

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

**FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE
MECANIQUE**

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables en mécanique

Thème

**Etude d'un sécheur solaire utilisant le sel
comme produit de stockage**

Devant le jury composé de :

Dr. Louini .Abdel Djalil

Dr. NADIR .NADIA

Dr. KHECHANA .M

Dr. AOUN .Y

Président

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Présenté par :

ABBASSI AHMED

KHATROUI RAYANE

ABDESSADOK HOUSSNI

BARIKI KAIS

2022-2023

Remerciement

Remerciements à Dieu - le tout puissant - qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail .Nous remercions particulièrement nos promoteurs **Dr. AOUN Y.** et **Dr. KHECHANA M.** pour leurs dévouements exceptionnels, leurs précieuses directives et leurs suivis constants.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres examinateurs du jury qui nous fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble des enseignants et collègues de notre promotion, qui nous ont aidé à réaliser ce modeste travail

ABBASSI AHMED
KHATROUI RAYANE
ABDESSADOK HOUSSNI
BARIKI KAIS

Dédicace

Nous consacrons ce modeste travail à :

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

*A toute la famille : **ABBASI***

*A toute la famille : **KHATROUI***

*A toute la famille : **ABDESSADOK***

*A toute la famille : **BARIKI***

Tous nos amis

*A tous mes camarades de la promotion 2022/2023 pour les bons moments
passés ensemble.*

Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin.

Résumé :

Traditionnellement, les agriculteurs font sécher leurs produits agricoles au soleil à l'air libre (séchage de poivrons, de tomates, etc.), mais cette technique expose l'aliment à des risques d'altération par le rayonnement ultraviolet, de détérioration de sa qualité due à la poussière, aux attaques d'insectes, etc... C'est ainsi qu'a été créé Le séchoir pour résoudre ce problème et faire en sorte que les produits agricoles conservent leur couleur et leurs ingrédients en les séchant à l'intérieur d'un séchoir direct sous un récipient hermétique.

Parmi les améliorations utilisées figure l'utilisation de matériaux de stockage, et parmi les matériaux de stockage utilisés dans cette étude se trouve le sel, où différentes quantités de sel sont utilisées dans différentes tailles comme matériaux de stockage. A cet effet, nous avons utilisé le séchoir solaire à plat composé de trois sections, selon deux états, l'un étant au sel et l'autre au sel avec chicanes croisées. Fabriqué au niveau du laboratoire des énergies renouvelables du Département de Génie Mécanique. Enfin, on ajoute, au fond de chaque chambre, un ventilateur qui assure une augmentation du débit de l'air entrant dans chaque compartiment on met un volume de sel d'une granulométrie bien définie puis on compare les capacités de stockage de chaque compartiment.

Mots-clés : capteur plan, baffles croisés, énergie solaire, cinétique de séchage par convection, ensoleillement global, séchage des produits alimentaires, stockage, sel, menthe.

Abstract:

Traditionally, farmers dry their agricultural products under the sun in the open air (drying peppers, tomatoes, etc.), but this technique exposes the food to the risk of alteration by ultraviolet radiation, deterioration of its quality due to dust, insect attacks, etc... Thus it was created The dryer to solve this problem and to make agricultural products maintain their color and ingredients by drying them inside a direct dryer under an airtight container.

Among the improvements that are used is the use of storage materials, and among the storage materials used in this study is salt, where different quantities of salt are used in different sizes as storage materials. For this purpose, we used the flatbed solar dryer consisting of three sections, according to two states, one being salt and the other being salt with cross baffles. Manufactured at the level of the renewable energies laboratory of the Department of Mechanical Engineering. Finally, we added, at the bottom of each chamber, a fan that ensures an increase in the flow rate of the incoming air. In each compartment we put a volume of salt of a well-defined grain size and then we compare the storage capacities of each chamber.

Keywords: flat plate collector, cross baffles, solar energy, convection drying kinetics, global sunlight, drying of food products, storage, salt, mint.

ملخص:

تقليدياً، يقوم المزارعون بتجفيف منتجاتهم الزراعية تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق (تجفيف الفلفل والطماطم، وما إلى ذلك)، ولكن هذه التقنية تعرض الطعام لخطر التغيير بواسطة الأشعة فوق البنفسجية، وتدهور جودتها بسبب الغبار، وهجمات الحشرات، إلخ... وهكذا تم إنشاء المجفف لحل هذه المشكلة ولجعل المنتجات الزراعية تحافظ على لونها ومكوناتها عن طريق تجفيفها داخل مجفف مباشر تحت حاوية محكمة الإغلاق.

من بين تحسينات التي يتم استخدامها استعمال مواد التخزين ومن بين المواد التخزين المستعملة في هذه الدراسة الملح حيث يتم استخدام كميات مختلفة من الملح بأحجام مختلفة كمواد تخزين. لهذا الغرض، استخدمنا المجفف الشمسي المسطح المكون من ثلاث أقسام، تبعاً لحالتين أحدهما ملح ويليه ملح مع حواجز متقاطعة. المصنوع على مستوى معمل الطاقات المتجددة التابع لقسم الهندسة الميكانيكية. وفي الأخير، أضفنا، في الجزء السفلي من كل حجرة، مروحة تضمن زيادة التدفق معدل الهواء الداخل وفي كل حجرة نضع حجماً من الملح بحجم حبة محدد جيداً ثم نقارن السعات التخزينية لكل حجرة.

الكلمات المفتاحية: مجمع الألواح المسطحة، حواجز متقاطعة، الطاقة الشمسية، حركية التجفيف بالحمل الحراري، أشعة الشمس العالمية، تجفيف المنتجات الغذائية، التخزين، الملح، النعناع.

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Nomenclatures	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire	
I.1.Introduction.....	3
I.2. Soleil.....	3
I.3. L'énergie solaire.....	3
I.3.1. Les différents types d'énergie solaire.....	4
I.4. Présentation du soleil.....	4
I.4.1. Évolution.....	6
I.5. Gisement solaire.....	7
I.5.1. Cas du monde.....	7
I.5.2. Cas de L'Algérie.....	8
I.6. Présentation de la région d'expérimentation El-Oued.....	9
I.6.1. Espace géographique et milieu physique et climatique.....	9
I.6.2. Station météorologique de référence.....	10

I.7. Conclusion.....	11
----------------------	----

Chapitre II : Généralité sur les séchoirs solaires

II.1. Introduction.....	12
II.2. Généralité sur les séchoirs solaires.....	12
II.2.1 Séchage.....	12
II.2.2. Classification des séchoirs solaires.....	12
II.2.3. Les séchoirs solaires directs.....	13
II.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	13
II.2.3.2. Les séchoirs solaires indirects.....	13
II.2.3.2.1. Principe de fonctionnement.....	13
II.2.3.3. Les séchoirs hybrides.....	14
II.2.3.4. Les séchoirs mixtes.....	15
II.2.4. Domaine d'utilisation.....	15
II.2.5. Différents méthodes du séchage.....	15
II.3. Capteurs solaires thermiques.....	16
II.3.1. Capteurs à circulation de liquide.....	16
II.3.2. Définition capteurs solaires plans.....	17
II.3.3. Les types de capteurs solaires plans.....	17
II.3.3.1. Capteurs plan vitré.....	17
II.3.3.2. Capteurs plans non vitrés.....	18
II.3.3.3 Capteurs plans sous vide.....	18
II.3.4. Principe de fonctionnement.....	19

II.3.5. Les composants des capteurs solaires.....	20
II.3.5.1 Le vitrage (couvercle).....	20
II.3.5.2 Les polycarbonates.....	20
II.3.5.3 L'absorbeur.....	21
II.3.5.3.1 Différent revêtement utilisé.....	21
II.3.5.3.1.1 la peinture noire.....	21
II.3.5.3.1.2 Oxyde de chrome.....	21
II.3.5.3.1.3 Traitement sous vide.....	21
II.3.5.4 L'isolant.....	21
II.3.5.5 Le fluide caloporteur.....	22
II.3.5.6 Le boîtier.....	22
II.3.6 Principales catégories de capteurs solaires plans.....	22
II.4. Conclusion.....	22

Chapitre III : Etude du séchage utilisant le sel comme produit de stockage

III.1. Introduction.....	23
III.1.1. Fabrication du capteur et principe de fonctionnement.....	23
III.2. Présentation du capteur solaire plan.....	24
III.3. Fonctionnement de notre séchoir solaire comme système de séchage.....	25
III.4. Préparation du sel.....	25
III.4.1. Tamisage	25
III.5. Conception et réalisation du capteur solaire plan à air.....	26

III.5.1. Définition de la menthe et raison de son	27
III.5.2. Les chicanes	26
III.5.3.. Dispositifs de mesure des températures.....	33
III.6.Appareillages de mesures.....	29
III.6.1.Mesure de la température.....	29
III.6.2.Mesure de la vitesse de l'air.....	29
III.6.3. Mesure du rayonnement solaire global.....	29
III.7. Résultats et interprétations.....	30
Conclusion générale.	34
Référence bibliographique.....	35

Nomenclatures

Symbole	Désignation	Unité
S_0	Constante solaire	W/m^2
R_S	Rayon du soleil	Km
T_S	Température à la surface du soleil	K
σ	Constante de Stéphane-Boltzmann	$W/m^2.K^4$
D_{ST}	Distance terre-soleil	Km
φ	Latitude	Degré (°)
l	Longitude	Degré (°)
P_{moy}	Précipitations moyennes mensuelles	mm
H_{moy}	Humidité moyenne mensuelle	%
V_{moy}	Vitesses moyennes mensuel	Km/h
I_{moy}	Insolation moyenne mensuelle	h (heure)
E_{moy}	Evaporation moyenne mensuelle	mm
i	Angle d'incidence	Degré (°)
T_{pm}	Température portée absorbeur	°C
Q_{cd}	Flux de chaleur par conduction	W
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	m^2
λ	Conductivité thermique	$W/m.^{\circ}C$
x	Variable d'espace dans la direction du flux	m
Q_{cv}	Flux de chaleur par convection	W
h	Coefficient de convection	$W/m^2.K$
S	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide	m^2
T_p	Température de la paroi solide	°C
T_f	Température du fluide	°C
U_m	Vitesse moyenne du fluide	m/s
ρ	Masse volumique du fluide	Kg/m^3
C_p	Chaleur spécifique du fluide	$J/kg.^{\circ}C$
μ	Viscosité thermique du fluide	$Kg/m.s$
λ	Conductivité thermique du fluide	$W/m^2.^{\circ}C$
D	Dimension caractéristique de la surface d'échange	m
Q_r	Densité de flux de chaleur émis par le corps.	W/m^2

σ	Constante de Stefan-Boltzmann évaluée	$W/m^2.K^4$
T_p	Température de la paroi solide.	$^{\circ}C$
T_f	Température du fluide.	$^{\circ}C$
S	Aire de la surface.	m^2
P_v	Puissance rayonnée par le soleil et absorbée par la vitre.	W
A_v	Surface de la vitre.	m^2
G	Rayonnement solaire global incident.	W/m^2
q_{rav}	Quantité d'énergie cédée par l'absorbeur par rayonnement	W
q_{cva}	Quantité d'énergie cédée par l'absorbeur par convection	W
q_{rvc}	Quantité d'énergie par rayonnement vers le ciel	W
P_{ab}	Puissance rayonnée par le soleil, transmise par la vitre et absorbée par l'absorbeur	W/m^2
A_{ab}	Surface de l'absorbeur.	m^2
q_{caf}	Quantité d'énergie par convection au fluide caloporteur	W/m^2
q_{cav}	Quantité d'énergie par convection à la vitre	W/m^2
q_{rav}	Quantité d'énergie par rayonnement à la vitre.	W/m^2
q_{cdai}	Quantité d'énergie par conduction à l'isolant.	W/m^2
φ	Résistances thermiques.	W/m^2
q_{caf}	Quantité d'énergie par convection de l'absorbeur.	W
q_{cfi}	Quantité d'énergie par convection à l'isolant.	W
q_{cfi}	Quantité d'énergie par convection cédée par le fluide caloporteur.	W
q_{cdai}	Quantité d'énergie par conduction cédée par l'absorbeur.	W
q_{ris}	Quantité d'énergie par rayonnement au sol	W
q_{cia}	Quantité d'énergie par convection au milieu ambiant	W
P_{ab}	Puissance solaire arrivant sur le capteur.	W
P_u	Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.	W
A_c	Surface du capteur.	m^2
m	Débit massique de fluide.	Kg/s
c_p	Chaleur spécifique de fluide.	$J/kg.k$
T_{fs}	Température de sortie du fluide.	$^{\circ}C$
T_{fe}	Température d'entrée du fluide.	$^{\circ}C$

