

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure 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 : Génie mécanique

Spécialité : ÉNERGÉTIQUE

Thème

**CONCEPTION ET RESOLUTION D'UN SECHOIR
SOLAIRE INDIRECT**

Devant le jury composé de :

Atia abd Malek Président
Zine Ali Examineur
Mezian Asia Examineur
BOUSBIA.S.Seif eddine Encadreur

Présenté par :

❖ Boutalbi Abderrhmane
❖ Bennoui haroune rachid
❖ Aissaoui abd elhakim
❖ Laroussi Mohamed yaccine

2021/2022

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et

n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et

l'encadrement de Dr BOUSBIA.S.Seif eddine

on le remercie pour la qualité de son encadrement

durant notre préparation de ce mémoire

Et un remercie spécial au Dr Zine Ali pour le grand

soutien qu'il nous a apporté, et je remercie

le Dr Abdul Jalil Laouini

Je tiens également à remercier les membres du jury

pour avoir accepté l'évaluation de mon travail

Merci aux enseignants et enseignantes qui mon formé

durant ces 5 dernière années et a leur

encouragement et leur gentillesse

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à : a mes parents. Aucun
hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour
Dont ils ne cessent de me combler.*

*A celui qui m'a soutenue tout au long de ce projet
a mon frère*

*Je dédie le fruit de mon travail
aux parents bien-aimés qui
m'aident et soutiennent ma chère mère tout au long de
ma vie aux sacrifices que j'ai faits pour m'aider pendant
mes études.*

*Je demande à Dieu de leur accorder bonheur et santé
à mes chers frères. Et à tous ceux qui ont contribué de
près ou de loin pour que ce projet soit possible,
je vous dis merci.*

REMERCIEMENT	I
DÈDICACE	II
SOMMAIRE	III
LISTE DES SYMBOLES	VI
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XI
INTRODUCTION GÈNÈREALE.....	1

CHAPITRE I : GENERALITE SUR GISEMENT SOLAIRE

I.2. Le Gisement solaire.....	5
I.3. L'astre solaire.....	5
I.4. Grandeur astronomique.....	7
I.5. L'énergie solaire.....	10
I.6. Le Rayonnement solaire.....	12
I.7. Mesure du rayonnement solaire au sol	15
I.8 . Gisement solaire en Algérie.....	16

CHAPITER II : GENERALITES SURLE SECHAGEG ET SECHOIR SOLAIRE

II.1 Le séchage.....	23
II.1.1 Définition et le but de séchage.....	23
II.1.2 Domaines d'utilisations	24
II.1.3 Mécanisme de séchage	24
II.1.4 Méthodes de séchage	27
II.1.5 Paramètres de séchage	30
II.1.5.1 Caractéristiques dès l'air de séchage	30
II.1.5.2 Caractéristiques des solides Humides	31
II.1.5.3 Vitesse de séchage	32
II.1.5.4 Cinétique du séchage	33
II.1.6 Avantages et inconvénients du séchage	34
II.2 Séchoir Solaire.....	35
II.2.1. Description d'un séchoir solaire	35
II.2.2. Classification des systèmes de séchoirs solaire	35
II.2.2.1 Les séchoirs solaires directs	36

II.2.2.2. Séchoirs solaires indirects	37
II.2.2.3. Séchoirs solaires mixtes	39
II.2.2.4. Les séchoirs solaires hybrides	40
II.3. Capteur solaire Thermique.....	41
II.3.1 Principe des échanges et fonctionnement d'un capteur solaire plan solaire plan	41
II.3.2. Composants des capteurs solaires d'air	43
II.4. Le stockage	44
II.4.1. Stockage thermique	44
II.4.1.1 Stockage sensible	44
II.4.1.2 Stockage latent	44
II.4.1.3 Stockage thermochimique	45
II.4.2. Comparaison des systèmes de stockage	45

CHAPITER III : CONCEPTION ET RESOLUTION SECHOIR SOLAIRE INDIRECT

III.1. Description du séchoir solaire.....	49
III.2. Instruments de mesure.....	49
III.2.1. Mesure du rayonnement solaire	49
III.2.2. Mesures des températures	50
III.2.3. Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air	51
III.2.4. Mesure de la perte de masse	51
III.3. Prototype.....	52
III.3.1. Système de séchoir solaire indirect	52
III.3.2. Les plans de construction	52
III.3.3. Matériaux utilisés pour la réalisation du séchoir solaire	54
III.3.4. Etapes de Réalisation	57
III.3.4.1. La boîte de séchoir.....	57
III.3.4.2. Assemblage de pièces de capteurs solaires.....	58
III.3.5. Coût de Fabrication du séchoir	59
III.4. Expérimentation.....	59
III.4.1. Emplacement du séchoir	60
III.4.2. Séchage de la pomme de terre	60
III.5. Resolution	62
III.5.1. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage	62
III.5.2. Variation de la teneur (a base humide) en eau en fonction du temps de séchage	63
III.5.3. Variation de Radiation solaire en fonction de temps	54

III.5.4. Variation de température ambiante en fonction du temps	65
III.5.5. Variation de vitesse du vent en fonction du temps	66
III.5.6. Variation de température dans le capteur solaire	67
III.5.7. Variation de température dans chambre de séchage.....	68
III.5.8. Variation Vitesse de séchage en fonction du teneur en eau	69

