: Bilan énergétique au niveau du fluide caloporteur

Où :

Q8: Puissance échangée en transfert thermique par convection entre l'absorbeur et vitre

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

$$M_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = Q_7 - Q_8$$

$$M_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = hc_{vi_f} S (T_{vi} - T_f) - hc_{f_abs} S (T_{abs} - T_{vi})$$

On a: $\dot{m} = M/t = \rho v/t$ et $\dot{x} = L/x$ donc :

$$\dot{m}_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dX} = hc_{vi_f} S (T_{vi} - T_f) - hc_{f_abs} S (T_{abs} - T_{vi}) \quad (III.14)$$

III.5.3 Au niveau de l'absorbeur (indice abs)

L'absorbeur est la principale pièce maîtresse du capteur ; il doit absorber un maximum d'énergie afin d'augmenter la température de l'air.

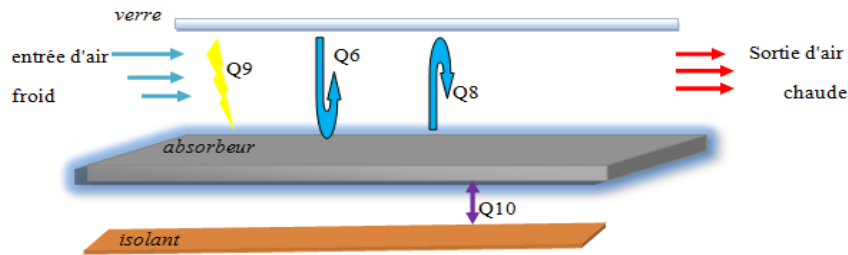


Figure III.6: Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante

Où :

Q_9 : Puissance de rayonnement solaire incident sur l'absorbeur

Q_{10} : Puissance échangée en transfert thermique par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.

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

$$M_{abs} C_{p_{abs}} \frac{dT_{abs}}{dt} = Q_9 + Q_6 - Q_8 - Q_{10}$$

$$M_{abs} C_{p_{abs}} \frac{dT_{abs}}{dt} = \alpha_{abs} \tau_v S G + hr_{vi_abs} S (T_{vi} - T_{abs}) - hc_{f_abs} S (T_f - T_{abs}) - U_{abs} S (T_{abs} - T_{isol}) \quad (III.15)$$

III.5.4 Au niveau de l'isolant (indice isol)

Dans cette couche isolante, le transfert thermique est faible, mais il existe sous forme convective et par rayonnement.

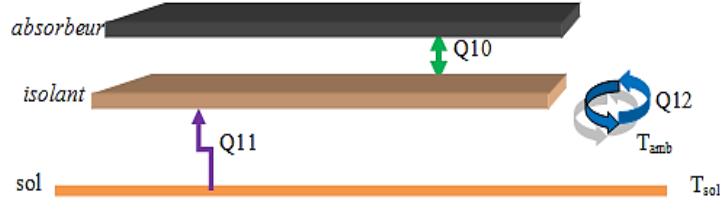


Figure III.7: Bilan énergétique au niveau de l'isolant

Où : Q_{11} : Puissance échangée en transfert thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol.

Q_{12} : Puissance échangée en transfert thermique par convection entre l'isolant et l'air ambiant

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

$$M_{isol}Cp_{isol}\frac{dT_{isol}}{dt} = Q_{10} + Q_{11} - Q_{12}$$

$$M_{isol}Cp_{isol}\frac{dT_{isol}}{dt} = U_{abs}S(T_{abs} - T_{isol}) + hr_{isol_sol}S(T_{isol} - T_{sol}) - hc_{isol_amb}S(T_{isol} - T_{amb}) \quad (III.16)$$

III.5.5 Système d'équations globales

D'après les équations (III.12), (III. 13), (III.14), (III.15), (III.16), on peut regrouper le système d'équations (S1) suivant :

$$S \left\{ \begin{aligned} M_v Cp_v \frac{dT_{ve}}{dt} &= \alpha_{ve} SG + hr_{ve_ciel} S(T_{ciel} - T_{ve}) + hc_{ve_amb} S(T_{amb} - T_{ve}) + hr_{ve_sol} S(T_{sol} - T_{ve}) \\ &- U_v S(T_{ve} - T_{vi}) S \\ M_v Cp_v \frac{dT_{vi}}{dt} &= U_v S(T_{ve} - T_{vi}) - hr_{vi_abs} S(T_{abs} - T_{vi}) - hc_{vi_f} S(T_f - T_{vi}) \\ \dot{m}_f Cp_f \frac{dT_f}{dx} &= hc_{vi_f} S(T_{vi} - T_f) - hc_{f_abs} S(T_{abs} - T_{vi}) \\ M_{abs} Cp_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} &= \alpha_{abs} \tau_v SG + hr_{vi_abs} S(T_{vi} - T_{abs}) - hc_{f_abs} S(T_f - T_{abs}) - U_{abs} S(T_{abs} - T_{isol}) \\ M_{isol} Cp_{isol} \frac{dT_{isol}}{dt} &= U_{abs} S(T_{abs} - T_{isol}) + hr_{isol_sol} S(T_{isol} - T_{sol}) - hc_{isol_amb} S(T_{isol} - T_{amb}) \end{aligned} \right.$$

III.6 Expressions des coefficients de transfert

III.6.1 Échange thermique par rayonnement

❖ Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la voûte céleste :

$$hr_{ve-ciel} = \varepsilon_v \sigma (T_{ve} - T_{ciel}) (T_{ve} - T_{ciel})^2 \quad (\text{III.17})$$

Où : $hr_{ve-ciel}$ en $W/m^2.k$;

ε_v : Émissivité de la couche du verre ;

σ : Constante de STEFAN-BOLTZMANN ($W/m^2. K^4$) $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$.

La température équivalente du ciel est donnée par la relation de SWINBANK [1]

$$T_{ciel} = 0,0552 \cdot T_{amb}^{3/2} \quad (\text{III.18})$$

Une autre relation utilisée par SARHADDI F et al [2] :

$$T_{ciel} = T_{amb} + 6 \quad (\text{III.19})$$

❖ Coefficient de transfert radiatif entre la vitre le sol :

$$hr_{ve-sol} = \varepsilon_v \sigma (T_{ve} - T_{sol}) (T_{ve} - T_{sol})^2 \quad (\text{III.20})$$

$$\text{Où: } T_{sol} = T_{amb} + 2 \quad (\text{III.21})$$

❖ Coefficient de transfert radiatif entre la plaque absorbante et la vitre :

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

$$hr_{vi-abs} = \sigma \frac{(T_{vi} - T_{abs})(T_{vi} - T_{abs})^2}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{abs}} - 1} \quad (\text{III.22})$$

ε_{abs} : Émissivité de la couche de l'absorbeur ;

❖ Coefficient de transfert radiatif entre l'isolant et le sol.

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

$$hr_{isol-sol} = \varepsilon_v \sigma (T_{isol} - T_{sol}) (T_{isol} - T_{sol})^2 \quad (\text{III.23})$$

III.6.2 Echanges thermiques par convection

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

- ❖ Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'air ambiant et entre l'isolant et l'air ambiant : D'après la relation de **HOTTEL** et **WOERTZ** [3]:

$$h_{C_{ve_amb}} = h_{C_{isol_amb}} = 5.7 + 3.86 * V_{vent} \quad (III.24)$$

V_{vent} : La vitesse du vent(m/s).