T_e	Température d'entrée du capteur	°C
T_s	Température de sortie du capteur	°C
T_{abs}	Température de l'absorbeur	°C
T_{amb}	Température de l'air ambiante	°C
V_e	Vitesse de l'air à l'entrée du capteur	m/s
V_s	Vitesse de l'air à la sortie du capteur	m/s
V_{amb}	Vitesse de l'air ambiant	m/s
η_i	Rendement instantané	%
α_v	Absorptivité de la vitre.	/
α_{ab}	Absorptivité de l'absorbeur.	/
τ_v	Transmissivité de la vitre.	/
ε	Emissivité thermique du matériau.	/

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

Figure I.1 : Flux de la lumière solaire.....	4
Figure I.2 : Structure du soleil.....	6
Figure I.3 : Cycle de vie du soleil.....	7
Figure I.4 : Distribution du potentiel de l'énergie solaire dans le monde.....	8
Figure I.5 : Insolation globale quotidiennement reçue sur le plan horizontal du territoire Algérien aux mois de Juillet et Décembre.....	9
Figure I.6 : Situation géographique de la wilaya d'El Oued Souf.....	10

Chapitre II : Généralité sur les séchoirs solaires

Figure II.1 : Différents types de séchoirs solaires de base.....	12
Figure II.2 : Boitier de séchage direct.....	13
Figure II.3 : Schéma descriptif d'un séchoir indirect.....	14
Figure II.4 : Schéma descriptif d'un séchoir mixte.....	15
Figure II.5 : Capteur solaire plan à air exposé au soleil.....	17
Figure II.6 : Capteurs solaire plan vitré.....	18
Figure II.7 : Capteur solaire plan non vitré.....	18
Figure II.8 : Capteur solaire à tube sous vide.....	19
Figure II.9 : Principe de fonctionnement.....	19
Figure I.10 : Composants d'un capteur solaire plan.....	20
Figure II.11 : Peinture noire sur absorbeur.....	21
Figure II.12 : Schéma des différentes pertes.....	22

Chapitre III : Etude du séchoir utilisant le sel comme produit de stockage

Figure III.1 : Dimensions base du capteur plan à air.....	29
Figure III.2 : Dimensions du capteur plan à air.....	29
Figure III.3 : Dimensions des chicanes croisée.....	31
Figure III.4 : Perte de masse de la menthe en fonction du temps pour les capteurs.....	35
Figure III.5 : Evolution des températures dans les 03 capteurs en fonction du temps.....	36

Liste des Photos

Photo.III.1 : Étapes de fabrication du capteur.....	24
Photo.III.2 : Composants du capteur.....	25
Photo.III.3 : de séchoir solaire utilisé.....	26
Photo.III.4 : du séchoir solaire utilisé.....	27
Photo.III.5 : montrant la peinture du sel dans le capteur à chicanes.....	27
Photo.III.6 : Plaque en verre.....	32
Photo.III.7 : du capteur solaire avec chicanes croisées.....	33
Photo.III.8 : du multimètre utilisé pour la mesure de la température ambiant.....	34
Photo.III.9 : du de l'Anémomètre Kestrel 1000.....	35
Photo.III.10 : du Pyranomètre (Pyranometer 4890.20 "Frederiksen").....	35

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil.....	5
Tableau I.2 : Potentiel solaire.....	8
Tableau I.3 : Caractéristiques géographiques de station climatique.....	10

Chapitre II : Généralité sur les séchoirs solaires

Tableau II.1 : Quelques exemples des méthodes de séchage.....	16
--	----

Chapitre III : Etude du séchoir utilisant le sel comme produit de séchage

Tableau III.1 : Composants du capteur solaire.....	26
---	----

Introduction générale

L'augmentation soudaine du prix du pétrole survenue en 1973 a suscité un intérêt humain pour les sources d'énergie renouvelables.

D'autre part, le réchauffement climatique provoqué par l'émission de gaz à effet de serre a conduit de nombreux pays à s'intéresser aux énergies propres [1].

Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative intéressante pour maintenir le confort humain et la qualité de l'air (elles ne produisent pas de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique). Pour répondre aux besoins énergétiques humains, les scientifiques et les gouvernements s'orientent vers le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables, où l'énergie solaire est au premier plan [2]. L'énergie solaire est l'énergie dégagée par le soleil par son rayonnement, direct ou diffusé dans l'atmosphère. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle du vent et de l'eau. Le règne végétal, dont dépend le règne animal, l'utilise également en le convertissant en énergie chimique via la photosynthèse. À l'exception de l'énergie nucléaire, géothermique et marémotrice, l'énergie solaire est la source de toute l'énergie sur Terre. Cette dernière est une énergie propre inépuisable qui peut être utilisée efficacement dans de nombreux systèmes thermiques [3].

Par divers procédés, l'énergie solaire peut être convertie en une autre forme d'énergie utile à l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Ainsi, l'expression « énergie solaire » est souvent utilisée pour désigner l'électricité ou la chaleur obtenue à partir de cette dernière.

L'un des outils utilisés pour exploiter l'énergie solaire est un collecteur d'air qui peut être utilisé dans de nombreuses applications nécessitant des températures basses et moyennes, telles que le chauffage des locaux, le séchage des produits agricoles, le séchage du bois, le séchage des briques, etc. [1].

L'un des problèmes fondamentaux de l'utilisation de l'énergie solaire est le faible échange thermique entre le fluide caloporteur et l'absorbeur du capteur solaire, et il est intéressant d'apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la réalisation et à l'expérimentation d'un capteur solaire plan à air. Nous présentons une série d'essais expérimentaux réalisés sur trois prototypes de capteurs solaires plats à air, d'une surface de captage de 0,6 mètre carré, conçus en laboratoire et testés dans la zone d'El Oued. Afin d'améliorer les performances des capteurs solaires plans en introduisant des déflecteurs rectangulaires perpendiculaires au flux et fixés par l'absorbeur du capteur, dans cette étude nous avons comparé le rendement calorifique des capteurs A avec les déflecteurs + et d d'un autre de fabrication similaire. Capteur sans les chicanes et sans (témoin) et un autre capteur similaire sans barrières et avec le témoin (sel).

Cette thèse est composée de trois chapitres :

Le premier chapitre : consacré à l'étude du champ solaire avec quelques concepts et définitions astronomiques couramment utilisés dans tout domaine lié au soleil, et l'étude de la météo dans le sud algérien (la vallée), où nous mènerons l'expérience.

Introduction Générale

Le deuxième chapitre : est consacré à l'étude des séchoirs solaires, de leurs différents composants, de leurs classifications, et des différents échanges thermiques qui sont introduits à l'intérieur du séchoir.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et à la réalisation de notre conception de séchoir solaire, il présente les principaux outils de mesure utilisés lors des tests sur le séchoir réalisé, et les différentes expérimentations installées avec le séchoir à différents jours comme tests.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.

I.1. Introduction :

Depuis Antiquité les hommes ont su capter et utiliser l'énergie solaire : les égyptiens connaissent effet de serre et Archimède a incendié la flotte Romaine à Syracuse en utilisant des miroirs plans polis et groupés de façon à former des miroirs concaves.

Les ressources énergétiques dont nous disposons sont classées en deux grandes catégories :

- Les énergies denses qui ont été, et sont encore, très utilisées bien que le cycle de transformation soit long. Pour ces énergies le faible coût des investissements compense le coût du combustible.
- Les énergies renouvelables, sont souvent diffuses et irrégulières. Elles sont gratuites mais au prix d'un surcoût d'investissement très élevé qui explique leur rentabilité médiocre. Cependant, ce handicap se réduit de plus en plus avec la hausse des prix des combustibles.

Depuis 2000 ans on utilise plus d'énergie fossile qu'il ne s'en produit, et certaines ressources apparaissent aujourd'hui limitées. Les réserves en pétrole et en gaz seront épuisées dans un avenir relativement proche (30 ans environ), la houille blanche est déjà très exploitée dans les pays industrialisés, les énergies marémotrices et géothermiques ne pourront fournir qu'un appoint très modeste sur les besoins futurs. Les possibilités énergétiques de la fission de l'atome sont très vastes et expliquent le développement rapide des centrales nucléaires, cependant ce type de conversion de l'énergie peut entraîner en cas de développement important un certain risque de pollution.

L'énergie solaire représente la seule source d'énergie dispensée à profusion et n'entraînant aucune pollution ; de plus c'est une énergie « importée », que nous recevons du soleil, C'est donc la seule énergie dont l'utilisation ne pourra pas modifier la température du globe. En contrepartie les limitations à l'emploi de l'énergie solaire sont nombreuses, elles proviennent surtout de son inconstance et de sa faible concentration [4, 5].

I.2. Soleil :

Il s'agit de l'étoile la plus proche du système solaire. Sa distance de la terre fait que la vie sur terre soit possible.

I.3. L'énergie solaire :

Par définition, l'énergie solaire est l'énergie dont la matière première est le soleil. Elle est gratuite, inépuisable et en plus disponible dans le monde entier. Cette source d'énergie est en plus propre, c'est-à-dire qu'elle n'émet aucun gaz à effet de serre. Depuis l'antiquité, on utilise l'énergie issue du soleil pour apporter de la chaleur et le maximum de lumière naturelle dans les maisons. L'architecture, l'orientation et les matériaux du bâtiment de manière à ce que

Celui-ci soit chauffé et éclairé par l'énergie solaire passive [6].

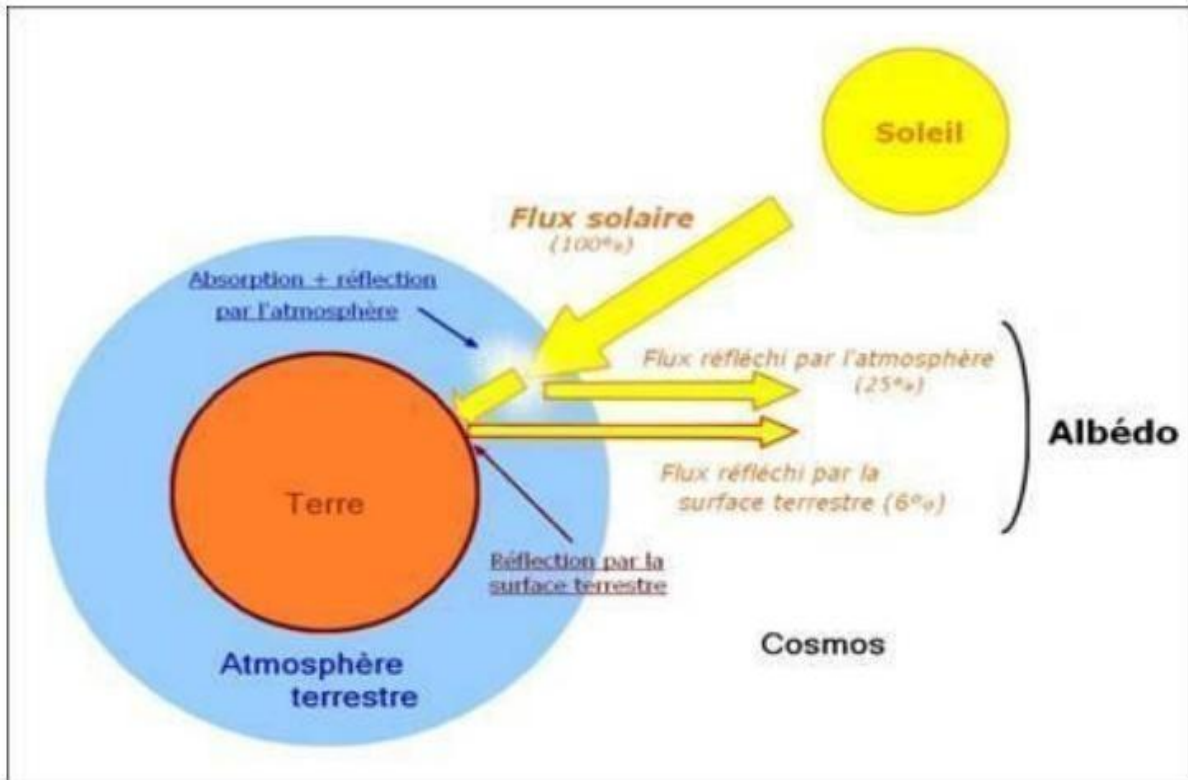


Figure I. 01 : Flux de la lumière solaire [7].