Conclusion générale

LIEST DES FIGURES

Figure I.1 : Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons	6
Figure I.2 : Les coordonnées géographiques	7
Figure I.3 : Repère véquatorial	8
Figure I.4 : Spectre solaire	10
Figure I.5 : Les différents composants du rayonnement solaire	12
Figure I.6 : Le Pyrhéliomètre	12
Figure I.7: Le Pyranomètre	13
Figure I.8 : l'Héliographe	13
Figure I.9 : Carte du monde de l'enseillent moyen annuel	14
Figure I.10 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	15
Figure I.11: Variation Température moyenne à Oued Souf eloued 2021	16
Figure I.12: Heures de clarté et crépuscule à Oued Souf	16
Figure I.13: Niveaux de confort selon l'humidité à Oued Souf	17
Figure I.14 : Vitesse moyenne du vent à Oued Souf	17
Figure I.15: Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen à Oued Souf	18
Figure II.1 : schéma d'opération de séchage	20
Figure II.2 : Présentation schématique d'un produit humide	21
Figure II.3 : Lyophilisation	24
Figure II.4: Photographie d'une étuve	25
Figure II.5. Schéma d'un four micro-ondes monomode et multi mode	25
Figure II.6: périodes du séchage	28
Figure II.7: Classification des séchoirs solaires selon	30
Figure(II.8): Schéma d'un séchoir solaire direct passif	31
FigureII.9:Schéma d'un séchoir solaire direct actif	31
Figure II.10: Le principe d'un échoir solaire indirect	32
Figure II.11 :Diagramme schématique du séchoir indirect armoire passif	33
Figure II.12 :Diagramme schématique du séchoir indirect armoire actif	33
FigureII.13 : Séchoir solaire tunnel	33
Figure II.14: Schéma d'un séchoir solaire tunnel	33
Figure II.15 :Séchoir solaire mixte (Khedimou, 2016)	34
Figure II.16: Séchoir solaire hybride solaire-gaz (Dudez 1999)	35
Figure II.17: Séchoir solaire hybride à convection forcée	35
Figure II.18 : Principe de fonctionnement du capteur solaire plan	36
Figure II.19 : Graphe température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible	38
Figure III.1 : schéma fonctionnement séchoir solaire	42
Figure III.2 : schéma fonctionnement capteur solaire	43
Figure III.3 : Solarimètre à affichage numérique	44
Figure III.4 : Thermomètre	44
Figure III.5 : anémomètre	45
Figure III.6 : Balance numérique	45
Figure III.7 : model 3D system séchoir solaire	46
Figure III.8 : model 3D capteur solaire	46
Figure III.9 : vue capteur solaire	47
Figure III.10 :Composants du capteur solaire	47
Figure III.11 : chambre de séchage	48

Figure III.12 : Schéma de la planche de bois	48
Figure III.13 : Schéma de la planche de Verre	49
Figure III.14 : Schéma des plaques de polystyrène	49
Figure III.15 : La tôle	50
Figure III.16 : Sens de circulation de l'air dans un ventilateur	51
Figure III.17 : la boîte de séchoir	51
Figure III.18 : Vue de la sortie d'air du séchoir	52
Figure III.19 : Vue de l'entrée d'air du sécheur	52
Figure III.20 : Vue d'en face du séchoir	53
Figure III.21 : Vue latérale du séchoir	55
Figure III.23 : pomme de terre après séchage	55
Figure III.5.1 : Variation de la teneur (à base sèche)en eau en fonction du temps de séchage	56
Figure III.5.2 : Variation de la teneur (à base humide)en eau en fonction du temps de séchage	57
Figure III.5.3.: Variation de Radiation solaire en fonction de temps	57
Figure III.5.4 Variation de température ambiante en fonction du temps	58
Figure III.5.5 : Variation de vitesse du vent en fonction du temps	58
Figure III.5.6 :Variation de température dans le capteur solaire	59
Figure III.5.7 :Variation de température dans chambre de séchage	60
Figure III.5.8 :Variation Vitesse de séchage en fonction du teneur en eau	61

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil	5
Tableau I.2 : Répartition spectrale du rayonnement thermique	10
Tableau I.3 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	14
Tableau I.4 : coordonnées géographique (wilaya-EL oued)	16
Tableau II.1 : avantage et inconvénient du séchage	29
Tableau II.2 : Le coefficient d'absorption et le coefficient d'émission pour les supports les plus utilisés comme absorbeur	36
Tableau II.3 : Comparaison des différents types de stockage leur fonction des site energtique	37
Tableau III.1 : caractéristiques des matériaux	50
Tableau III.2 : Coût de fabrication du séchoir	53
Tableau III.3 : paramètres de séchage pomme de terre	54