- ❖ Coefficient de transfert convectif entre le vitrage et le fluide :

$$h_{C_{vi-f}} = \frac{K_{air}}{l} Nu_v \quad (III.25)$$

- ❖ Coefficient de transfert convectif entre le fluide et la plaque de l'absorbeur :

$$h_{C_{f-abs}} = \frac{K_{air}}{l} Nu_{abs} \quad (III.26)$$

- **Donnant le nombre de Nusselt :**

$$Nu_i = 1.440 \left(1 - \frac{1708(1.8 \sin(\beta))^{1.6}}{Ra_i \cos(\beta)} \right) \left(1 - \frac{1708}{Ra_i \cos(\beta)} \right) + \left(\frac{Ra_i \cos(\beta)}{5830} \right)^{0.666} - 1 \quad (III.27)$$

$$Pr = \frac{u_f C_{pF}}{k_f} \quad Gr_i = \frac{g \Delta T l^3 \rho^2 \beta t}{u^2} \quad Ra_i = Pr \cdot Gr_i = \left(1 - \frac{g \cdot y \cdot (T_{abs} - T_v) \cdot l^3 \cdot \rho}{\theta^3 \cdot D} \right)$$

sont Respectivement le nombre de **Reynolds**, nombre de **Prandtl** et le nombre de **Graetz**.

ρ : Masse volumique du fluide (**Kg/m³**),

u : Viscosité dynamique du fluide(**Kg/m. s**),

C_p : Capacité calorifique massique du fluide à pression constante en(**J/Kg. K**) .

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

Deux plaques sont inclinées d'un angle β . $0^\circ < \beta < 75^\circ$ par rapporta l'horizontale

III.6.3 Échange thermique par conduction

Cet échange s'effectue à travers les corps solides à cause d'un gradient de température.

- ❖ Le coefficient d'échange thermique par conduction au niveau de la couche du verre

$$U_v = \frac{K_v}{e_v}$$

k_v : Conductivité thermique du verre ($w.m^{-2} . ^\circ C^{-1}$)

e_v : Épaisseur du verre. (m)

- ❖ Le coefficient d'échange thermique par conduction au niveau de la plaque absorbante :

$$U_{abs} = \frac{K_{abs}}{e_{abs}} \quad (III.28)$$

k_{abs} : Conductivité thermique du la plaque absorbante ($w.m^{-2} . ^\circ C^{-1}$)

e_{abs} : Épaisseur du la plaque absorbante. (m)

III.7 Calcul des pertes thermiques

Le flux solaire reçu sur le module du capteur solaire plan ne se convertit pas totalement en énergie thermique utiles. Une partie de ce rayonnement est perdue sous forme de chaleur et rayonnement, au niveau des surface arrière du module [4].

$$Q_p = Q_{p,av} + Q_{p,ar} \quad (III.29)$$

Où :

$$Q_{p,av} = S * U_{av} * (T_p - T_a)$$

$$Q_{p,ar} = S * U_{ar} * (T_p - T_a)$$

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

$$U_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{h_{rciel} + h_{rsol} + h_{camb}} + \frac{e_v}{K_v}} \quad (III.30)$$

$$U_{ar} = \frac{1}{R_3} = \frac{e_{abs}}{K_{abs}} \quad (III.31)$$

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

Finalement la puissance perdue sera donnée par :

$$Q_p = S * U_g * (T_p - T_a) \quad (III.32)$$

III.8 Modélisation des coefficients d'échanges thermiques

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

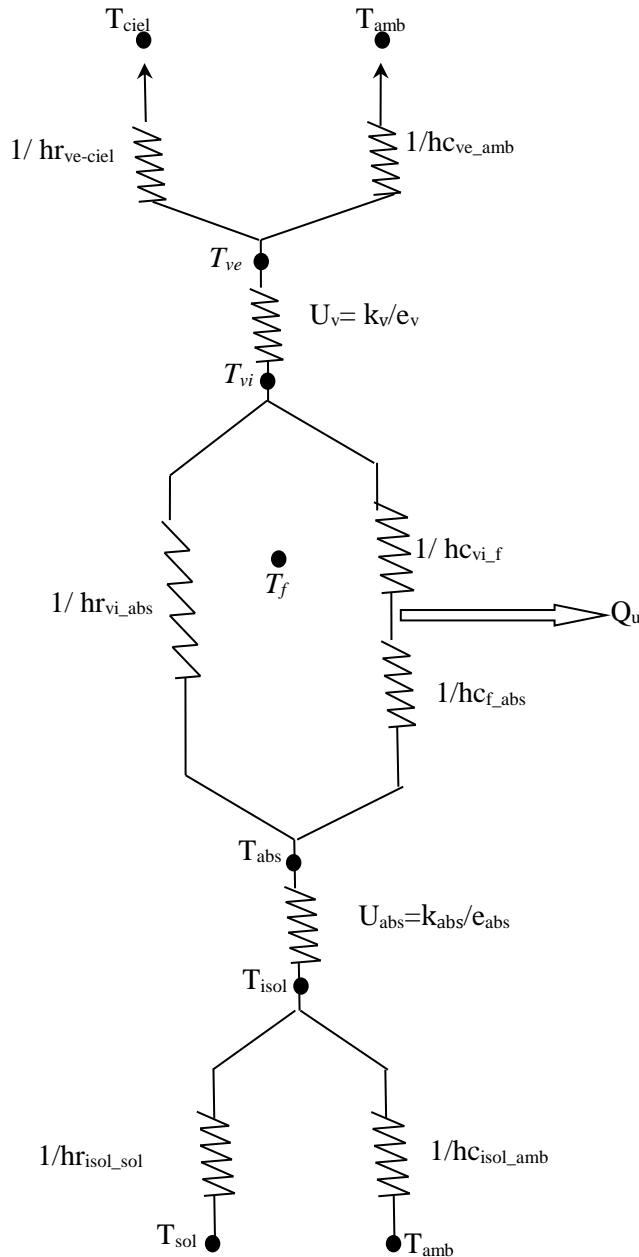


Figure III.8: Schéma électrique équivalent (capteur solaire à air)

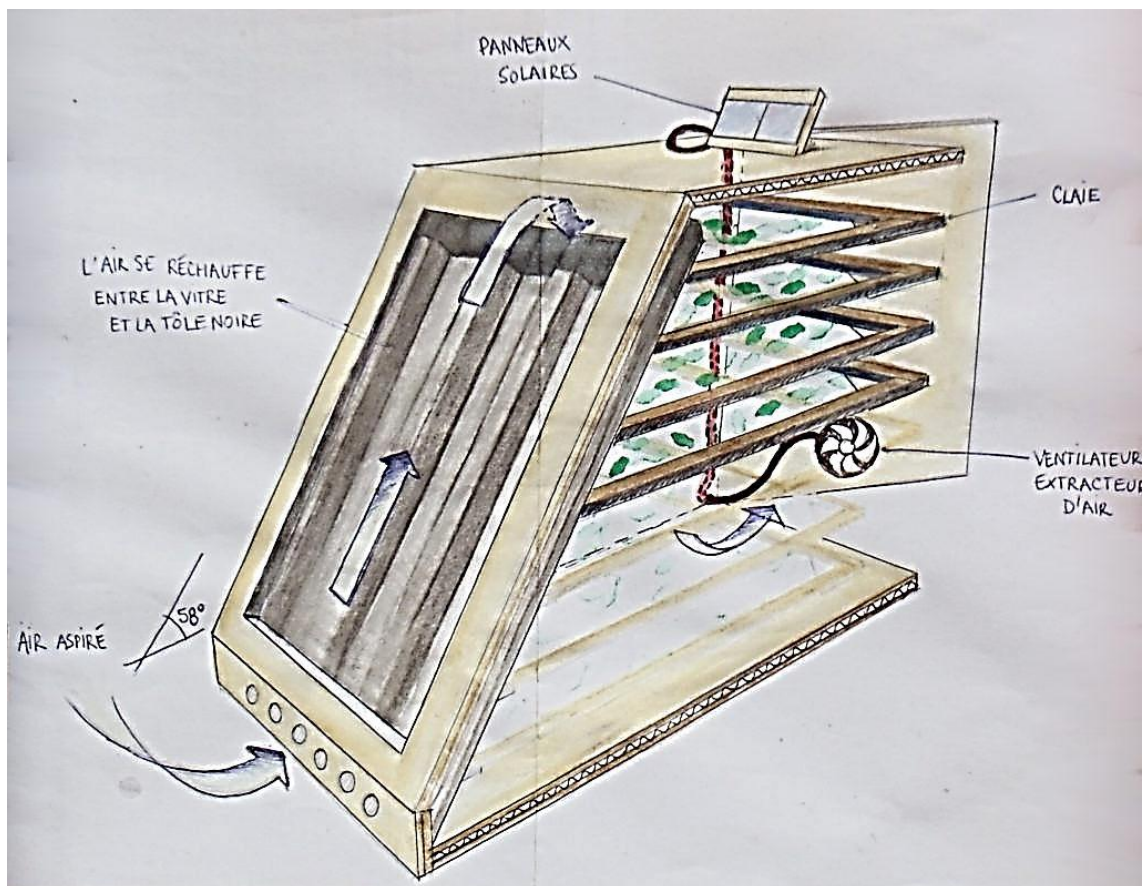
$1/hc$; $1/hr$; U_i Sont respectivement, les résistances thermiques par rayonnement, convection et conduction entre les différents composants du système.