I.3.1. Les différents types d'énergie solaire :

On compte trois types d'énergie solaire catégorisés selon leurs méthodes de production [8] :

- L'énergie solaire thermique.
- L'énergie solaire photovoltaïque.
- L'énergie solaire thermodynamique.

I.4. Présentation du soleil :

Le soleil à une forme pseudo-sphérique, c'est une boule de gaz qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant représente plus de 100 éléments qui sont en fait tous les éléments chimiques connus.

Les principales caractéristiques du soleil sont listées sur le tableau (I.1) :

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}

Tableau (I.1) : Caractéristiques principales du soleil [9].

Le soleil est constitué de :

- Le noyau représentant 40% de sa masse totale, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par ses couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.104 km, elle présente les caractéristiques suivantes [10, 11] :
 - ✓ Une température de 15.106 °C.
 - ✓ Une densité est de 1015 kg/m³.
 - ✓ Une pression de 109 atmosphères.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [11, 12] :
 - Une épaisseur de 244160 km.
 - Une température variant de 10.106 °C à 50.104 °C.
- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes [10, 11] :
 - Une température comprise entre 50.104 °C à 6400 °C.
 - Une épaisseur de l'ordre de 199758 km.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [13] :
 - La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
 - Une épaisseur de 500 km.
 - Une pression de 1/100 atm.
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette

couche présente les caractéristiques suivantes [12, 13] :

- Une épaisseur 2000 km.
- Une température augmentant de 4200 °C à 10⁴ °C.
- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [11] :
 - Elle est sans limite précise.
 - La température augmente de 10⁶ °C à 2.10⁶ °C.

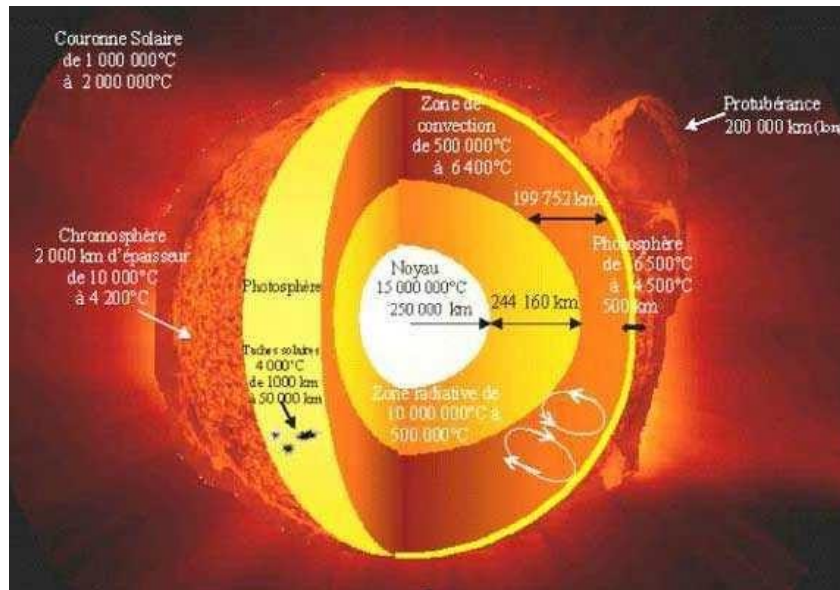


Figure (I.2) : Structure du soleil [9].

I.4.1. Évolution :

Pendant les cinquante premiers millions d'années de son existence, le soleil s'est contracté jusqu'à atteindre approximativement sa taille actuelle. L'énergie gravitationnelle libérée par ce mouvement a chauffé l'intérieur de l'astre et, lorsque le noyau s'est révélé suffisamment chaud, la contraction a cessé pour laisser place à la réaction de fusion thermonucléaire.

La durée de vie du soleil dépend de la quantité d'hydrogène qui reste à consommer, on estime qu'il existe depuis environ 4.5 milliards d'années, et subsistera, tel qu'il est, pendant au moins encore 5 milliards d'années.

Lorsque le soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, il changera de structure. Sa surface externe s'étendra au-delà de l'orbite actuelle de la terre ou il se transformera en une géante rouge, légèrement plus froide en surface qu'actuellement, mais 10 000 fois plus brillante en raison de sa taille gigantesque. Le soleil demeurera une géante rouge, brûlant l'hélium dans son noyau, pendant un demi-milliard d'années seulement, après ce stade, le noyau résiduel du soleil s'effondrera pour former une étoile naine blanche petite de la taille de la terre environ, il se refroidira alors lentement pendant plusieurs milliards d'années.

La figure (I.3) donne le cycle de vie du soleil :

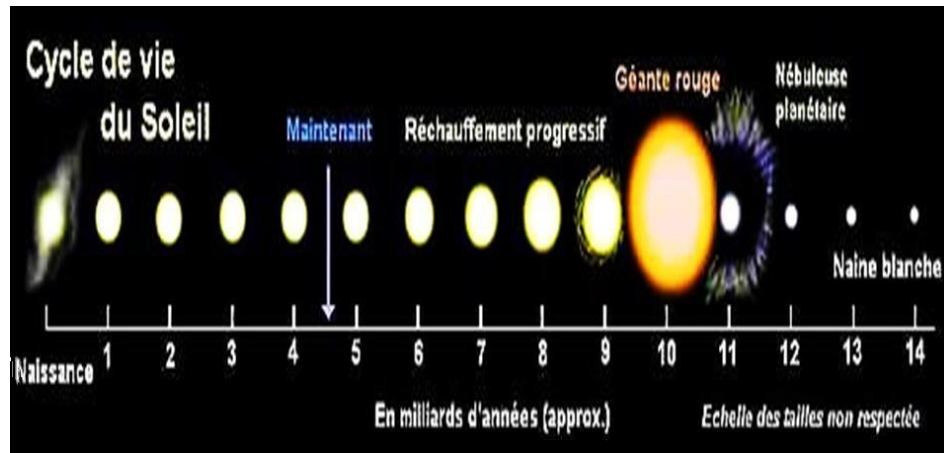


Figure (I.3) : Cycle de vie du soleil [8].

I.5. Gisement solaire :

Le gisement solaire représente l'énergie disponible sous forme de rayonnement, l'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources naturelles. Il est utilisé pour faire la simulation du fonctionnement d'un régime énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus juste possible compte tenu de la demande à satisfaire [14, 15]

I.5.1. Cas du monde :

La plus grande partie du globe terrestre possède un potentiel d'énergie solaire annuelle important variable entre 1200 kW/m^2 et 2000 kW/m^2 surtout pour les régions à une population élevée comme l'Asie du sud, l'Amérique du Sud, l'Afrique et l'Amérique centrale. De ce fait, l'énergie solaire est considérée comme étant l'énergie de l'avenir.

Nous remarquons que l'Afrique possède le plus important potentiel en énergie solaire au monde, celui-ci peut atteindre une valeur annuelle de l'ordre de 2000 kW/m^2 , il pourrait être capable de couvrir la plus grande partie de ses besoins énergétiques [16, 17].

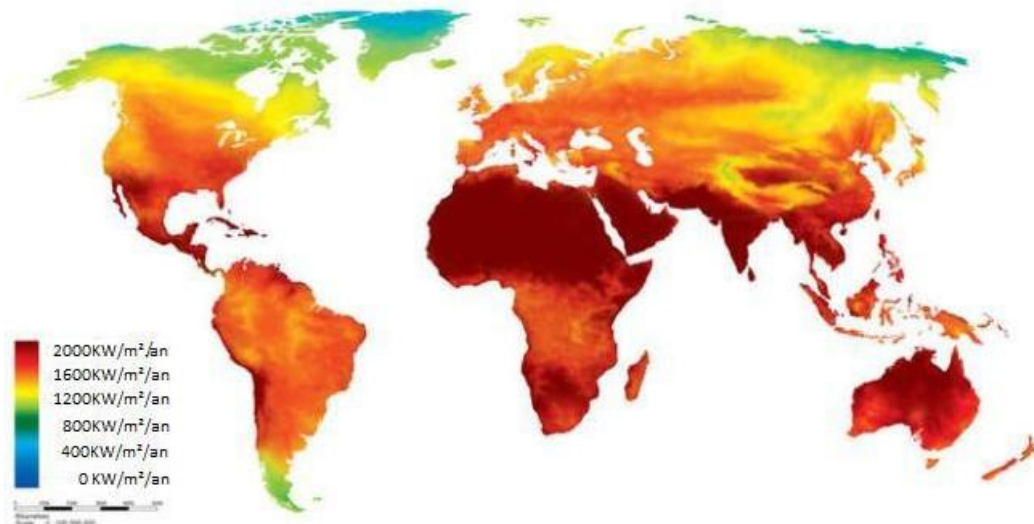


Figure (I.4) : Distribution du potentiel de l'énergie solaire dans le monde [16, 17].

I.5.2. Cas de L'Algérie :

L'Algérie contient des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'ensoleillement sur tout le territoire national est de plus de 2000 heures aux 3900 heures surtout dans les hauts plateaux et Sahara.

Un mètre carré de surface horizontale reçoit chaque jour plus de 5 kWh dans la plupart du territoire. Soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. Le tableau (I.2) : résume le potentiel solaire en Algérie [18, 19, 20].

Régions	Sahar a	Hauts Plateau x	Région côtière
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m2.an)	1700	1900	2650

Tableau (I.2) : Potentiel solaire [20].

Une évaluation par satellite, exécutée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie dispose le potentiel solaire le plus grand de tous les pays méditerranéens [20, 21].

Il est de 169,440 Tera-Watts.heure/an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque [20, 22].

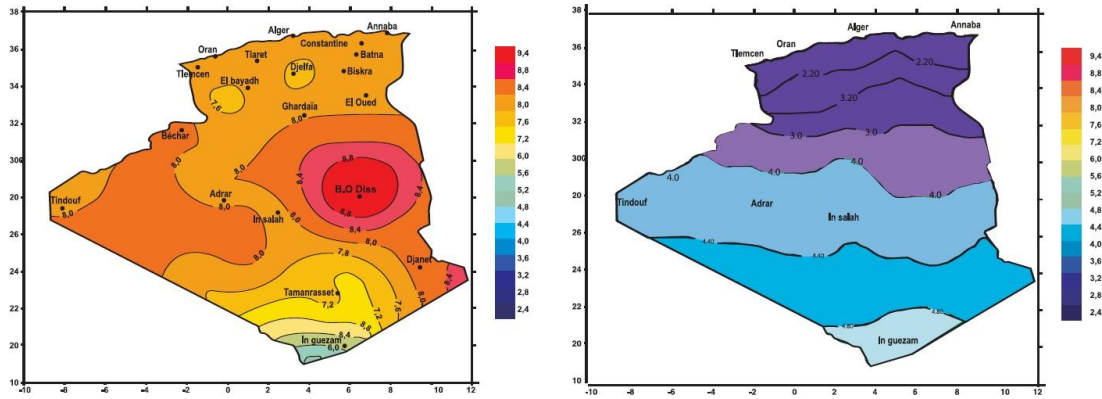


Figure (I.5) : Insolation globale quotidiennement reçue sur le plan horizontal du territoire Algérien aux mois de Juillet et Décembre [23].

I.6. Présentation de la région d'expérimentation El-Oued :

I.6.1. Espace géographique et milieu physique et climatique :

La wilaya d'El Oued Souf est située au Sud-est Constantinois. Elle est limitée :

- ✓ au Nord par les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa.
- ✓ à l'Est par la frontière tunisienne.
- ✓ à l'Ouest par la wilaya de Djelfa.
- ✓ au Sud par la wilaya d'Ouargla.

Elle occupe une superficie de 54573 Km² pour une population totale de 504401 habitants à la fin de l'année 2005, soit une densité de 9,7 hab/km² [24].

Les coordonnées géographiques d'El-Oued, Algérie.