LISTE DE SYMBOLES

Nomenclature

A	La surface de séchage (m ²)
L	Longitude
Λ	Altitude
Φ	l'altitude
Ω	l'azimuth
H	Hauteur du soleil La déclinaison
ω	Angle horaire
S ₀	Constante solaire
λ _c	conductivité thermique W/(m.K)
H	humidité absolue
H _r	L'humidité relative
Ψ	degré de saturation
X	Teneur en eau a base sèche kg _{eau} / Kg _(MS)
X _r	Teneur en eau du produit à base humide)
A _w	L'activité de l'eau dans le produit
P _{vp} :	Pression de vapeur d'eau a la surface du produit,(Pa)
V _s	Vitesse de séchage
M _v	La masse d'eau évaporée
M _s	La masse de produit sec
dX	L'humidité de produit au début et à la fin de l'opération.(kg)
Q	La quantité de chaleur transférée par unité de temps (W)
A	coefficient d'échange par convection (W / m ² · K).
T	Température (k,c)
E	émissivité du produit à traiter et émissivité de l'émetteur
I _d	. Rayonnement direct [w/m ²]
I _f	Rayonnement diffuse [w/m ²]
I _G	Rayonnement Globale [w/m ²]
I _R	Rayonnement réfléchié [w/m ²]
R _s	rayon du soleil (km)
D _{ST}	distance terre-soleil (km)
V	Vitesse (m/s)
t	<i>letemps</i> (s)
P	Poids volumique g/m ³
E	Epaisseur (mm)
-dx/dt	Vitesse de séchage du produit : (Kg/Kgs.h)

T ₁	La température ambiante (entrée du capteur solaire)
T ₂	La température au milieu du capteur solaire
T ₃	La température sortie du capteur solaire
T ₄	La température entrée du chambre de séchage
T ₅	La température sur clie chambre du séchage
T ₆	La température sortie de la chambre du séchage

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉREALE

Transformation énergétique est devenue une réalité incontronable face aux crises énergétiques mondiales, l'Algérie se dirige vers une transformation énergétique à partir des énergies fossiles, dont les prix augmentent et polluent l'environnement, en les remplaçant avec une énergie renouvelable et propre, l'Algérie peut aspirer à un développement rapide et conséquent, si on tient compte de ses réserves importantes de pétrole et du gaz. Néanmoins, par suite En raison de l'augmentation de la demande d'énergie, le gouvernement algérien, s'est fixé comme priorité dans le domaine de la recherche et du développement, l'axe "Energies solaire". Et Surtout l'énergie solaire En effet, il est impératif d'introduire de nouvelles notions qui sont d'actualité parmi lesquelles il y a la protection de l'environnement et l'économie d'énergie

L'Algérie possède un des plus importants gisements solaires au monde. La durée d'ensoleillement atteint en moyenne 2500 heures par an sur une très grande partie de son territoire. En effet, le potentiel solaire total de l'Algérie est estimé à 169 440 TWh par an ce qui représente 5000 fois la consommation annuelle nationale d'électricité et environ 60 fois l'énergie consommée par la communauté européenne Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage solaire des produits agricoles ou herbes naturelles.

Beaucoup des scientifiques ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires (directs, indirects) et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage. Pour utiliser librement, l'énergie renouvelable et non polluante comme source principale fournie par le soleil, Ces dernières années, les nombreuses tentatives ont été faites pour développer le séchage solaire principalement pour préserver les produits agricoles et les forêts. Le séchage est l'un des processus les plus anciens de l'unité de tension qui conserve les aliments. C'est une technologie qui implique le transfert simultané de chaleur et de masse entre le produit et l'air ambiant.

Les méthodes de séchage conventionnelles présentent de nombreux inconvénients qui conduisent à la détérioration du produit. En développant ces techniques traditionnelles, des équipements spéciaux pour le séchage solaire appelés séchoirs solaires ont été développés et se sont révélés être une solution intéressante pour une utilisation rurale ou industrielle.

Plusieurs modèles ont été développés à partir d'eux et de nombreuses études ont été menées pour développer leur efficacité.

L'objectif de ce travail la réalisation d'un séchoir solaire plan indirect et conception avec **outil solidworks** Et essayez d'expérimenter avec un séchoir solaire pour voir son efficacité et **l'améliorer** dans le processus de séchage

Pour bien présenter notre travail, on l'a réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre : étude Bibliographique (gisement solaire) On parlera paramètres physiques pour gisement solaire

Le deuxième chapitre : Dans ce chapitre, nous étudierons le séchage en général et découvrirons les séchoirs solaires et leurs types

Le troisième chapitre : ce chapitre se concentre sur la conception d'un séchoir solaire et explique son fonctionnement et la réalisation d'un modèle par solidworks

Avec résultats obtenus à partir du processus de mesure, d'analyse et de discussion.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR
GISEMENT SOLAIRE

CHAPITRE I : GENERALITE SUR GISEMENT SOLAIRE

Le gisement solaire représente l'une des sources d'énergie non polluante et économique de en plus demandée au niveau international, Face aux crises actuelles Malgré son énorme étendue l'énergie solaire reste peu exploitée dans les pays du sud notamment les pays africains. Par conséquent, la détermination du champ de rayonnement et de son intensité est importante pour la conception de dispositifs de conversion d'énergie thermique (Ilyes Frihi, Samira Chouicha, Abdelghani Boubekri, Mohamed HafedBerebeuh 2015)

I.1. Le Gisement Solaire :

Le gisement solaire représente sous forme de rayonnement. L'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources d'énergie naturel. Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en le soleil et l'énergie solaire

I.2. L'astre solaire :

Le Soleil est la seule étoile du système solaire la plus proche de la Terre et est un réacteur nucléaire géant qui émet de l'énergie électromagnétique faut environ 8 minutes pour que le rayonnement nous parvienne [1],

L'étoile du soleil, à l'origine de toute vie sur Terre. Le soleil est considéré comme une grande centrale nucléaire (centrale nucléaire idéale) qui fournit de l'énergie et stocke ses déchets. Cette machine offre une énergie propre (écologique), gratuite, disponible, silencieuse et ne tombera jamais en panne. Nous ne cherchons pas à générer cette énergie, nous concevons simplement un appareil pour la capter.