II.11 Références bibliographiques

- [1] S. Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [2] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [3] KOU, Q., KLEIN S.A., BECKMAN, W.A., A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems, Solar Energy, vol. 64, pp. 33–40, 1998.
- [4] Younsi sidi ali, « Etude bidimensionnelle d'un capteur solaire à tube sous vide avec un échangeur en épingle », Mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2011, p.14-18.

Chapitre IV :

Résultats expérimentaux et interprétation



Séchoir fabriqué par David Mercereau [1].

IV.1 Introduction

Le séchage des aliments au soleil et à l'air libre est une pratique ancestrale qui ne donne pas toujours des produits de bonne qualité. Il est souhaitable et bien avantageux d'utiliser des systèmes de séchoirs solaires pour sauvegarder la qualité organoleptique du produit tout en profitant de cette source énergétique gratuite.

Après la description du séchoir solaire indirect conçu, ce chapitre présente également les premières expériences de séchage réalisé afin de déterminer la performance de notre séchoir solaire indirect

Dans ce chapitre on va présenter les étapes principales de la conception du séchoir solaire et ces principaux constituants, ainsi que les instruments de mesures utilisées lors de l'expérimentation.

À l'issue de l'étude expérimentale nous allons proposer différentes étapes de séchage.

- La forme de découpage de produit.
- La masse initiale du produit.
- La disposition du produit dans la chambre du séchoir.

IV.2 Conception et réalisation d'un séchoir solaire à convection forcée

IV.2.1 Description De l'unité pilote pour le séchage solaire

Le séchoir solaire indirect a été réalisé dans le but d'étudier le processus de séchage de produit agroalimentaires locaux surtout, il opère en convection forcée. Le système est simple, Il ne possède pas de source de chaleur auxiliaire. Le séchage est également possible en couches épaisses comme en couches minces.

Notre séchoir solaire a été réalisé en s'inspirant d'un modèle de séchoir décrit par **David Mercereau [1]** (Comme le montre la Figure IV.1), la boîte sera en bois de 1.5 cm, en forme de trapèze (grande base :70cm ; petite base :50 cm ; et hauteur :47cm.

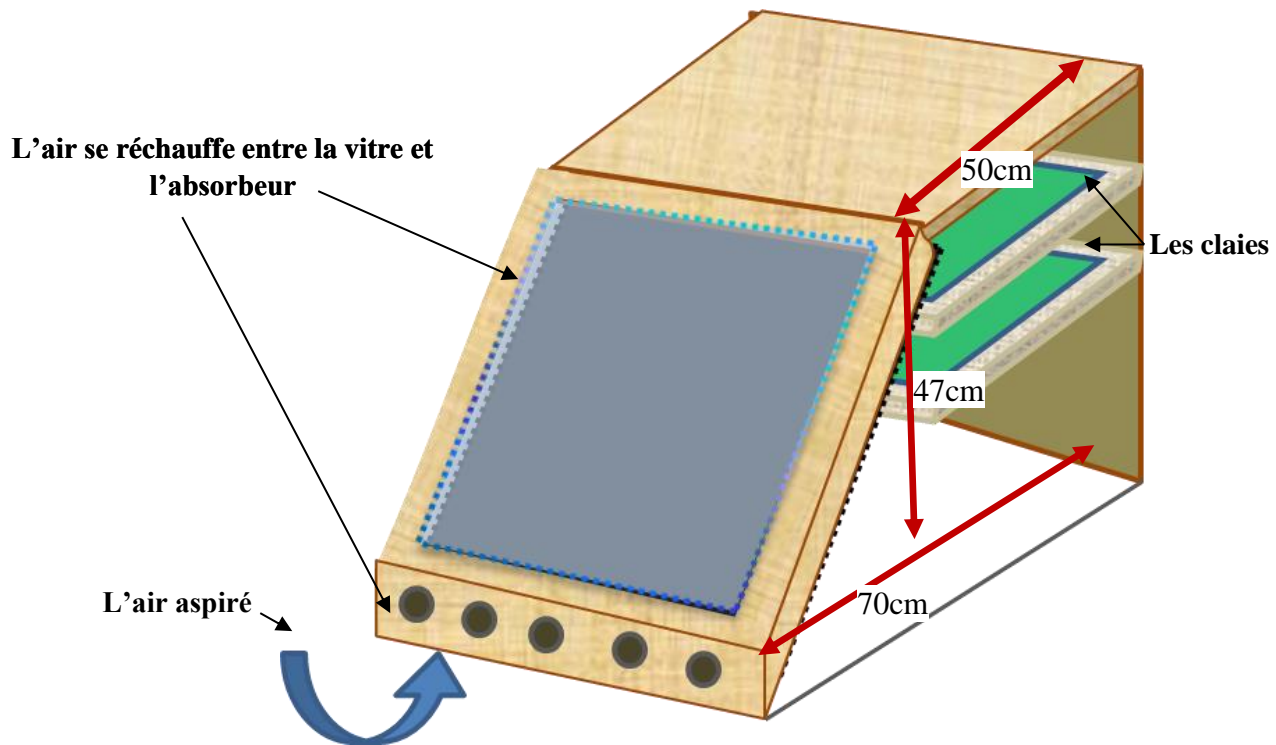


Figure IV.1 Schéma synoptique du séchoir solaire [1].

IV.2.2 Etapes suivies dans la construction du séchoir

L'unité comprend essentiellement trois parties : Un capteur plan à air, Armoire de séchage, et le ventilateur.

IV.2.2.1 Le capteur plan à air

Le capteur à air est constitué de :

- ✚ **La vitre** : La couverture du capteur est composée du verre de 3 mm d'épaisseur, aux dimensions (30x41), choisi pour ses bonnes qualités physiques et son faible coût.

Fabriquer un cadre en bois de 2 cm aux dimensions 34x45. Puis on effectue l'insertion du verre dans un cadre en assurant la fixation à l'aide de la colle.