- ✓ Latitude : 33°21'21" Nord.
- ✓ Longitude : 6°51'47" Est.
- ✓ Altitude par rapport au niveau de la mer : 84 m.
- ✓ Albédo (ρ) : 0.3.

Le relief est composé de trois ensembles. Une région sableuse : elle couvre la totalité de la région du Souf, ainsi que les parties Est et Sud de Oued-Righ. Cette région fait partie du grand erg oriental. Elle ne présente que très peu d'intérêt pour l'agriculture. Une forme de plateau rocheux : elle longe la route nationale 3 à l'Ouest de la wilaya et s'étend vers le Sud. Une région de dépression : c'est la zone des chotts. Elle est située au Nord de la wilaya et se prolonge vers l'Est. Vu la forte salinité de cette région, elle ne présente aucune utilité pour l'agriculture. Le climat de la wilaya est de type saharien et désertique, aux étés chauds et aux hivers doux. Les températures sont très élevées en

été (54°C dans le Souf) et peuvent descendre jusqu'à 1°C en hiver. En ce qui concerne les précipitations, elles sont très faibles peu différents de 80 mm/an. Les principales contraintes naturelles rencontrées sont de types climatiques. Parmi les contraintes climatiques les plus importantes dans cette région on peut citer :

- ✓ La faiblesse des précipitations, environ 80 mm/an
- ✓ La fréquence régulière pendant presque toute l'année et aussi leur violence. Le sirocco provoque des dégâts importants (dessèchement, déshydratation). Les vents de sable freinent considérablement toute activité socio-économique.
- ✓ Les fortes températures estivales accélèrent le processus d'évaporation, plus de 200 à 600 mm/an dépassent les quantités de précipitations reçues en une année, ce qui est la cause du très important déficit en eau. [24].

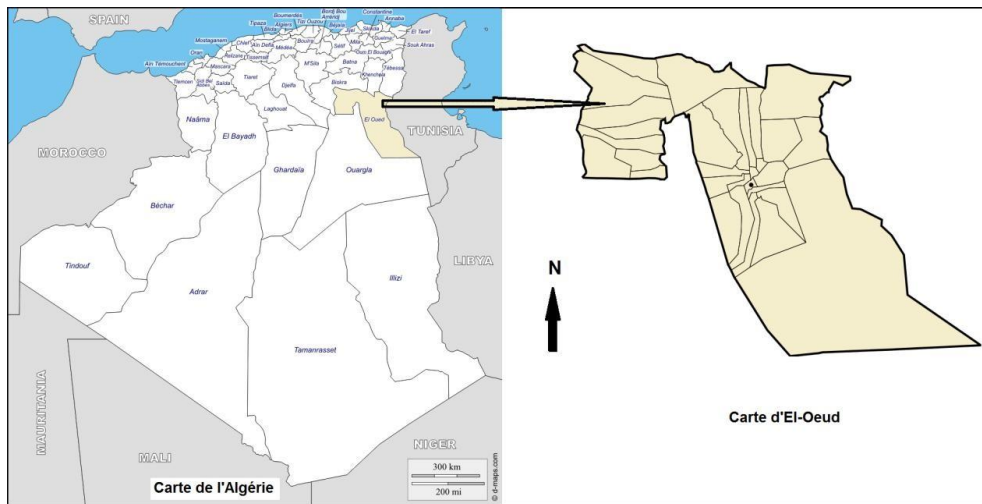


Figure (I.6) : Situation géographique de la wilaya d'El Oued Souf.

I.6.2. Station météorologique de référence :

La station climatique (ONM) l'Office National Météorologique est située dans la Daïra de Guemar au Nord de la ville d'El Oued.

Tableau (I.3) : Caractéristiques géographiques de station climatique.

Station	Code A.N.R.H	Altitude (m)	Longitude	Latitude
Guemar	13 04 09	64	06°47'E	33°30'N

(ONM : 2017).

I.7. Conclusion

En conséquence, il s'avère que la modélisation de notre travail est axée sur la détermination des bilans météorologiques et de leurs facteurs qui peuvent affecter, en particulier dans la région désertique (Al-Wadi-Algérie), et après une recherche continue du climat de l'état d'Al -Oued, ce qui a conduit à des températures très chaudes l'été, modérées à froides l'hiver, et à une humidité faible avec une période Les plus grandes surfaces du soleil tout au long de l'année, et donc la plantation de capteurs et de panneaux solaires au niveau de la zone de la vallée avec un rendement élevé est en mesure de donner d'excellents résultats.

II.1. Introduction :

La prise de conscience de l'importance des enjeux énergétiques (réchauffement climatique, pollution, effet de serre) sur le comportement humain est fortement induite par son abondance ou sa carence. Les énergies renouvelables sont connues à des stades de développement importants, parmi ces énergies figurent l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque.

Ainsi, l'énergie solaire est la source de toutes les formes de production d'énergie. Dans les séchoirs, l'énergie est convertie le soleil en énergie thermique à travers un capteur solaire ; Par conséquent, le séchoir solaire a pratiquement plusieurs méthodes de séchage différentes.

II.2. Généralité sur les séchoirs solaires :

II.2.1. Séchage :

Le séchage est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation d'eau par le chauffage de l'air ; généralement un capteur solaire qui sert à chauffer l'air ambiant et à la chambre de séchage qui sert à disposer du produit à sécher comme les légumes, la viande, les dattes et le poisson, etc...

II.2.2. Classification des séchoirs solaires :

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories :

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

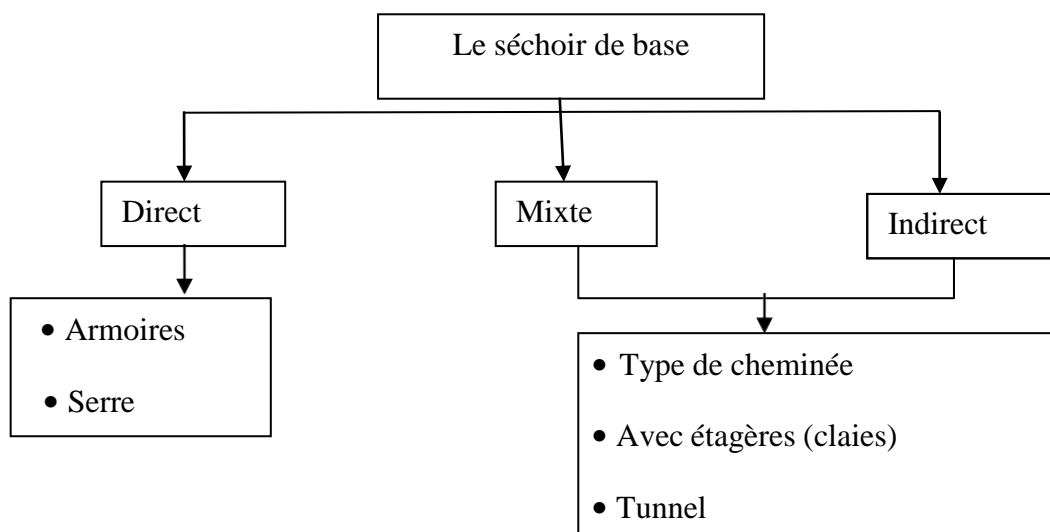


Figure II. 01 : Différents types de séchoirs solaires de base [25].

II.2.3. Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités.

II.2.3.1. Principe de fonctionnement :

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chères comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles) [25] [26].

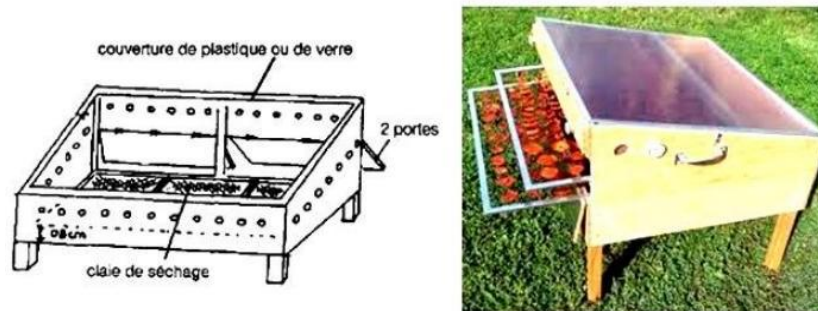


Figure II. 02 : Boitier de séchage direct [26]

II.2.3.2. Les séchoirs solaires indirects :

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires. [27] [28].

II.2.3.2.1. Principe de fonctionnement :

Le séchoir solaire indirect se compose de parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée. L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [28].

II.2.3.3 Les séchoirs hybrides :

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz 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 simplement de préchauffer l'air.
- Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité
- d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation. [25] [30].

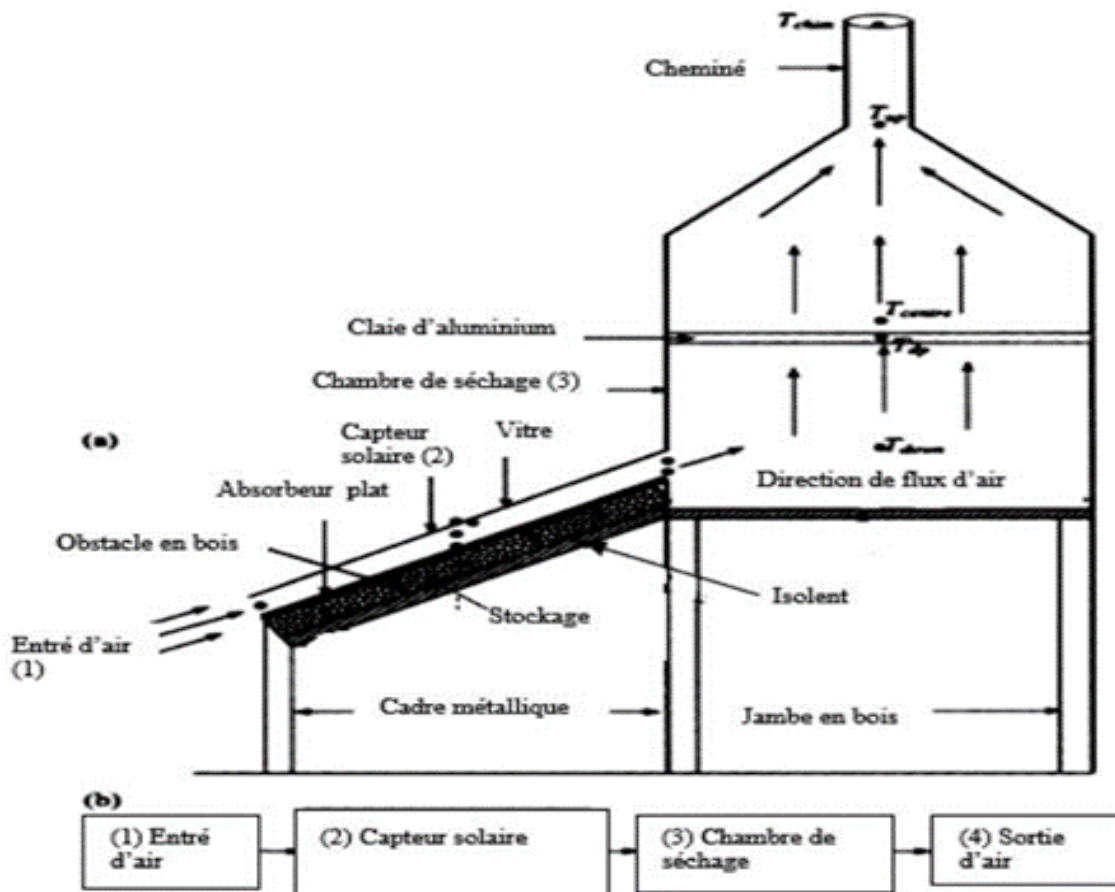


Figure II. 03 : Schéma descriptif d'un séchoir indirect [29].

II.2.3.4. Les séchoirs mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus De séchage. [25] [31].