I.2.1. Présentation Générale :

Le soleil est une naine pseudo-sphérique, assimilable à une sphère géante. Un gaz très chaud composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et le 1% restant Un mélange de plus de 100 éléments, c'est-à-dire pratiquement tous les éléments chimiques est connu. Son diamètre atteint 1391000 km. Il est à une distance moyenne de 149598000 km de la terre. Le soleil est composé principalement de substances gazeuses, d'hydrogène et d'hélium, et est le site d'une réaction de fusion permanente, avec une température centrale de 107 000. Bien que le Soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99,9° de la masse du système solaire, qui est dominée par l'effet gravitationnel de la grande masse. Dusoleil[2]

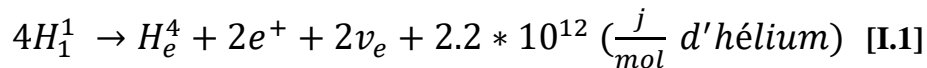
Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le **tableau I.1** :

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	2.10^{30}
Surface (km²)	$6.09.10^{12}$
Volume (km³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{17}$

L'astre solaire a une forme sphérique non homogène constituée de plusieurs couches concentriques. On trouve du centre vers l'extérieur selon les théories actuelles :

➤ **Le Noyau :**

Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X il s'étend du centre à environ 0,2 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à 150 000 kg/m³. C'est là qu'est produite l'énergie solaire C'est dans le noyau que se produisent une suite de réactions thermonucléaires exothermiques compliquées (fusion nucléaire) dite cycle de Bethe qui transforment, l'hydrogène en Hélium et qui s'écrit globalement



➤ **Une zone radiative :**

Zone de combustion de type radiatif de 500.000 km d'épaisseur à travers laquelle l'énergie est véhiculée uniquement par rayonnement.

➤ **Une zone convective :**

Zone convective de 100.000 km d'épaisseur à travers laquelle l'énergie est entraînée par des mouvements de convection.

➤ **La photosphère :**

D'une épaisseur de 400km seulement, la température à sa surface est de l'ordre de 4500°K, au-delà de la photosphère la structure du soleil est généralement connue sous le nom d'atmosphère solaire.

➤ **La chromosphère :**

D'une épaisseur de 8000 km, ou la température augmente de 4500°K à 50.000°K vers l'extérieur.

➤ **La couronne solaire :**

Représentant l'auréole du soleil, s'étend jusqu'à 250 106 km dans l'espace interplanétaire.

La température varie de 1 à 2 millions de degrés [2].

I.3. Grandeur Astronomique :

I.3.1. Le mouvement de la terre autour du soleil :

Le soleil est l'astre central de notre système planétaire, la terre est la troisième planète de notre système solaire. Son diamètre à l'équateur est de 12 700 km.

La Terre tourne autour du Soleil en un an dans un plan appelé l'écliptique. La Terre tourne sur elle-même pendant 365,25 jours, faisant une révolution dans le même sens autour du Soleil (Fig. I.1)

Le mouvement de la Terre autour du Soleil se produit à une vitesse orbitale d'environ 30 km/s, ce qui entraîne un déplacement d'environ 1 milliard de km par an. Du point de vue du pôle Nord de la Terre, il tourne dans le sens antihoraire. Cette direction correspond à l'ouest de l'observateur à midi sur l'équateur terrestre. Au solstice d'hiver (21 décembre), la Terre est la plus proche du Soleil, 147 millions de km, et au solstice d'été, elle est la plus éloignée de la Terre, 153 millions de km, et la distance moyenne est le petit axe de l'orbite à l'équinoxe 1 correspond à 449,5 millions de km. Printemps (21 février) et automne (21 septembre). Il tourne sur lui-même selon un cycle de 24 heures. Son axe de rotation (axe des pôles) a une direction fixe dans l'espace et fait un angle avec le plan normal du plan de l'écliptique

Au cours de cette rotation annuelle, l'axe de rotation de la Terre reste parallèle à lui-même, mais s'incline de 23,5 degrés par rapport au plan normal du plan de l'écliptique [3]

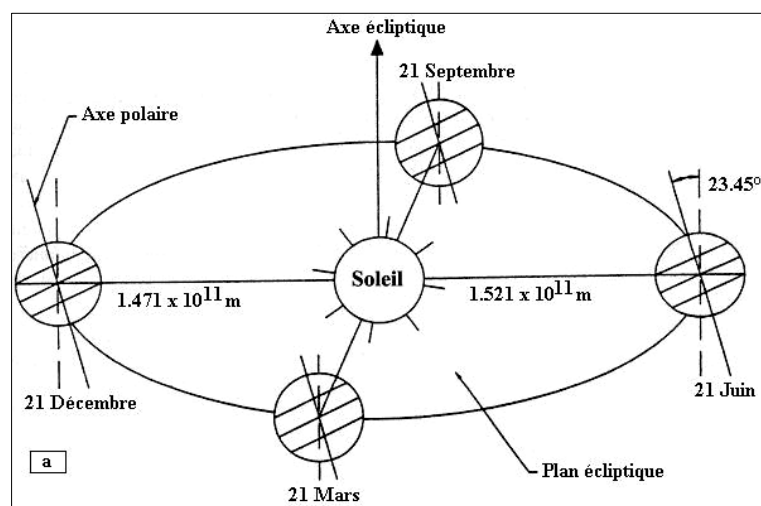


Figure I.1 : Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons (Yaiche,CDER,vol B.P.62,2007)

I.3.2. Les coordonnées géographiques :

➤ **Longitude (L) :**

La longitude (L) d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé .

➤ **Altitude (λ) :**

L'altitude (λ) d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) .

➤ **Latitude (φ) :**

La latitude (φ) L'angle formé par une ligne tracée d'un point de la surface terrestre au centre de celle-ci et au cercle équatorial de celle-ci est appelé latitude. L'équateur est formé par l'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre et est désigné par la latitude 0° , le pôle nord par la latitude 90° et le pôle sud par la latitude -90° . Le signe (-) est attribué à tous les sites de l'hémisphère nord par convention, et le signe (-) est attribué à tous les sites de l'hémisphère sud par convention. [4]

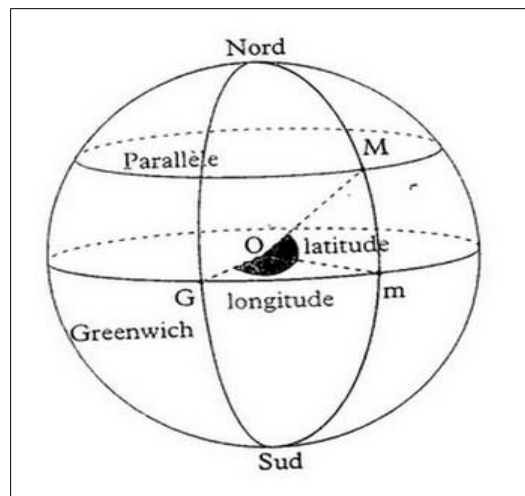


Figure I.2 : Les coordonnées géographiques

(<https://www.ilemaths.net/sujet-latitude-longitude-et-mesures-de-distance-178141.html>)

I.3.3. Cordonnées du soleil :

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents.

a) Les coordonnées horizontales :

➤ **l'azimuth Ω :**

C'est l'angle compris entre le plan méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil perpendiculaire au plan horizontal [5]

$$\sin(\Omega) = \cos(\delta) * \sin(\omega) / \cos(H) \quad [I.2]$$

➤ **Hauteur du soleil (a) :**

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal

$$\sin(H) = \sin(\varphi) + \sin(\delta) + \cos(\varphi) + \cos(\delta) + \cos(\omega) \quad [I.3]$$

φ : Latitude du lieu

δ : Déclinaison

ω : Angle horaire

b) Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la Terre à l'aide de deux angles ; la déclinaison δ et l'angle horaire ω .

➤ **La déclinaison (δ) :**

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial, la déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année, Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [6]

➤ **Angle horaire (w) :**

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui passant par la direction du soleil [5]

$$\omega = 15 * (TSV - 12).$$

$\omega = 0$ à 12h TSV, soleil au zénith

$\omega < 0$ le matin

$\omega > 0$ l'après midi

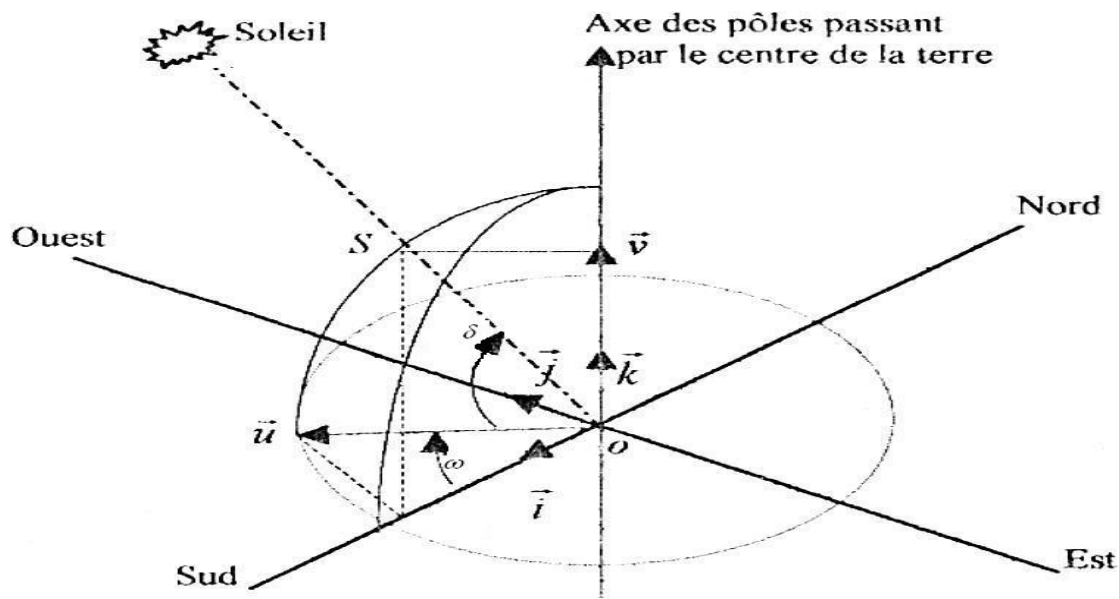


Figure I.3 : Repère vequatorial [3]

✓ **Temps solaire vrai T.S.V :**

La rotation de la terre sur elle-même introduit la notion de journée solaire Moyenne (Temps Solaire Moyen): C'est le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs au méridien d'un lieu. Une rotation complète de la terre autour d'elle-même correspond à 24 heures en moyenne.

$$15^{\circ} \longrightarrow 1\text{Heure et } 1^{\circ} \longrightarrow 4 \text{ Minutes}$$

Le temps solaire vrai est une conséquence de la loi des aires, les passages du soleil au méridien du lieu ne se succèdent pas à 24 heures d'intervalle (car la trajectoire est elliptique et la vitesse variable).