Figure IV.2 Couverture du capteur solaire

- + **Absorbeur:** il va être peint (Peinture noire mat) en noir et va servir à capter la chaleur du soleil derrière la vitre pour faire monter la température du séchoir (même épaisseur que la vitre « 3mm »)



Figure IV.3 Plaque absorbante

IV.2.2.2 Armoire de Séchage

L'armoire de séchage vient s'emboîter sur le capteur par l'arrière, avec les dimensions suivantes : hauteur de 45 cm, largeur de 38 cm et une profondeur de 30 cm.



Figure IV.4 : Chambre de séchage

Cette chambre se comporte :

✚ Les claies

Les produits sont disposés à l'intérieure de la boîte sur trois (3) claies (rayons ou plateaux) de forme rectangulaire et ayant chacune une superficie de 0.2 m^2 ($40\text{cm} \times 50 \text{ cm}$). Composée chacune d'un cadre en bois sur lequel est fixé un tulle grillage vert en plastique (comme la moustiquaire), pour permettre le passage de l'air (mais il faut du temps et être soigneux dans la coupe d'angle, le collage et l'agrafage pour que cela soit résistant.).

Les claies sont distantes les unes des autres de 9 cm ; un espace suffisamment grand pour que la circulation de l'air puisse se faire de la meilleure façon.



Figure IV.5: Claie de séchage

- + **La Porte coulissante :** Elle permet l'accès aux claies. On monte la porte sur deux gonds qu'il faut incruster dans le dormant à l'aide d'un ciseau à bois.



Figure IV.6 La Porte de la chambre

IV.2.2.3 Le ventilateur

Ventilation forcée / mécanique

Dans un séchoir solaire, la ventilation s'effectue naturellement. En effet, l'air chaud plus léger monte et sort par les orifices situés dans la partie supérieure du séchoir. Il est remplacé par de l'air froid pénétrant par les orifices de la partie inférieure. Il s'établit ainsi un courant d'air. Les débits restent faibles : de 5 à 20 m³/h/m², et souvent insuffisants, Cela allonge le temps de séchage et diminue donc la productivité. Pour améliorer la convection naturelle, nous ajoutons un ventilateur électrique pour l'extraction de l'air humide. Le ventilateur assure un débit constant quelles que soient les conditions météorologiques.



Figure IV.7 : Le ventilateur utilisé dans le séchoir solaire

L'avant dernière étape est : l'installation des parties de séchoir solaire c à d l'assemblage du capteur, puis fixé par de la colle à bois et incliné de 58° comme le montre la Figure IV.8, avec une l'âme d'air (la distance entre l'absorbeur et le vitrage) de 4 cm.



Figure IV.8: Montage de capteur avec le séchoir solaire

Et Aussi on a fixé un ventilateur à l'arrière de la porte avec des vis come il est illustré à la Figure IV.9 ci-dessous :



Figure IV.9: Ventilateur

Et en fin ; On comble le vide avec un joint en silicone (qui se sépare pendant la découpe)

IV.3 Étude Expérimentale

Dans ce qui va suivre, on présente la procédure du test de caractérisation du prototype et les moyens utilisés pour réaliser le banc d'essais, puis les résultats préliminaires seront présentés, afin de tirer les remarques et les conclusions qui en découlent.

Où ; Le déroulement des expériences a été effectué au niveau de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (U.R.E.R/M.S)d'Adrar. Les paramètres caractérisant le site sont :

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)

IV.3.1 Paramètres mesures et instruments de mesures

Lors des essais expérimentaux, on utilise des thermocouples pour la mesure des différentes températures. L'ensemble des thermocouples est relié à un enregistreur appelé « acquisition de données » à carte mémoire de marque "FLUKE CORPORATION", qui fait les prélèvements à un pas de temps de mesure de 3 minutes pendant toute la durée du test.



Figure IV.10: L'acquisition de données utilisée pour la lecture et le stockage des paramètres mesurés

ET Pour les besoins de notre étude expérimentale, il nous faut sept (07) thermocouples de type K (Cromel-Alumel) pour mesurer la température de l'air à l'entrée et la sortie du capteur(entrée de séchoir) et la sortie du séchoir, ainsi que la température de la plaque d'absorption, la vitre et et à l'extérieur , sont implantés comme suit :

- Un thermocouple à l'entrée du capteur(l'entrée d'air).
- Un thermocouple à la sortie du capteur au niveau de la plaque absorbante.(l'entrée de la chambre de séchage) .
- Deux thermocouples au centre du capteur au niveau de la vitre(À l'intérieur et à l'exterieur).
- Un thermocouple au centre du capteur au niveau de la plaque absorbante.
- Un thermocouple à l'arrière du séchoir A côté du ventilateur.
- Un thermocouple pour mesurer la température ambiante.

➤ **Remarque:** Fixer deux morceaux de bois sur chacun des côtés pour surélever leséchoir au-dessus du sol, comme indiqué sur le schéma (pour facilité la circulation de l'air)



Figure IV.11 Raccordement des thermocouples dans le Séchoir solaire

IV.3.2 Résultats Obtenus.

Les tests sont déroulés durant une période de cinq (5) jours du mois du juillet 2020 (11, 12, 13,14 et 15 juillet).

Nous avons consacré la Journée du 14 juillet 2020 dans notre étude expérimentale, le sechoir solaire est équipé par des instruments de mesure pour mesurer les températures dans différents endroits en utilisant des thermocouples, ces thermocouples sont connectés et rassemblés à un système d'acquisition de données automatique de type Fluke 2625A Hydra. Toutes les mesures sont enregistrées avec un intervalle de temps de 3 minutes. Ces mesures ont été enregistrées de 06h00 jusqu'à 21h00. Les résultats sont présenté ci-dessous

IV.3.2.1 Variation temporelles des températures de la vitre (À l'intérieur et à l'extérieur).

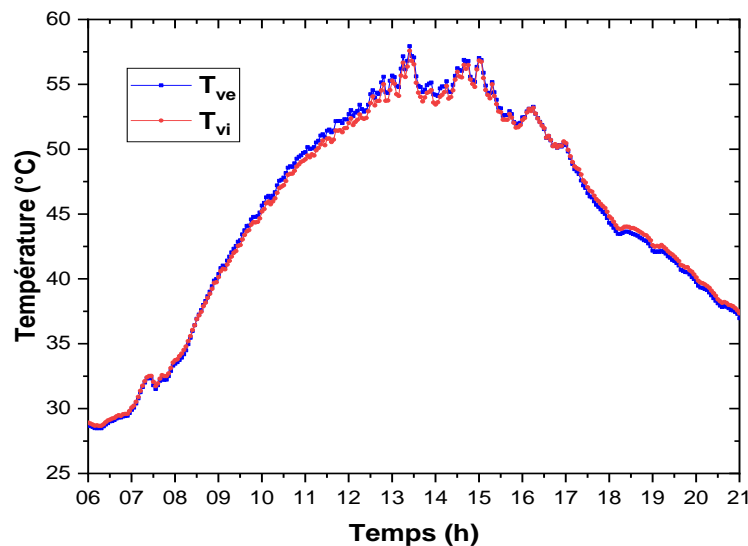


Figure IV.12: La variation temporelle des températures de la vitre

La figure ci-dessus est la courbe représentative de l'évolution temporelle des températures de la vitre externe et interne. Nous remarquons un léger écart entre les températures de la face intérieure et la face extérieure de la vitre à 10h00 jusqu'à 15h00 où la

température du côté intérieur de la vitre est supérieure à son côté extérieur à cause de l'emprisonnement du rayonnement I.R entre l'absorbeur et la face intérieure de la vitre.

IV.3.2.2-Variation temporelles de température de la plaque absorbant.