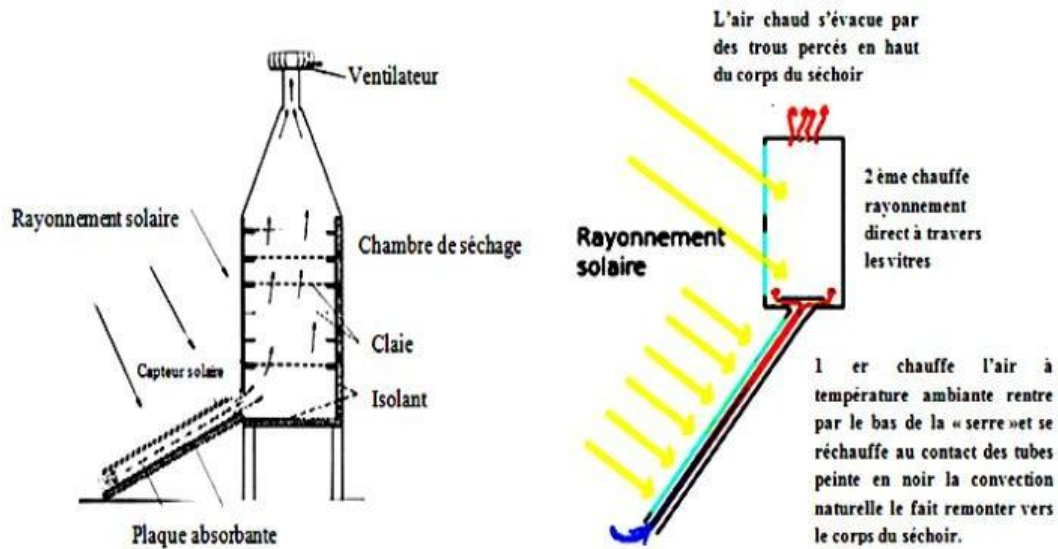


Figure II. 04 : Schéma descriptif d'un séchoir mixte [32].

II.2.4. Domaine d'utilisation :

Le séchage industriel est de nos jours très couramment utilisé dans les industries chimiques ou des matériaux. Cette technique a plusieurs utilisations dans les pays en voie de développement dans la vie de tous les jours :

- Industrie agroalimentaire
- Industrie du bois.
- Bouchons de liège.
- Fonderie.

II.2.5. Différents méthodes du séchage :

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	Just de tomate
	Filtration	Tamissage	Boues résiduaire
	Ultrafiltration	Tamissage moléculaire	Lactosérum

Séchage	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamisage	Cristaux de sucre
	Pressage	Expression	Fourrages

Tableau II. 01 : Quelques exemples des méthodes de séchage.

Selon la conversion d'énergie on distingue deux catégories de capteurs solaires :

- Capteurs solaires thermiques.
- Capteurs solaires photovoltaïques.

Dans notre travail on s'intéressera uniquement au capteur solaire thermique [33].

II.3. Capteurs solaires thermiques :

Ce sont des capteurs qui transforment l'énergie solaire en énergie thermique, utilisés pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire à basse température, on distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques :

- Capteurs à circulation de liquide.
- Capteurs à air.

Dans notre étude nous avons un prototype de capteur plan à air donc nous intéressons à les capteurs solaires à air.

II.3.1. Capteurs à circulation de liquide :

Ce sont des capteurs où le fluide caloporteur qui circule à travers un circuit solaire c'est un liquide (eau, huile, un fluide thermique, antigel).

Les capteurs solaires à circulation de liquide les plus répandus sont :

- les capteurs plans.
- les capteurs à concentration [34].

II. 3. 2. Définition capteurs solaires plans :

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple, le séchage des grains ou du bois, le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire. Plusieurs types de capteurs à air ont été construits et testés à travers le monde dont l'objectif principal étant de collecter le maximum d'énergie solaire à un coût minimum [35].



Figure II. 05 : Capteur solaire plan à air exposé au soleil [36].

II.3.3. Les types de capteurs solaires plans :

Il existe trois types de capteurs solaires plans :

- Capteurs plans vitre.
- Capteurs plans non vitre.
- Capteurs plans à haute performance.

II.3.3.1. Capteurs plan vitré :

C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, transmet cette chaleur à un liquide caloporteur, cet absorbeur est monté dans un boîtier isolé recouvert d'un verre ou feuille en matière synthétique hautement transparente. L'absorbeur comporte une couche noire souvent sélective qui absorbe efficacement le rayonnement solaire et réduit les pertes par rayonnement d'une [34].

Le schéma suivant présente la structure d'un capteur plan vitré Figure I.06.

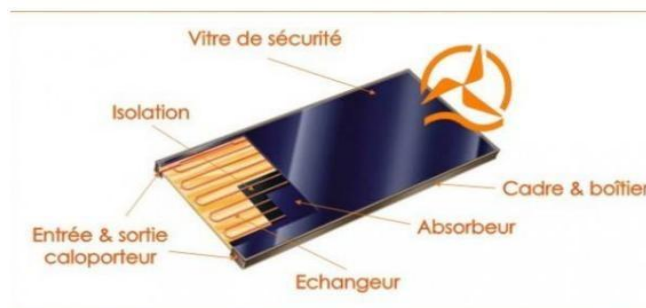


Figure II. 06 : Capteurs solaire plan vitré [35].

II.3.3.2. Capteurs plans non vitrés :

Ce capteur est le plus simple que l'on puisse imaginer, son application usuelle est le chauffage de piscine en plein air, se compose d'un réseau de tubes noirs

accolés les uns aux autres [34].

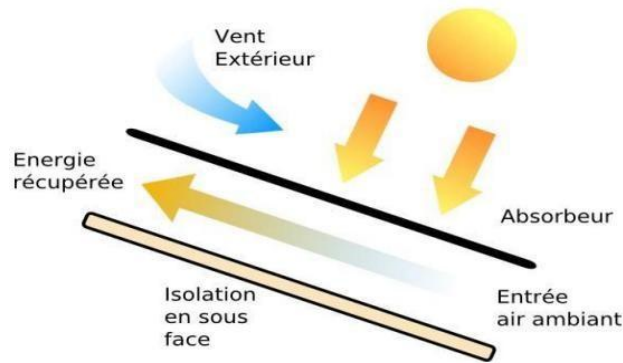


Figure II. 07 : Capteur solaire plan non vitré [36].

II.3.3.3 Capteurs plans sous vide :

Les capteurs sous vide permettent d’atteindre des températures plus élevée (jusqu’à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif.

Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur, l’autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n’importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration.



Figure II. 08 : Capteur solaire à tube sous vide [36].

II.3.4. Principe de fonctionnement :

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

Lorsque le flux solaire traverse la vitre, il chauffe la plaque placée derrière ; celle-ci émet à son tour un rayonnement thermique de grandes longueurs d’onde

(IR) qui ne peut pas traverser la vitre, il se trouve donc piégé à l'intérieur du capteur, c'est à dire :

La conversion rayonnement-chaaleur s'effectue en surface de l'absorbeur : les photons qui le frappent sont absorbés par la matière et augmentent l'agitation des molécules, et donc la température du matériau exposé au rayonnement va s'élever. Cette énergie accumulée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur (air) au contacte thermique.

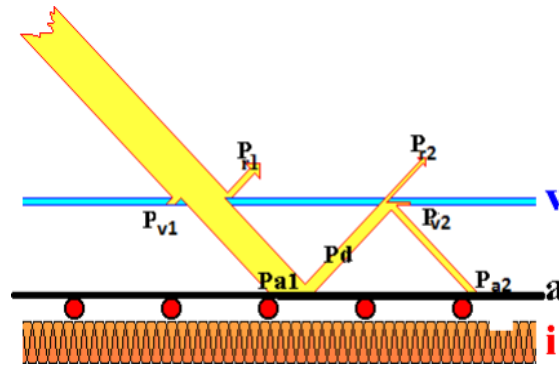


Figure II. 09 : Principe de fonctionnement

Le rayonnement solaire symbolisé par les flèches jaunes, ne traverse pas entièrement le vitrage du capteur car une petite partie (P_{r1}) est réfléchié par la vitre, surtout si l'angle d'incidence est fort. Malgré l'excellente transparence du verre, une petite partie (P_{v1}) de l'énergie reçue sera absorbée par le verre. du

Rayonnement reçu par l'absorbeur, une partie (P_d) sera ré-rayonné ou communiquée à l'air ambiant par convection. Une partie (P_{r2}) de P_d va traverser la vitre et sera perdue définitivement, une autre partie (P_{v2}) sera absorbée par la vitre et le reste retournera vers l'absorbeur (P_{a2}). On négligera les pertes au travers de l'isolant [37].

II.3.5. Les composants des capteurs solaires :

Il se compose des éléments suivants : le vitrage (couvercle), l'absorbeur, l'isolant, le fluide caloporteur et le boîtier.

II. 3. 5. 1 Le vitrage (couvercle) :

La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilisera le verre comme couverture transparente [38].

II.3.5.2 Les polycarbonates :

Ce sont des dérivés de matières plastiques à double et à triple lame très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant [39].

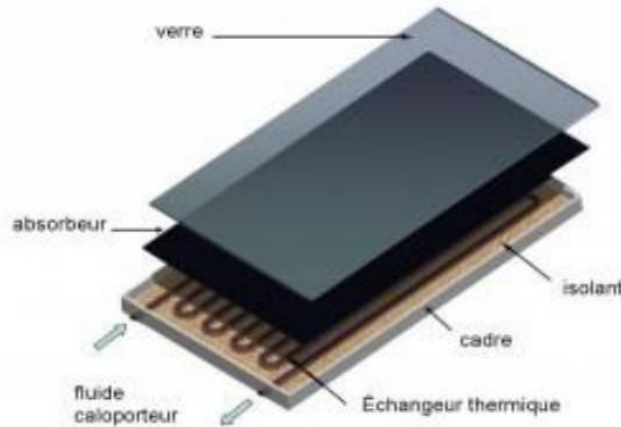


Figure II. 10 : Composants d'un capteur solaire plan.

II.3.5.3 L'absorbeur :

C'est l'élément essentiel du capteur solaire. Il a pour rôle d'absorber le rayonnement solaire, ensuite le transformer en chaleur et enfin transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

II.3.5.3.1 Différent revêtement utilisé :

II.3.5.3.1.1 la peinture noire :

La peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption α compris

Entre 0,9 et 0,95. Mais le degré d'émission ϵ_{qi} est très élevé (0,85) [40].

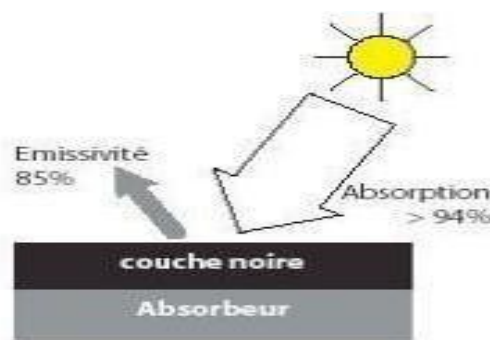


Figure II. 11 : Peinture noire sur absorbeur [41].

II.3.5.3.1.2 Oxyde de chrome :

Le revêtement en "black chrome" (couleur noire) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, son coefficient d'absorption α est de 0,95 et son coefficient d'émission ϵ de 0,12 à 0,18.

II.3.5.3.1.3 Traitement sous vide :

Ce procédé consiste à déposer différents métaux (titane, ...) sur la surface absorbante en présence du vide. Le coefficient d'absorption α obtenu est supérieur à 0,95 et le coefficient d'émission ϵ , inférieur à 0,05 [42].

II.3.5.4 L'isolant :

Limiter les pertes de transmission vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur [43]. Les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et les mousses polyuréthanes. Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.

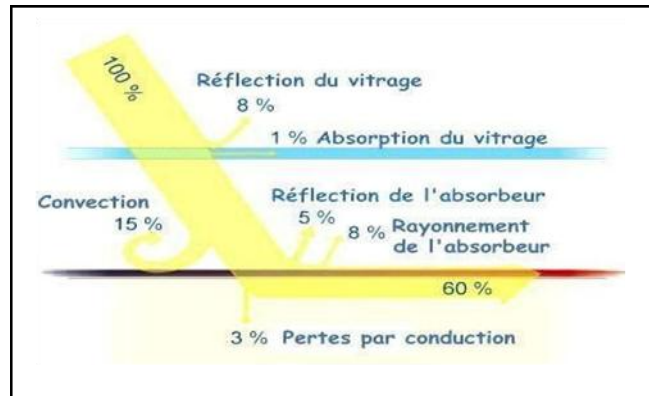


Figure II. 12 : Schéma des différentes pertes [44].