I.4. L'énergie solaire :

I.4.1. Importance et effets de l'énergie solaire reçue par la terre et son atmosphère :

La terre reçoit un flux solaire 18.1010 MW qui ne constitue que 5.1010 du rayonnement solaire total, à titre de comparaison nous remarquons qu'une grande centrale électrique a une puissance de l'ordre 1000 MW. L'énergie solaire reçue est 10000 fois plus grande que celle consommée par le monde entier chaque année, elle est équivalente à 1000 fois l'énergie de toutes les réserves connues en pétrole, La quantité d'énergie reçue par la terre contribue à maintenir la surface de la terre à une température moyenne voisine de 17°C, elle crée les courants marins, les vents, les pluies, les orages, les tempêtes.[7]

I.4.2. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est à la fois abondante et disponible partout sur la terre. Son potentiel est immense. Cependant, comme c'est le cas pour toute technologie, son exploitation présente à la fois des avantages et des inconvénients.

❖ *Avantage :*

- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont facilement maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions La main d'œuvre ne qu'une formation complémentaire facilement maîtrisable
- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de nos besoins.
- Les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles. [7]

❖ *inconvénients:*

- Sa diffusion : La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée ; ceci rend difficile la couverture des besoins importants et particulièrement ceux à haute valeur exergétique.
- Son intermittence : elle nous fait défaut aux moments où nous en avons besoin. [7]

I.4.3. Captation :

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir.

❖ *L'énergie solaire thermique :*

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire. [8,9]

❖ *L'énergie solaire thermodynamique*

La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermo électriques.

Trois types principaux de centrales sont utilisées :

- Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 (C°).
- Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000 (C°) ou plus.
- Les centrales à tour pour atteindre 1000 (C°).

❖ **L'énergie solaire photovoltaïque :**

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux.

I.5. Le Rayonnement solaire :

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.108 m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8µm .On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique .[10]

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le **tableau I.2** : Répartition spectrale du rayonnement thermique

Longueur d'onde (µm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m ²)	87	656	623

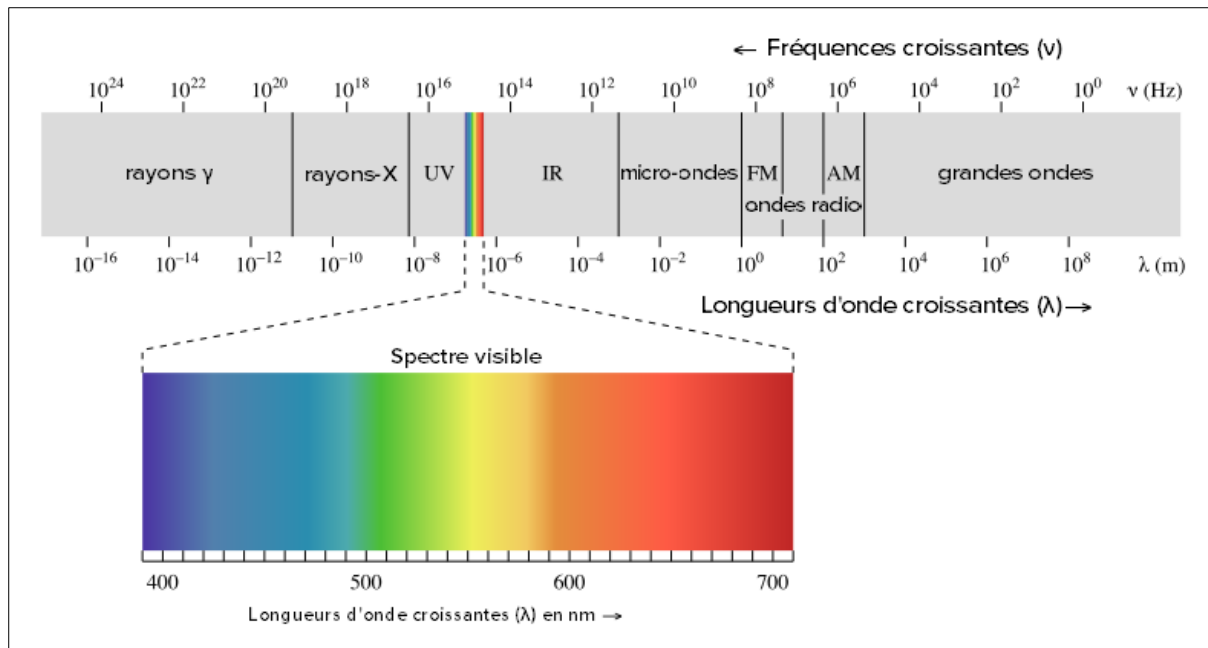


Figure I.4 :Spectre solaire [49]