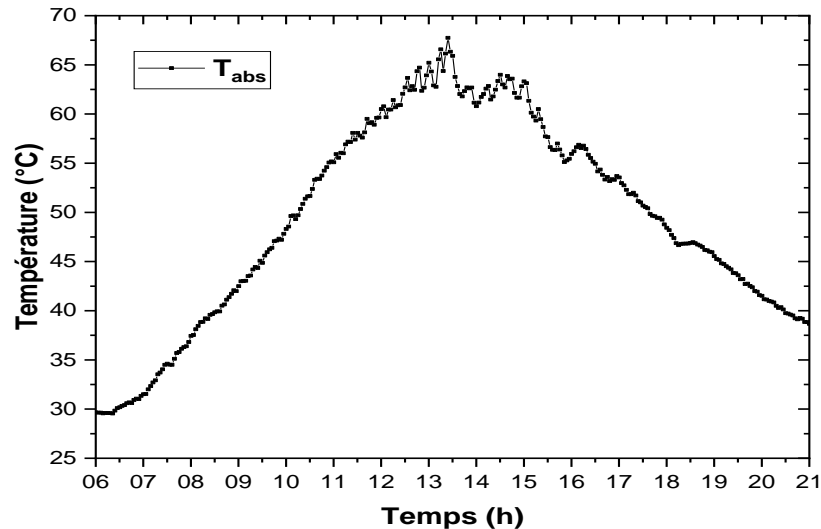


Figure IV.13: Variation temporelles de température de la plaque absorbant.

L'analyse de la figure IV.13 montre que la température de l'absorbeur augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales à 13h30, cela est dû principalement au rayonnement qui est maximum à midi (heure solaire), puis la température diminue au coucher du soleil. La figure IV.13 permet de remarquer que la température de l'absorbeur est la plus élevée, ce qui s'explique aisément par son facteur d'absorption solaire élevé. Mais, d'après les résultats des recherches précédentes, le rendement sera d'autant meilleur que la température de l'absorbeur sera proche de la température de l'ambiance. C'est pour cette raison qu'il ne faut pas rechercher de hautes températures du fluide caloporteur avec les capteurs solaires plans surtout pour notre application puisque on ne veut pas dépasser 42 ° pour l'air asséchant.

IV.3.2.3 Variation temporelles des températures entrées et sortie du capteur

Le rayonnement solaire transmis par la vitre ensuite absorbée par l'absorbeur et transformé en énergie thermique qui permet d'augmenter la température de l'air asséchant et atteint à l'entrée du séchoir des températures qui varient avec l'intensité solaire dans chaque

expérience. On remarque que l'augmentation de la température de l'air à la sortie du capteur est importante, quand les éclaircissements incidents sont élevés (entre 11h30 et 16h30), l'énergie solaire va augmenter la température de l'air à l'intérieur à des valeurs élevées à celle du milieu extérieur.

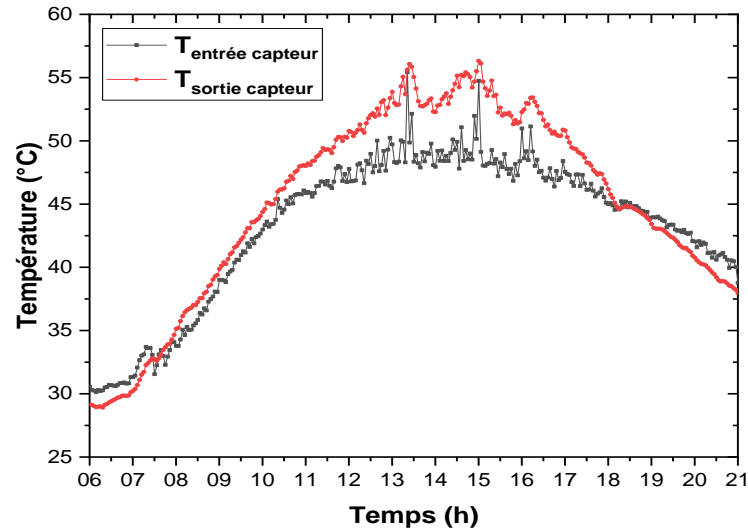


Figure IV.14: Variation temporelle des températures entrée et sortie du capteur

IV.3.2.4-Variation temporelle des températures entrées et sortie de la chambre

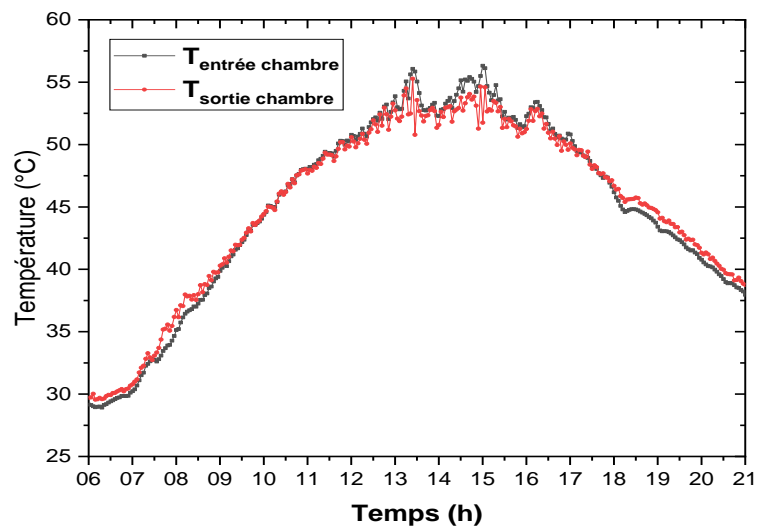


Figure IV.15: Variation temporelle des températures entrée et sortie de la chambre de séchage

Nous constatons sur le figure IV.15 que l'évolution des températures d'entrée et de sortie de l'air de la chambre prend presque la même allure (montent et descendent ensemble). Les deux températures atteignent leurs valeurs maximales entre 12 et 14 heures.

IV.3.2.5 Variation temporelles de température ambiante

On remarque dans Figure IV.16 une augmentation de la température pendant la journée et l'après-midi elle commence à diminuer.

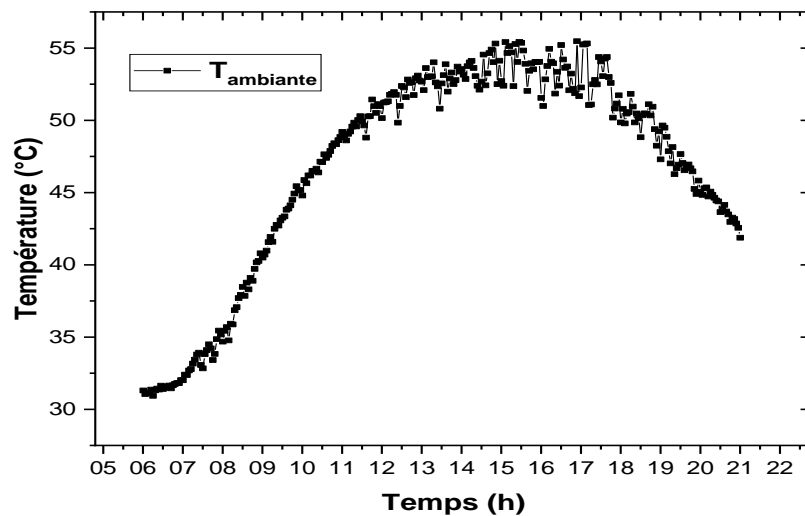


Figure IV.16: Variation temporelles de la température ambiante

IV.3.2.6 Variation temporelles des températures des différentes parties de séchoir solaire

Les données expérimentales présentées dans cette section décrivent le comportement thermique du séchoir solaire. Les principales températures décrivant le comportement thermique des différentes parties de notre séchoir solaire (l'absorbeur (T_{asb}), entrée capteur ($T_{entrée\ capteur}$); la vitre (T_{vi} , T_{ve}); entrée et sortie de chambre (T_{ech} , T_{sch}) et la température ambiante correspond au jour de test, sont illustrés dans la figure IV.15., D'après ces figures, on remarque que les différentes températures ont la même allure (forme d'une cloche), et atteignent leur optimum entre 11h00 et 14h30.