II.3.5.5 Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire a pour rôle de véhiculer la chaleur cédée par l'absorbeur.

Les fluides caloporteurs plus utilisés sont :

- l'air.
- L'eau.
- Les glycoltherms [45].

II.3.5.6 Le boîtier :

Il contient les trois éléments cités précédemment et dont les parois sont tapissées d'une couche isolante destinée à réduire les pertes vers l'arrière et les côtés du capteur, il doit être solide et résistant à la corrosion.

II.3.6 Principales catégories de capteurs solaires plans :

On distingue deux catégories de capteurs solaires plans : les capteurs **passifs** et les capteurs **actifs**.

Les séchoirs solaires actifs (ou à convection forcée) utilisent des ventilateurs pour forcer la circulation de l'air chauffé dans l'unité de séchage. Les séchoirs passifs (ou à convection naturelle) utilisent une cheminée aménagée au sommet de la chambre de séchage pour le tirage et la circulation de l'air dans le séchoir. Les séchoirs à convection naturelle sont souvent inefficaces puisque la circulation de l'air est généralement mauvaise [46].

II.4. Conclusion :

À travers cette étude bibliographique qui regroupe les différentes définitions sur l'énergie solaire, type de sécheur et les capteurs solaires pour améliorer les

performances thermiques es séchoirs solaires. Ce chapitre nous a permis de comprendre d'une façon approfondie, l'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine du séchage.

III.1. Introduction :

L'étude pratique d'un séchoir solaire avec du sel comme matériau de stockage est une exploration approfondie de l'utilisation de cette technologie innovante pour le séchage de divers produits. Ce séchoir solaire spécial utilise une substance "sel" pour absorber et transférer la chaleur solaire au produit à sécher, offrant un moyen efficace et à long terme d'éliminer l'excès d'humidité. L'efficacité du séchage du sel est supérieure à la moyenne et la qualité du matériau est moyenne.

III.1.1. Fabrication du capteur et principe de fonctionnement :

Selon les études auxquelles nous sommes parvenus et le coût énorme de fabrication d'un capteur primitif, il fonctionne de manière primitive et coûte très cher en termes d'argent et d'efforts. Par conséquent, le rapport a été rédigé en consultation avec le Dr Aoun Yassin avec l'intervention du Dr Shoaib Labiod et utilisant le programme Arduino où il doit mesurer la température toutes les 13 secondes et la mettre automatiquement dans le programme Excel sans écrire à la main de manière primitive, comme cela se faisait au centre de recherche de l'incubateur universitaire sur l'image (III.1) et (III.2) :

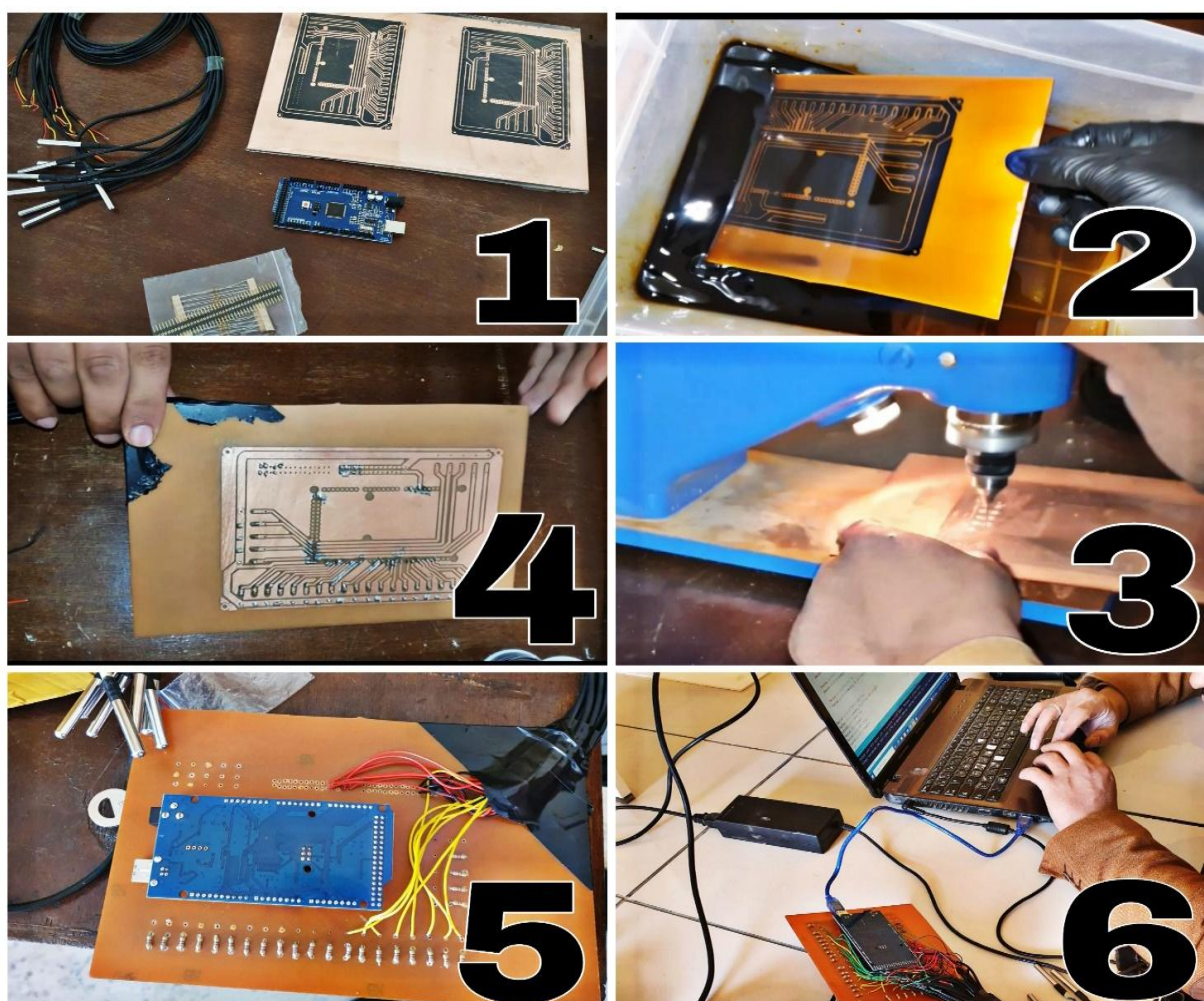


Photo.III.1 : Étapes de fabrication du capteur.

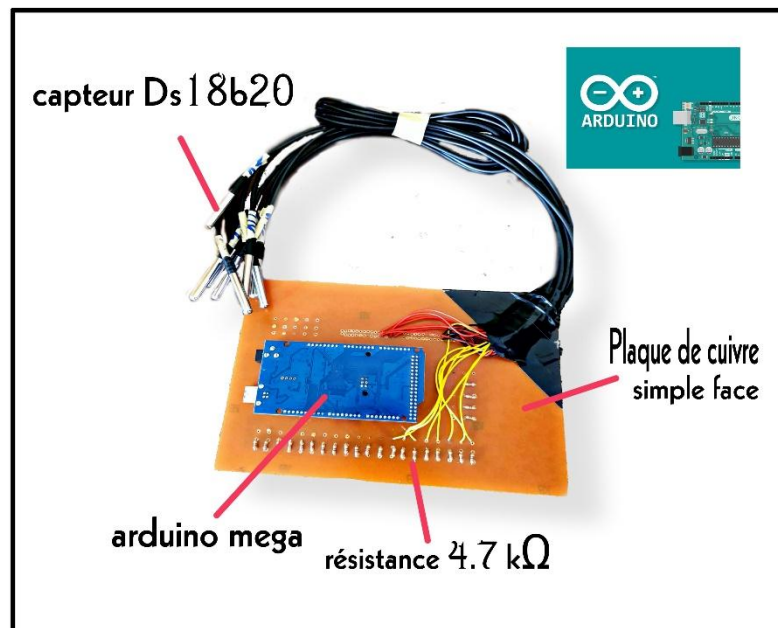


Photo.III.2 : Composants du capteur.

III.2. Présentation du capteur solaire plan :

C'est un capteur solaire plan à air à simple circulation et simple vitrage dont la configuration est un parallélépipède (1m x 0,003m) qui convertit le rayonnement solaire en énergie thermique. Il se compose d'un absorbeur de plaques de fer d'épaisseur (0,003 m), revêtues d'une couleur noire mate. Il est également recouvert d'une feuille de verre d'une épaisseur de 0,005 m. Les côtés latéraux et les parties inférieures sont séparées par des planches de bois. Ils ont respectivement 0,01 m et 0,02 m d'épaisseur. L'air circule entre le verre et l'absorbeur. Le capteur est incliné d'un angle de 33 degrés (latitude d'El-Oued) par rapport à l'horizontale et est orienté vers le sud.

Dans cette étude, nous présentons une série d'essais expérimentaux qui ont été réalisés sur trois prototypes de capteurs solaires plats à air, conçus en laboratoire et testés dans la région d'El Oued. La configuration expérimentale comprend la mesure du rayonnement solaire global, de la vitesse du vent et des températures, air ambiant, entrée, sortie et absorbeur. Afin d'améliorer les performances thermiques en utilisant des barrières et des matériaux locaux (sel) sur un absorbeur à trois capteurs. Il est essentiellement représenté comme indiqué sur l'image (III.3) :

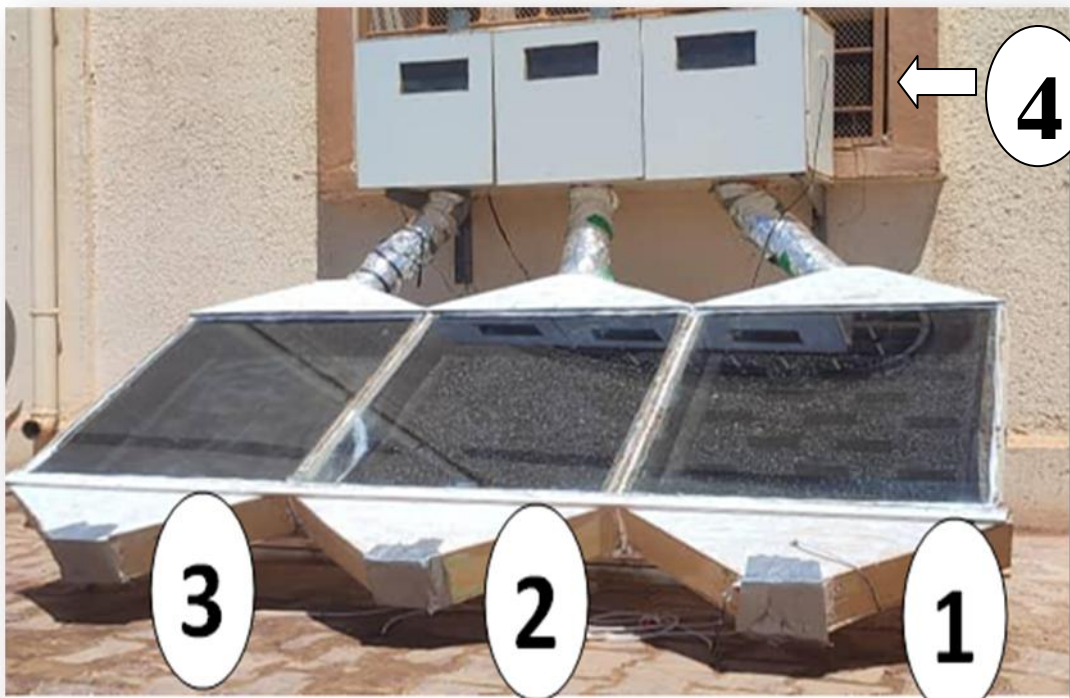


Photo.III.3 : Séchoir solaire utilisé.

- 1- Capteur solaire avec chicane transversales + sel.
- 2- Capteur solaire et sel.
- 3- Capteur solaire sans chicane et sans sel (témoin).
- 4- Chambre de séchage.

III.3. Fonctionnement de notre séchoir solaire comme système de séchage :

Il est composé de trois chambres, chacune d'entre elles étant équipée d'un capteur solaire pour chauffer l'air. L'air chaud généré par chaque capteur solaire est dirigé vers les chambres de séchage respectives afin de maintenir un équilibre thermique dans chaque chambre. On souhaite mesurer la masse du matériau dans chaque chambre au fil du temps.