I.5.1. Constante solaire :

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

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

$$S_0 = \sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{D_{st}} \right)^2 \quad [I.4]$$

R_s: rayon du soleil,

D_{st} : distance terre-soleil,

σ : 5,67 10⁻⁸W/m²K⁴

I.5.2. Composante du rayonnement solaire :

Soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la partie réfléchi par le sol du rayonnement solaire global comme représentés dans la figure suivante

I.5.2.1. Rayonnement direct : I_d

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil. Il s'agit d'un flux uniforme de rayons de puissance incidente I (W / m²) parallèles les uns aux autres. C'est le flux de photons qui n'interagit pas avec les constituants de l'atmosphère et conserve une direction commune et une

énergie unique. [11]

1.5.2.2. Rayonnement diffus : I_f

Parmi les photons ayant interagi avec la couche atmosphérique, les photons absorbés et d'autres ont connu un simple changement (diffusion) de direction. C'est-à-dire diviser les rayons parallèles en plusieurs rayons se dirigeant dans toutes les directions. Pour l'élément de surface considéré, la composante de diffusion D (W/m^2) provenant de toutes les directions est la composante la plus difficile à calculer.[11]

1.5.2.3. L'albédo : I_L

Parvenant au sol, le rayonnement solaire n'est qu'en partie absorbé. On appelle albédo la fraction de rayonnement réfléchi par le sol, il dépend directement de la nature du sol (prairie, terre, désert). Le rayonnement réfléchi par le sol n'est évidemment à prendre en considération que pour les surfaces inclinées. [11]

1.5.2.4. Rayonnement Global : I_G

Le rayonnement solaire global est simplement la somme des parties directe et diffuse. Il existe deux types de données d'ensoleillement. Rayonnement instantané : La courbe d'intensité Rayonnement est considérée comme une fonction du temps. Rayonnement cumulé : rayonnement global cumulé par jour. Ce sont toutes des valeurs cumulées pour l'année été en année et l'on en réalise avec des moyennes pour chaque mois de l'année.[11]

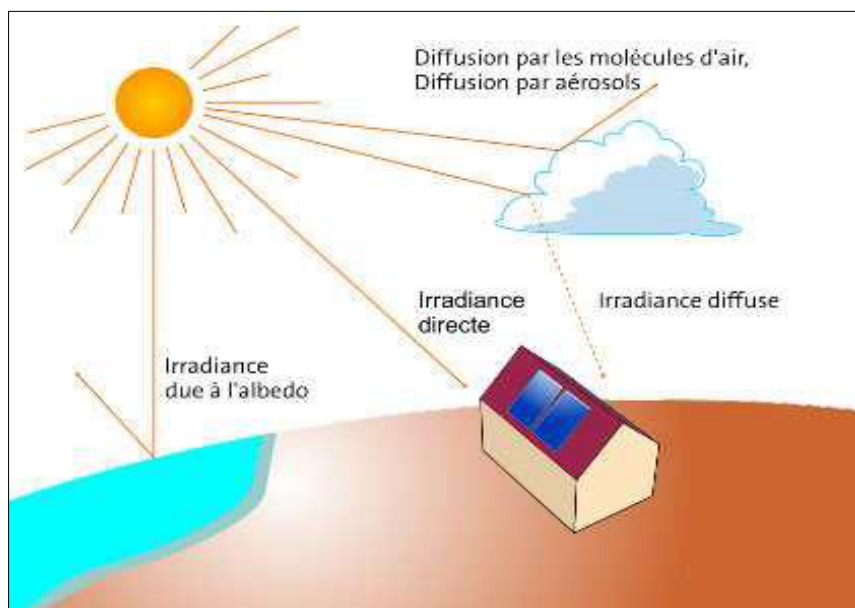


Figure I.5 : Les différents composants du rayonnement solaire [50]

I.6. Mesure du rayonnement au sol :

De façon générale, la méthode utilisée pour mesurer le rayonnement solaire consiste à transformer l'énergie rayonnée en chaleur. L'irradiation solaire globale est souvent mesurée par des Pyranomètres thermoélectriques, utilisant des piles thermoélectriques à surface plane correctement nivelées pour être parfaitement horizontales. L'insolation est mesurée par un héliographe qui utilise les effets thermiques du rayonnement solaire.

I.6.1. Mesure du rayonnement direct (Le Pyrhéliomètre) :

Au sol, la mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un Pyrhéliomètre. Cet instrument est en permanence orienté vers le Soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. [12,13]



Figure I.6 : Le Pyrhéliomètre [12]

I.6.2. Mesure du rayonnement diffus et global (Le Pyranomètre) :

Au sol, la mesure du rayonnement solaire global est faite à l'aide d'un Pyranomètre. Cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie, en provenance d'un angle solide de 2π stéradians [1]. Le domaine spectral couvert s'étend de 0,3 à $3 \mu\text{m}$. Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global; elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série [12,13]



Figure I.7: Le Pyranomètre [12]

I.6.3. Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe) :

L'héliographe est un instrument qui enregistre la durée d'insolation.

Il a été inventé en 1853 par le Britannique J.F. CAMPBELL et l'instrument a été amélioré par Sir George Gabriel STOKES en 1879. L'héliographe classique est constitué d'une sphère de verre qui concentre le rayonnement solaire sur une bande de papier qui brûle partiellement[13]



Figure I.8 : l'Héliographe [13]

I.7. Gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [14].