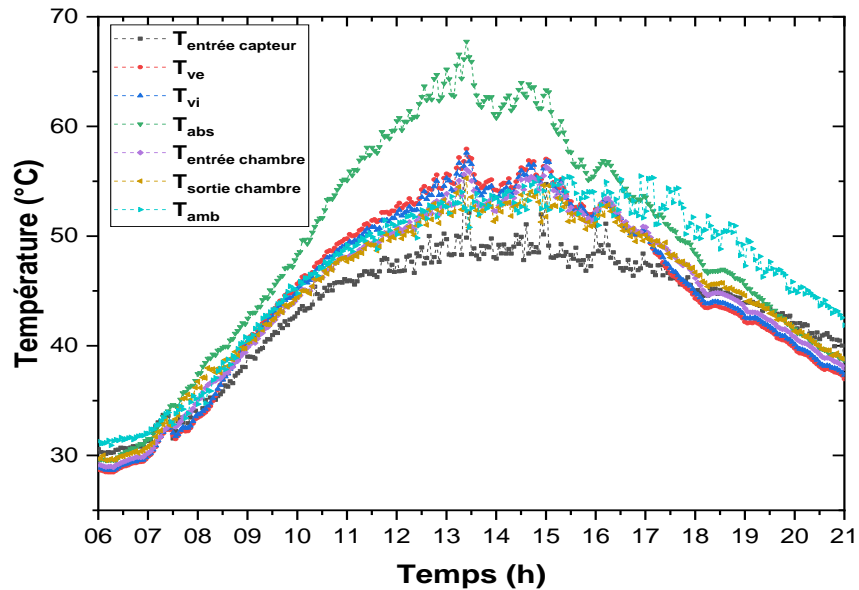


Figure IV.17: Evolution temporelle des températures des différentes composantes du séchoir

On remarque que la température la plus élevée est celle de l'absorbeur, résultant de la puissance importante qu'il absorbe. On trouve dans un ordre décroissant la température de la face intérieure de la vitre, ceci s'explique par l'absorption du rayonnement incident d'une part, et la chaleur cédée par l'absorbeur sous forme de rayonnement et de convection d'autre part. Puis la température de la vitre extérieure qui est légèrement inférieure à celle de la face intérieure, ceci est dû à son affectation par l'action du vent qui cause des déperditions thermiques par convection avec l'air ambiant. On déduit que le rayonnement solaire est le paramètre le plus influant sur le fonctionnement d'un séchoir solaire.

IV.4 Préparation des produits à sécher

Notre séchoir solaire terminé, comme le nom le suggère, fonctionne avec l'énergie solaire. Il doit donc être construit dans un endroit qui ne recevra aucun ombrage, d'arbres ou de construction, entre 7 heures le matin et 20 heures le soir. L'ombrage du séchoir aura pour effet de réduire l'accumulation de chaleur dans le séchoir.

Si le terrain comporte des dénivellations il sera préférable de construire le séchoir sur une élévation afin de assurer une bonne ventilation.



Figure IV.18: La Chambre de séchage

- Une balance électronique (taux d'erreur de ± 3 g) est utilisée pour la mesure de la masse du produit à sécher (figure 3.7). La stabilisation de la masse du produit indiquera la fin du processus de séchage. Ce qui signifie que le produit a atteint un état d'équilibre avec le milieu environnant (air de séchage).



Figure.19 : Balance électronique à affichage numérique.

IV.4.1 plantes à feuilles

IV.4.1.1 Séchage de la menthe

Les menthes forment un genre de plantes herbacées vivaces de la famille des Lamiacées, sous-famille des Nepetoideae, tribu des Mentheae, sous-tribu des Menthinae. Ce genre comprend de nombreuses espèces, qui quelles qu'elles soient, sauvages ou cultivées .

➤ la préparation du produit (menthe)

-La menthe a été prise des fermes locales

-élimination de la saleté

-les avons ensuite lavées manuellement avec de l'eau pure pour enlever les résidus de pesticides et d'autres polluants.

-les sécher avec soin d'un essuie propre,



Figure IV.20: Nettoyer les échantillons (la menthe)

➤ **Protocole expérimental**

- Etalage des feuilles de menthe sur les claies d'une manière qui laisse les feuilles intactes les unes sur les autres.
- Placer les claies dans le séchoir avec :
61.2 (g) dans la claie 2 et 61 (g) dans la claie 3.

Et à enregistrer l'évolution de la masse de la menthe d'un départ jusqu'à la fin de l'expérience de 12h00 à 7h30



Figure IV.21: Photo emplacement des claies dans le séchoir.

Au Figure IV.21 est donné l'évolution de sa masse (m, en g) au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps différents.

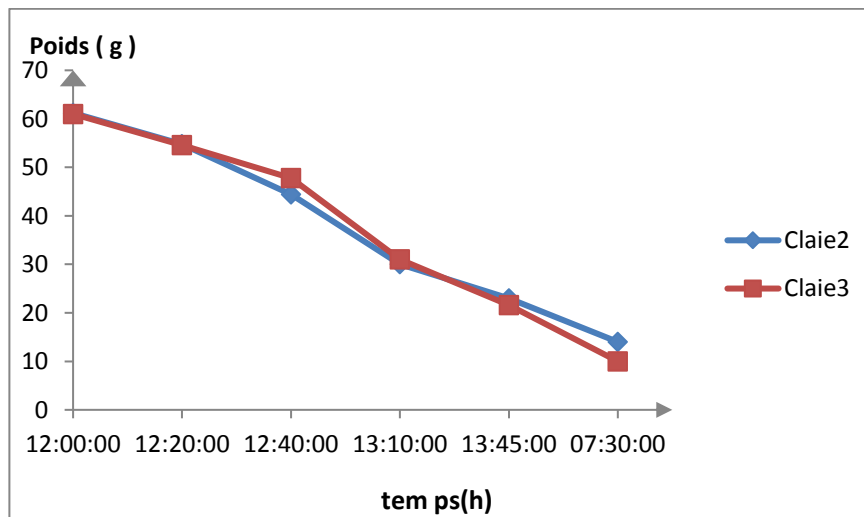


Figure IV.22: variation de la masse de la menthe durant le processus de séchage

La Figure IV.22 présente la variation de masse de la menthe durant le processus du séchage en fonction du temps sans appoint énergétique. La durée de séchage nécessaire pour atteindre la teneur en eau finale est d'environ 20 heures. Le taux faible la masse la menthe a

été observé au cours des six premières heures de séchage 12h00 -17h00 correspondant à 23g dans la claie 2 et 21g dans la claie 3. C'est à partir de 17h00 que la masse de la menthe devient moins importante et la valeur finale de la masse a été constatée à la fin du processus de séchage (14g dans la claie 2-10g dans la claie 3)

IV.4.1.2 Séchage de *Le henné*

Le henné (*Lawsonia inermis*) est un arbuste épineux de la famille des Lythracées pouvant atteindre 6 m de haut. Ses feuilles réduites en poudre contiennent une molécule particulière (2-hydroxy-1,4-naphthoquinone ; dite lawsone, du nom scientifique de l'arbuste). Elles produisent des teintures rouges, jaunes et orangées rose, utilisées en teinture textile et corporelle



Figure IV.23 : Représente de La henné

À la même des préparations et le Protocole expérimental en Séchage de la menthe.