Balance : Une balance précise pour peser le matériau avant de le placer dans la chambre de séchage. Ensuite, à des intervalles réguliers, retirez une partie du matériau séché de la chambre et pesez-le à nouveau pour déterminer la perte de masse due à l'évaporation de l'humidité. Cela nous permettra de suivre la masse restante dans chaque chambre au fil du temps.

III.4. Préparation du sel :

III.4.1. Tamisage :

En utilisant un tamis (0.5 mm), et pour un diamètre moyen de 0,5 mm on prépare environ 7 kg de sel. La Photo (III.4) montre le processus de mise en place du sel tamisé.



Photo.III.4 : Séchoir solaire utilisé.

Après avoir préparé le sel en deux quantités de masses égales à 15 kg, on procède au chargement des deux capteurs solaires.

Enfin on colore chaque quantité du sel par la peinture noire pour augmenter le coefficient d'absorption et on les fixe sur l'absorbeur de deux capteurs. La Photo (III.5) illustre ce processus.



Photo.III.5 : Peinture du sel dans le capteur à chicanes.

III.5. Conception et réalisation du capteur solaire plan à air :

Le capteur solaire utilisé a été construit au laboratoire de Génie mécanique de l'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued. Il est composé des éléments suivants :

- 1. Coffre (Couverture extérieure) :** Cette partie constitue l'enveloppe extérieure du capteur solaire.

2. Isolation thermique : Il s'agit d'une couche d'isolant thermique qui vise à réduire les pertes de chaleur du capteur.

3. Absorbeur : C'est la partie du collecteur qui absorbe l'énergie solaire et la convertit en chaleur.

4. Les chicanes : Les chicanes sont des éléments internes du capteur qui favorisent la circulation de l'air ou du fluide caloporteur, permettant un transfert de chaleur plus efficace. Il est en fer.

5. Couverture verrière : Cette couverture transparente permet à la lumière solaire de pénétrer dans le capteur tout en réduisant les pertes de chaleur.

Pour construire cette structure, plusieurs étapes doivent être suivies après avoir mesuré les différentes parties du capteur. Tout d'abord, il faut tracer les différentes parties du capteur en utilisant du fer galvanisé. Ensuite, la surface inférieure, d'une longueur de 100 cm et d'une largeur de 50 cm, doit être tracée et découpée. Cette partie est ensuite pliée sur les bordures gauche et droite, en les soudant sur une distance de 10 cm répartie entre les deux côtés vers l'intérieur.

III.5.1. Définition de la menthe et raison de son choix :

La menthe est une plante herbacée qui appartient à la famille des Lamiacées, l'ordre des Lamiacées et l'herbe des semis. C'est une herbe bien connue qui remonte à des milliers d'années et qui était utilisée par les anciens Grecs, Romains et Égyptiens. Les anciens connaissaient les nombreux avantages de la menthe et ses diverses utilisations, et l'utilisation de la menthe est toujours populaire pour le traitement de nombreuses maladies et problèmes de santé, car la menthe est une plante qui aime l'eau et le manque d'irrigation entraîne une grande pénurie de légumes. cultures et huiles essentielles, l'humidité ne doit pas dépasser 10%, et la raison de son choix est sa disponibilité en abondance Et pour un séchage facile.

III.5.2. Les chicanes :

Le capteur est composé de chicanes croisées disposées en neuf rangées, espacées de 10 cm. Il comprend également cinq rangées avec trois chicanes, espacées de 3,5 cm, ainsi que quatre rangées avec deux chicanes, espacées de 3,5 cm. Les côtés sont espacés de 10,25 cm. Comme le montre les Photo (III.7) :

Après avoir terminé ce travail, nous mettons de la silicone sur tous les côtés afin d'éviter les fuites d'air photo (III.7). Nous installons la plaque de verre sur chaque capteur au moyen d'un double ruban adhésif, qui est également isolant afin de faciliter le retrait de la plaque de verre. Ensuite, nous ajoutons une couche de ruban adhésif gris spécial qui empêche les fuites sur le verre et le fixons au capteur afin d'empêcher l'entrée et la sortie d'air. Nous avons placé les capteurs sur un support que nous avons fait de canne en fer

en forme de L, longueur 2 m, largeur 1.20 m, hauteur 50 cm et angle d'inclinaison 33 degrés.



Photo.III.7 : Capteur solaire avec chicanes croisées.

III.5.3. Dispositifs de mesure des températures :

Pour la mesure de la température ambiante de l'air, on a utilisé le multimètre ALTY.

Photo (III.8) :



Photo.III.8 : Multimètre utilisé pour la mesure de la température ambiante.

- 1- Touche de réglage (SET)
- 2- Réglage de la touche de changement de chiffre
- 3- Touche de décrémentation de la valeur définie
- 4- Touche d'incrémentatation de la valeur de consigne
- 5- Unité d'affichage de la valeur mesurée (PV) (Rouge)
- 6- Unité d'affichage de la valeur de consigne (SV) (Vert)
- 7- Voyant de la première sortie de contrôle (OUT1) (Vert)
- 8- Voyant de la deuxième sortie de contrôle (OUT2) (jaune)
- 9- Témoin d'autoréglage (AT) (vert)
- 10- Voyant de première alarme (ALM1) (Rouge)
- 11- Voyant de deuxième alarme (ALM2) (rouge)

III.6.Appareillages de mesures :

Les différentes mesures sont réalisées à l'aide des appareils suivants :

III.6.1.Mesure de la température :

Les températures ont été mesurées avec des thermocouples de type K (chromel-alumel) (4cm de longueur), Les mesures sont prises dans plusieurs endroits : la température ambiante et entrée, sortie du capteur et à l'absorbeur. La température ambiante est mesurée à l'aide d'un thermomètre Dwyer TH 10. Les mesures sont enregistrées pendant 30 minutes.

III.6.2.Mesure de la vitesse de l'air :

Les vitesses de l'air ont été mesurées à l'entrée et à la sortie du capteur et la du vent ambiant. Ces vitesses ont été mesurées avec un anémomètre numérique (Kestrel 1000).

Photo (III.9) :



Photo.III.9 : L'Anémomètre Kestrel 1000.

III.6.3. Mesure du rayonnement solaire global

Le rayonnement a été mesuré à l'aide d'un pyranomètre (pyranometer 4890.20 "Frederiksen"). Photo (III.10) :



Photo.III.10 : Pyranomètre (Pyranometer 4890.20 "Frederiksen").

III.7. Résultats et interprétations :

Dans ce travail, on va donner les résultats expérimentaux des essais réalisés le jour du 22/05/2023. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes Températures au cours du temps, l'ensoleillement, et enfin l'efficacité instantané et journalière. Les résultats sont présentés sous forme de graphes. Les grandeurs mesurées sont :

T_e : Température d'entrée du capteur ($^{\circ}\text{C}$)

T_s : Température de sortie du capteur ($^{\circ}\text{C}$)

T_{abs} : Température de l'absorbeur ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} : Température de l'air ambiante ($^{\circ}\text{C}$)

V_e : Vitesse de l'air à l'entrée du capteur (m/v)

V_s : Vitesse de l'air à la sortie du capteur (m/v)

V_{amb} : Vitesse de l'air ambiant (m/v)

III.7.1. Examen de la masse : La substance alimentaire mise à l'examen de séchage est le Menthe. Pour cela, 03 quantités de menthe de 20 grammes chacune, ont été placées

dans les 03 chambres. Le suivi de l'opération de séchage dans les trois chambres ont conduit aux résultats menant au traçage des courbes sur la figure **III.4** . Ces graphiques montrent les pertes de masses dans les trois capteurs solaires au cours d'une journée, soit environ 426 minutes.

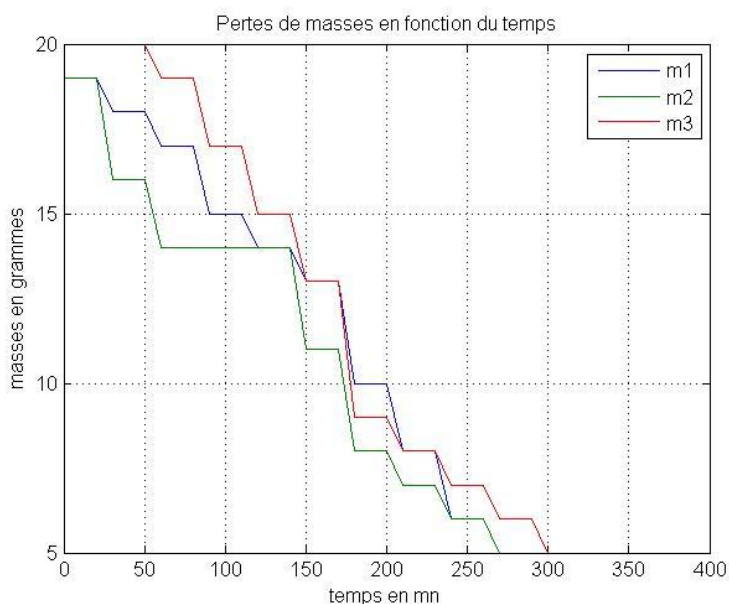


Fig.III.4 : Perte de masse de la menthe en fonction du temps pour les 03 capteurs.

Où :

m1= la masse de menthe dans le capteur solaire 1. (capteur avec chicane et avec sel) .

m2= la masse de menthe dans le capteur solaire 2. (capteur sans chicane et avec sel) .

m3= la masse de menthe dans le capteur solaire 3. (capteur sans chicane et sans sel) .

Chacune de ces trois masses vaut 20 grammes au démarrage de l'expérience .

Interprétation de la figure III.4:

La courbe présentant la perte de masse de la menthe $m_3=f(t)$ montre que le capteur sans chicane ni sel a une efficacité de séchage mieux que celle du capteur avec chicane et avec sel et à son tour la courbe $m_1=f(t)$ montre que le capteur avec chicane et avec sel est plus efficace que le capteur sans chicane et avec sel.

III.7.2. Examen de la température : L'examen des températures dans les trois capteurs solaires pendant une durée de 432 minutes nous a permis de tracer les courbes représentées sur la figure **III.5** :

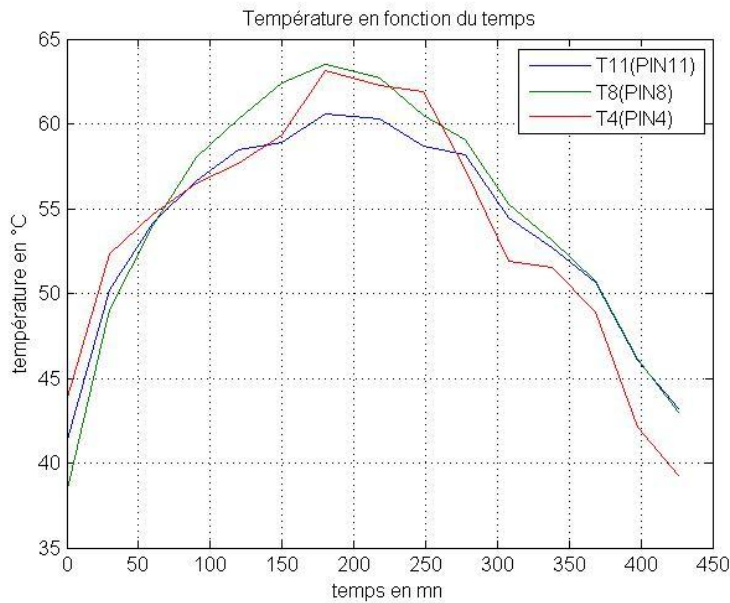


Fig.III.5 : Evolution des températures dans les 03 capteurs en fonction du temps

Où :

T4= la température dans le capteur solaire 1. (capteur avec chicanes et avec sel) .

T8= la température dans le capteur solaire 2. (capteur sans chicanes et avec sel) .

T11= la température dans le capteur solaire 3. (capteur sans chicanes et sans sel) .

Interprétation de la figure III.5:

Ce graphique montre que le capteur solaire 2 (PIN8) stocke plus de chaleur que le capteur solaire 1 (PIN11) qui à son tour emmagasine plus de chaleur que le capteur solaire 3 (PIN4).