➤ Nettoyer des échantillons et étalés sur les étagères les claies (44.7 (g) dans la claie 1; 33.4 (g) dans la claie 2; et 44.6 (g) dans la claie 3)



Figure IV.24 : Opération de pesage des échantillons du henné

- Sont placées des claies dans le séchoir.



Figure IV.25 : Photo emplacement des claies dans le séchoir.

- Enregistrer l'évolution de masse de Le henné d'un départ jusqu'à la fin de l'expérience de 10h00 à 8h30.
Pendant la période de séchage, on mesure la masse de le henné au cours du temps.

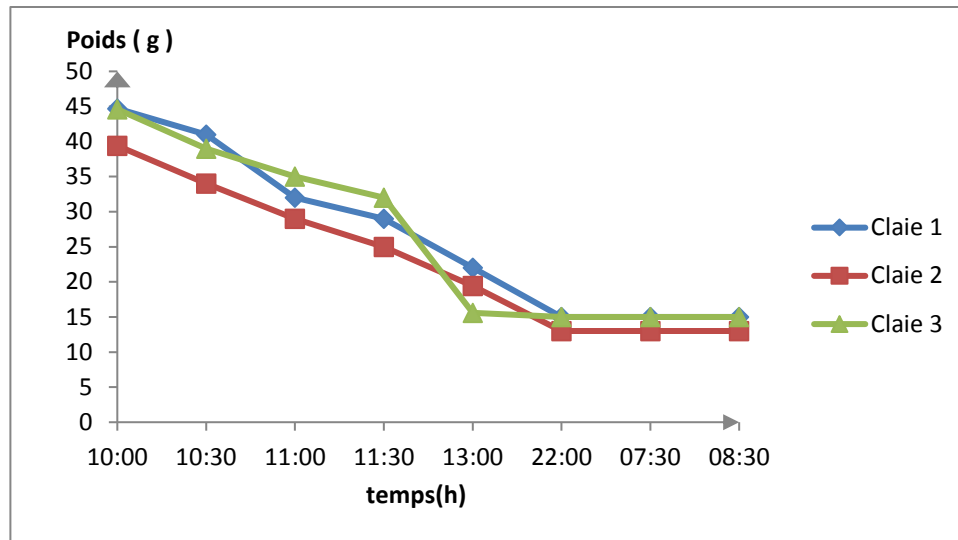


Figure IV.26: Evolution de la masse Le henné durant séchage

Nous pouvons voir sur la figure (III .26) que la durée e séchage est 10H en continue ,à partir de 10h00 jusqu'à 22h00 la masse de l'henné a atteint une diminution importante. Pour le reste du temps de séchage, la diminution de la masse est moins importante.

- ✚ L'emballage : Une fois l'opération de séchage terminée, Les produits séchés doivent être emballés aussi tôt que possible, les produits sont conditionnés dans des sacs en plastique à l'Appareil d'emballage sous vide. Pour protéger le produit, c'est-à-dire, conserver sans affecter les caractéristiques organoleptiques et nutritives.



Figure IV.27: l'Appareil à emballer sous vide



Figure IV.28 : Opération l'Emballage les produits (la menthe et Le henné)



Figure 29 : Les produits séchés emballés

Remarque : Sécher seulement les feuilles des herbes, pas la tige.

IV.4.2 Sécher les fruits

IV.4.2.1-Séchage de la pomme

La pomme est un fruit riche en fibres, Les pommiers sont cultivés mondialement et représentent l'espèce la plus cultivée du genre Malus.

➤ *Protocole expérimental:(pomme)*

- ❖ Choisir des pommes mûres mais fermes.
- ❖ Les pommes sont lavées avec de l'eau pour enlever les impuretés puis rincées et égouttées.
- ❖ Découper les pommes en rondelles de 8 mm d'épaisseur et les parties indésirables

Pouvant affecter la qualité du produit sont éliminées. (Enlever le centre)

Après la préparation du produit ((pomme) et on a étalé sur la grille du séchoir (146.7(g) dans la claie 1 et 187.7(g) dans la claie 3)



Figure IV.30: Opération de pesage des échantillons de pomme

IV.4.2.2 Séchage de La banane

➤ Protocole expérimental: (banane)

À la même le Protocole expérimental en Séchage de la pomme, la banane, et le fruit le plus simple à préparer. Il suffit tout d'abord de peler la banane. Ensuite il est possible de la sécher entière, coupée en deux en longueur ou en tranches d'environ 1cm de large. On met rondelles de bananes sur la claie 2 (284.4g).

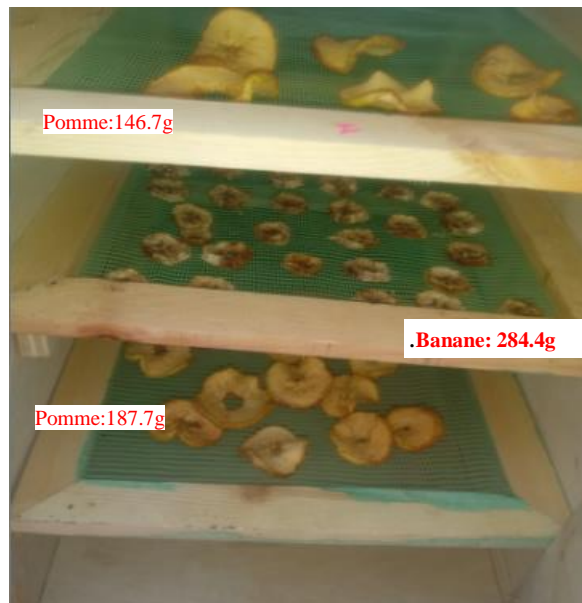


Figure IV.31: Séchage par séchoir

Pendant la période de séchage, on mesure la masse des fruits au cours du temps.

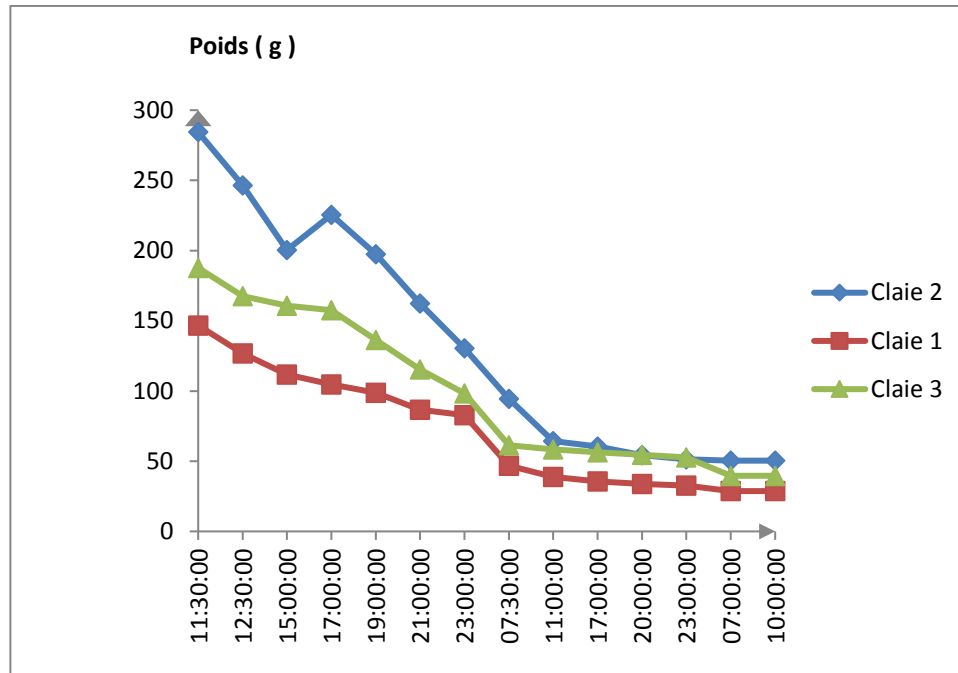


Figure IV.32: Evolution de la masse la pomme et la banane durant séchage

Les évolutions de perte de masse la pomme, et de la banane sont montrées sur le figure IV.32. Son durant séchage dure 50 heures. On remarque La masse initiale de la pomme est 246.7g en Claie 1 et 187.7g en Claie 3 Tandis que celle la banane est de l'ordre de 284.4g Au début de la Séchage. Nous remarquons également que la masse de la pomme commence à diminuer progressivement après à 19h00 ; avoir atteint presque 98.7g en Claie 1 et 187.7g en Claie 3 alors que la banane,157.6g.