III.7.3. Examen des rendements :

a) Méthode Européenne

Selon la méthode européenne, le rendement η d'un capteur solaire est définie par la formule suivante :

$$\eta = \beta - a_1 \cdot (T_{moy} - T_{ext}) / P - a_2 \cdot (T_{moy} - T_{ext})^2 / P$$

Où :

<ul style="list-style-type: none"> - β : Facteur optique de l'absorbeur : $0.5 \leq \beta \leq 0.8$. - T_{moy} : Température moyenne du fluide caloporteur du capteur solaire en °C . - T_{ext} : Température extérieure en °C . - P : Irradiation solaire reçue par le capteur en W/m^2 . 	<ul style="list-style-type: none"> - a_1: Coefficient de déperditions thermiques par conduction du capteur en $W/m^2/°C$. Pour un capteur vitré simple : $4 \leq a_1 \leq 6$. - a_2 : Coefficient de déperditions thermiques par convection du capteur en $W/m^2/°C$. Pour un capteur vitré simple : $0.005 \leq a_2 \leq 0.01$.
--	--

b) Méthode Française

Selon la méthode française, le rendement η d'un capteur solaire est définie par la formule suivante :

$$\eta = \beta - K.(T_{\text{moy}}-T_{\text{ext}})/P$$

Où :

<ul style="list-style-type: none"> - β : Facteur optique de l'absorbeur : $0.5 \leq \beta \leq 0.8$. - T_{moy} : Température moyenne du fluide caloporteur du capteur solaire en °C . - T_{ext} : Température extérieure en °C . 	<ul style="list-style-type: none"> - K: Coefficient de déperditions thermiques par conduction du capteur en $W/m^2/^\circ C$. Pour un capteur vitré simple : $4 \leq K \leq 6$. - P : Irradiation solaire reçue par le capteur en W/m^2 .
---	--

On prend : $\beta = 0.7$; $K = 5$; les valeurs de T_{moy} , T_{ext} et de P sont relevées de l'expérience .
Pour les essais réalisés durant la journée du 22.05.2023, on a les résultats suivants :

Capteur N°	T_{moy} (°C)	$T_{\text{ext moy}}$ (°C)	P_{moy} (W/m^2)	η
1 (PIN4)	53.49	29.29	532.82	6.772906
2 (PIN8)	54.40			6.764367
3 (PIN11)	53.62			6.771686

Les résultats des rendements montre que le capteur solaire avec sel et chicanes est plus efficace que les rendements des deux autres .

Conclusion générale

Conclusion générale :

Une étude sur le séchage solaire a été menée sur trois capteurs solaires. Chaque capteur a une configuration différente par rapport l'autre. Le premier capteur solaire est doté de chicane et avec le sel comme un matériau de stockage, le deuxième avec uniquement du sel, et le troisième sans chicane ni sel, ce dernier a servi comme témoin.

On a mesuré les températures et l'efficacité de ces trois capteurs solaires lorsqu'ils étaient exposés à de l'air plat, orientés vers le sud et inclinés à un angle de 33 degrés. D'après les résultats de l'étude, on a conclu que les capteurs solaires avec des chicane étaient plus efficaces que les autres configurations.

Les chicane et les sels utilisés dans le premier capteur solaire ont probablement contribué à améliorer l'efficacité du système de séchage solaire. Les chicane peuvent aider à concentrer la chaleur et à empêcher la dispersion de l'air chaud, ce qui peut conduire à des températures plus élevées dans les chambres de séchage. Les sels, quant à eux, peuvent agir comme un matériau d'accumulation thermique, absorbant l'énergie solaire pendant la journée et la libérant progressivement pendant la nuit ou lorsque les conditions solaires sont moins favorables. Cela peut contribuer à maintenir une température plus constante et élevée à l'intérieur des chambres de séchage.

En comparaison, le deuxième capteur solaire qui utilisait uniquement des sels a probablement obtenu des résultats moins efficaces. Bien que les sels puissent avoir un certain effet d'accumulation thermique, l'absence de chicane pourrait entraîner une dispersion de l'air chaud, ce qui peut réduire l'efficacité globale du système.

Le troisième capteur solaire, qui ne comprenait ni chicane ni sels, pourrait avoir montré les résultats les moins performants en termes d'efficacité. Sans les chicane, la chaleur solaire peut se dissiper plus facilement, ce qui entraîne une réduction de la température à l'intérieur des chambres de séchage.

Il est important de noter que les résultats de nos études ne sont pas spécifiques aux conditions de notre expérience, notamment l'orientation et l'inclinaison des capteurs, ainsi que les facteurs environnementaux. Ces conclusions peuvent différer en fonction de circonstances spécifiques dans d'autres contextes.

Références bibliographiques

- [1] **Mohamed mogharbi, daoud halassa.** Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air. Mémoire de master en Mécanique Energétique, Université de Ouargla, 2011, pp 1.
- [2] **Nadir Nadia.** 2021. Approche théorique et expérimentale du séchage solaire des produits agroalimentaires. Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, pp 1.
- [3] **Bouragbi Lakhdar. 2008.** Etude et amélioration du rendement de la conversion photo thermique du capteur solaire. Thèse de Magister en Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar –Annaba, pp. 19.
- [4] **Sellami mohamed hassen,** étude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est algérien (Ouargla), thèse de doctorat en sciences physiques option : physique énergétique, université d'Ouargla, 2014, pp 46, 47.
- [4bis] - **G. Menguy, M.Schwartz ;** Le rayonnement solaire conversion thermique et Application. Paris. Vol. 55 (1980), pp 92-93.
- [5] **Sellami mohamed hassen,** Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est algérienne (Ouargla), thèse de doctorat, université d'Ouargla, 2014.
- [6] <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/c-est-quoi-l-energie-solaire-48577>.
- [7] **W. BELAID,** « Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire », PhD Thesis, 2014.
- [8] <https://www.engie.com/activites/renouvelables/solaire>.
- [9] **R, Bernard; G, menguy; M, Schwartz.** Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [10] **J, A, Duffie; W, A, Beckman.** Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [11] **A, Sfeir ; G, Guarracino.** Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [12] **Ch, Perrin de Brichambaut ; C, Vauge.** Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).

- [13] **A. Boubeghal, M. Benhammou, B. Omari, S. Amara, L. Amer, H. Moungar** et **S. Ouejdi**, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen p. 315 – 320. (2007).
- [14] Gisement solaire, <http://displace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf> (29/10/2017).
- [15] **Oudrane Abdellatif**, Contribution à la Modélisation et au Développement de Système de Chauffage Solaire à Usage Individuel, Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Ecole National polytechnique d'Oran-Maurice Audin, 2018.
- [15bis] Activation thermique de la dalle béton-systèmes de chauffage et refroidissement REHAU SA : Ambachtenlaan 22 – Ambachts zone Haas rode 3326 – 3001 Heverlee – www.rehau.be.10/2010.
- [16] **Safa SKOURI**, « Contribution à l'Étude des Concentrateurs Solaires », Mémoire Docteur En énergétique, Mai 2016, École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunis, Laboratoire d'études des systèmes thermiques et énergétiques, Université de Monastir et Technopôle de Borj Cédria, Centre de recherches et de technologies de l'énergie, Laboratoire des procédés thermiques.
- [17] **Boudjelka Ammar, Guessoumi Farid**, Commande d'un panneau solaire à l'aide d'un microcontrôleur ATMEGA, Mémoire de Master en Electricité, Université d'El-Oued, 2017/2018, pp 19,20.
- [18] **S. Bentouba, A. Slimani, M. S. Boucherit**, Revue des Energies Renouvelables **7**, 109 (2007).
- [19] **S. Labeled**, Contribución al desarrollo de métodos para l'electrificación rural fotovoltaica à gran escala. Thèse de doctorat. Universidad politécnica de madrid escuela técnica superior d'ingenieros de télécommunication, Madrid (2004).
- [20] **M. Salmi**, «Contribution à La Quantification de l'irradiation solaire Globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012).
- [21] <http://www.enerzine.com/1/235+algerie-le-nouvel-eldorado-solaire-energie.html>.

- [22] **R. Sellami, M. Abbas, H. Bendjebbas**, Installation et étude d'un chauffe-eau solaire couplé à un cumulus pour alimenter la cuisine en eau chaude, Rapport préliminaire. Centre de développement des Energies Renouvelables, Algérie (2007).
- [23] **Mohamed lakhdar louazene**, contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – application zone de Ouargla, Thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2015.
- [24] **Dr Mohamed-Khireddine Kholadi**, SIG pour le suivi de la remontée des eaux de la wilaya d'El Oued Souf, Université Mentouri de Constantine. Conference Paper . November 2005.
- [25] A.M. Lanjewar, J.L. Bhagoria and R.M. Sarviya, Heat transfer enhancement in solar air heater, Vol. 3 No. 8 (Aug 2010).
- [26] K. Sopian ^{a,*}, M.A. Alghoul ^a, Ebrahim M. Alfegi ^b, M.Y. Sulaiman ^a, E.A. Musa ^b, Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous– nonporous media, Renewable Energy 34 (2009) 640–645.
- [27] M.K. Mittal^a, Varun^{a,*}, R.P. Saini^b, S.K. Singal^b, Effective efficiency of solar air heaters having different types of roughness elements on the absorber plate, Energy 32 (2007) 739–745.
- [28] C.Choudhury,P. M. Chauhan And H. P. Garg, Performance And Cost Analysis Of Two-Pass Solar Air Heaters, Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi 110016, India, (Received 3 October 1994).
- [29] **N.Nadir**, Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla(2009).
- [30] **Boussalia Amar**. Thème : Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Mémoire de magister, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Mentouri Constantine, option Génie Climatique 2009/2010.
- [31] **A. Boubeghal, M. Benhammou, B. Omari, S. Amara, L. Amer, H. Mounzar et S. Ouejdi**, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen p. 315 – 320. (2007).
- [32] **Rezgui Karima**, Etude de la faisabilité et amélioration des

performances de séchoirs solaires dans des régions semi arides Magister, Université Larbi Ben M'hidi Oum- Elbouaghi Constantine (2009).

[33] **Ounis Med Lamdjed, Bessei Med Taher, Bouhanna El Bachir.** Thème : contribution à l'amélioration énergétique d'un séchoir solaire hybride utilisant l'apport d'énergie par Cellules photovoltaïques. Mémoire d'ingénieur d'état, Faculté des sciences et Technologies et science de la matière, Université Kasdi Merbah-Ouargla. Spécialité Génie Mécanique, option Énergétique 2010/2011.

[34] **A. BENSEDDIK**, « Modélisation et simulation de séchage de la figue par des séchoirs Solaires indirects fonctionnant en convection forcée, mémoire de magister », Université AbouBaker Belkaid-Tlemcen, 2011.

[35] **M.DAGUENET**, « Les séchoirs solaires : théorie et pratique », 1985. Méthode de séchage.

[36] **R, Bernard; G, menguy; M, Schwartz.** Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).

[37] **Menasria F.**, (2009), « Modélisation des Echanges par Convection dans un Canal Rectangulaire Munid'Ailettes », Mémoire de Magister, Université de Biskra.

[38] www.lepanneausolaire.net/les-differents-types-capteurs.php:
www.google.com .

[39] **N, Bellel.** Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur ; thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).

[40] **Bemer, C., Durst, F., McEligot, DM.** (1984) « Numerical study of fluid flow and heat transfer in a parallel plate channel with baffles », Journal of Heat Transfer, pp. 10.

[41] **Lopez, J.R., Anand, N.K., Fletcher, L.S.** (1996) « Heat transfer in a three- dimensional channel with baffles », Numerical Heat Transfer.30, pp. 189–205.

[42] **Ben Slama, R.** (2007) « The air solar collectors: Comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer », Solar Energy 81, 139–149.

[43] **Patankar, S.V., Liu, C.H. and Sparrow, E.M.** (1977), « Fully

developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area », *Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 180-6.

[44] **Kellar, K. M., Patankar, S. V.**, (1987) « Numerical prediction of flow and heat transfer in parallel plate channel with staggered fins », *Journal of heat transfer*. 109, pp.25-30.

[45] **Cheng Chin-Hsiang and Huang Wen-Hsiung**, (1991) « Numerical prediction for laminar forced convection in parallel-plate channels with transverse fin arrays », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 34, Issue 11, pp. 2739-2749.

[46] **Cheng CH, Huang WH**. *Int J Heat Mass Transfer* (1991) 20, pp. 1315.