D'après les figures de perte de masse finale pour une durée de séchage identique est 13(%) par rapport à la pomme ; et 17 (%) par rapport à la banane

Nous pouvons conclure que la disposition du produit dans la chambre a une influence importante sur sa température, par contre, lorsque les claies sont distants depuis l'entrée de l'air asséchant, se manifeste par des pertes considérables de la chaleur qui est absorbée par les composants de l'enceinte (claie, support de la claie...etc.), donc une diminution dans la quantité de chaleur qui devrait être absorbée par le produit qui se traduit par une faible évaporation d'eau contenue sous forme d'humidité dans la matière.

✚ Comment savoir si mes fruits sont bien séchés ?

Pour tester si vos fruits soient bien séchés, vous pouvez sortir un morceau du séchoir et le couper au milieu, car c'est toujours au centre des morceaux que le séchage est le plus lent. Il faut qu'il n'y a plus de chair fraîche et que l'intérieur du fruit semble sec (si vous appuyez dessus qu'il n'y ai pas de jus qui sorte).et il faut les conserver dans un endroit sec et à l'abri de la lumière. Le meilleur moyen est de mettre vos fruits séchés dans des bocaux en verre qui ferment hermétiquement.



Figure IV.33: Conservation des fruits séchés

IV.5 CONCLUSION

Le séchage des aliments améliore leur durée de vie et minimise les pertes durant le stockage, et diminue leur coût de transport.

Dans le but de bien maîtriser les techniques de séchage, nous avons procédé à la réalisation d'un séchoir solaire et de connaître les modifications et les corrections qu'il faut apporter à cette réalisation. Dans ce cadre, nous allons présenter ce travail. Nous avons opté pour le séchoir solaire indirect, vu les avantages qu'il présente et essentiellement sa caractéristique de conserver la qualité du produit séché telles que sa couleur, saveur et sa valeur nutritionnelle.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes suivies dans la réalisation du séchoir solaire, avec le choix du matériau et des dimensions, ainsi que le coût (voir le tableau A.1).

IV.6 Références bibliographiques

[1] <https://david.mercereau.info/fabriquer-un-sechoir-solaire/>

Conclusion générale et perspective

Conclusion générale et perspective

La présente étude nous a permis de réaliser un séchoir solaire domestique, construit dans la région d'Adrar-Algérie, utilisant des matériaux localement disponibles ; pour le séchage des produits agroalimentaires, notamment l'henné, la menthe.....

On s'est intéressé à suivre l'évolution de certains paramètres de performances du séchage solaire indirect par convection forcée de l'air chaud qui est assuré par un capteur solaire plan à air.

La partie expérimentale est basée sur le séchage par l'énergie thermique solaire indirect des produits agro-alimentaires ; Les plantes à feuilles (menthe, henné) et les fruits (pomme, banane), dont l'objectif est de suivre durant la journée au cours du déroulement du processus, les courbes de l'évolution de la masse pour ces produits.

On établit ces courbes en fonction des paramètres suivants :

- ✚ Type du produit Plante feuillue ou fruit.
- ✚ La forme de découpage du produit.
- ✚ La variation de la masse initiale du produit.
- ✚ La variation de la disposition du produit par rapport à l'entrée de l'air asséchant dans la chambre de séchage.

L'analyse de la variation de ces paramètres a montré une influence sur la température, la teneur en eau et la vitesse de séchage du produit de tel sorte que :

- ✚ La forme de découpage du produit : l'épaisseur mince permet de faciliter le transfert de chaleur, d'autre part, la masse qui se manifeste par une vitesse de séchage rapide et atteindre par conséquent une faible teneur en eau dans une durée très courte.
- ✚ La variation de la masse initiale : le but de séchage est l'utilisation de l'énergie sous forme de chaleur pour éliminer l'eau contenue dans le produit.
- ✚ La variation de la disposition du produit par rapport à l'entrée de l'air asséchant dans la chambre de séchage : Les plateaux inférieurs sèchent plus vite que les plateaux supérieurs

Cette étude nous ramène à conclure que, le contrôle des paramètres étudiés nous donne une augmentation dans la vitesse de séchage et par conséquent la possibilité d'améliorer les performances de ces procédés.

Si on prend en considération les paramètres précédents, on peut améliorer notre dispositif de séchage solaire indirect. Et même on peut influencer sur la durée de séchage qui dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer, la masse du produit, la vitesse de l'air asséchant, ainsi que sa température.

Le séchoir solaire à convection forcée mis au point présente actuellement des avantages certains, comme la rapidité du séchage, la facilité d'installation, il est simple à fabriquer et à démonter et surtout que l'opération de séchage ne nécessite, en l'occurrence, aucune dépense énergétique supplémentaire, c'est complètement gratuit (le soleil). Toutefois, il possède quelques désavantages, comme par exemple des pertes de chaleur au niveau du collecteur et surtout la dépendance énergétique (électricité). D'où la nécessité de la mise en place d'un système photovoltaïque (aération efficace, silencieuse et permanente sans aucun raccordement électrique avec un ventilateur aérateur solaire).

Nous suggérons aussi,

- ❖ Faire varier l'inclinaison du capteur pour voir son effet sur les résultats.
- ❖ Prévoir un appareillage bien dimensionné en fonction d'un ensemble de produits à sécher, notamment les produits en surproduction qui demandent ce type de traitement.
- ❖ L'orientation moderne de la consommation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales se dirige vers les produits quasi-biologiques dans notre pays on commence à développer ces techniques modernes économiques.

La conservation des aliments par le séchoir garde les vitamines et les nutriments de ce que nous mangeons. Si Les OGM hypothèquent l'avenir de l'humanité, les conservateurs chimiques et radioactifs l'empoisonnent au quotidien. Nous devons aussi lutter contre tout empoisonnement qui s'attaque à l'intégrité de notre vie.

Annexe

Les matériels	Dimension (cm)			Prix (DA)
	Longueur	Largeur	Hauteur	
Plaque de bois	50	70	47	3000
Vitres ordinaire	30	41	—	200
La tôle acier	30	41.5	—	300
Cadres des claies(x3)	40	50	—	300
Ventilateur	—	—	—	800
Appareil de silicone	—	—	—	250
Colle silicone transparente	—	—	—	300
Colle AB	—	—	—	250
Vernis	—	—	—	300
Pinceau	—	—	—	140
Huile de bois	—	—	—	60
Pigment noire				120
vis	—	—	—	20
Main d'œuvre				1050
Coût total				7090

Tableau A.1: étude technico-économique du séchoir solaire