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés

au monde comme le montre la figure I.9

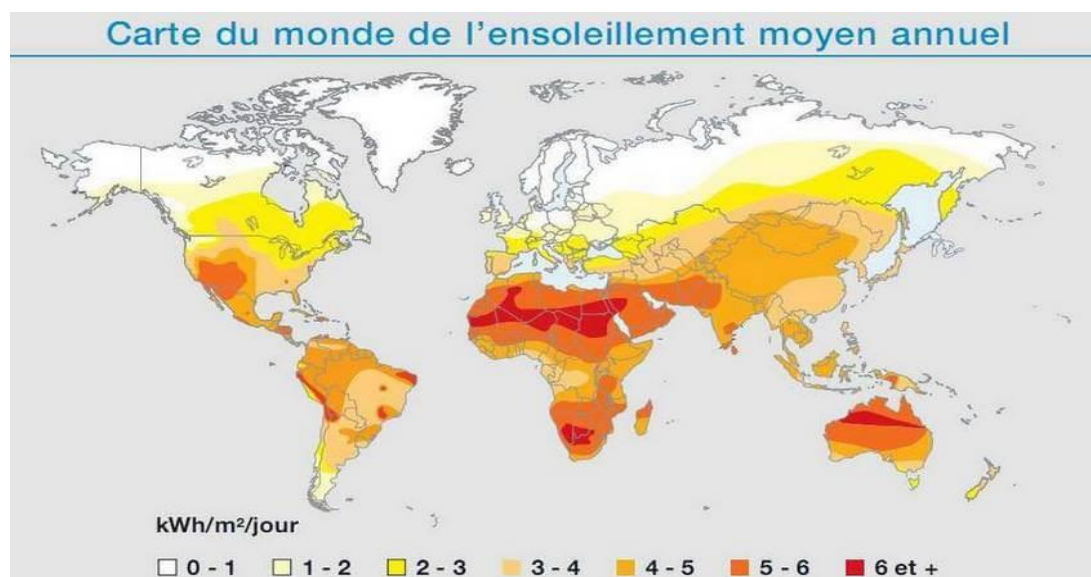


Figure I.9 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [11]

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 kwh/m²/an au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [15].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel. Solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée [16]

donnée dans le **Tableau I.3** : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

Regions	Regions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m²/an)	1700	1900	2650

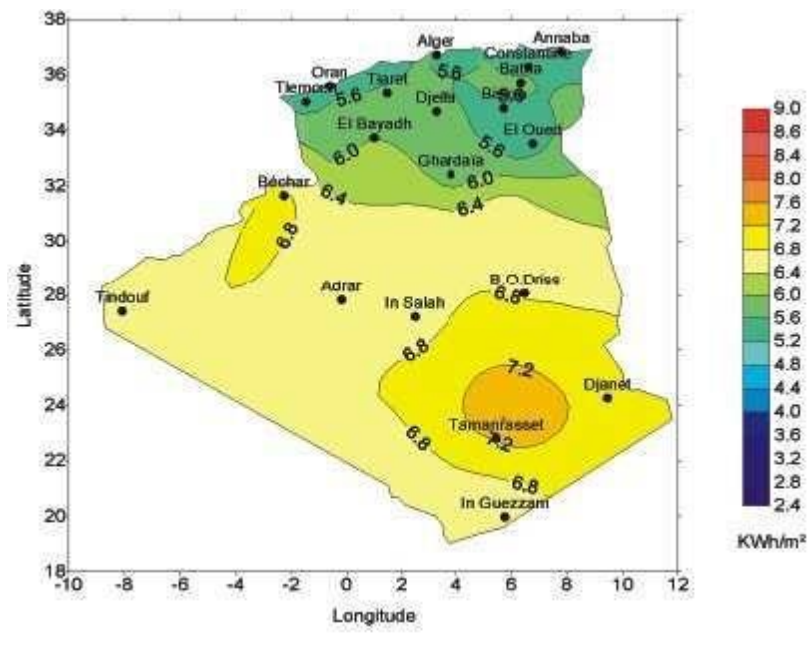


Figure I.10 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale Reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu. [15]

I.7.1. Le réseau algérien de la météorologie :

Comme partout ailleurs dans le Monde, l'insolation et plus rarement, les composantes du rayonnement solaire sont mesurées en Algérie depuis 1970, par l'Office National de la Météorologie à travers son réseau constitué d'une soixantaine de stations météorologiques. les stations météorologiques sont, pour la plupart, concentrées dans la partie Nord englobant les Hauts

Plateaux alors que la couverture du réseau météorologique est quasiment négligeable dans le grand Sud et surtout dans l'extrême Sud de l'Algérie. Par conséquent, eu égard à la situation géographique de l'Algérie, entre les latitudes 19° et 37° nord, et à l'étendue de son territoire d'environ deux millions et demi de km², la densité de ce réseau est très insuffisante pour prendre en charge la collecte de données [18]

I.7.2. situation géographique région(El-oued) :

La Wilaya de El oued est située au Sud-est du pays couvrant une superficie de 54 573 km²
 - les coordonnées géographiques de la wilya El oued sont tablué suivent

(Tableau I.4) : coordonnées géographique (wilaya-ELoued)

Stations	Longitude	Latitude	Altitude (m)
El Oued	6.78	33.50	70

1.8.3. Donne Climat de la région el oued :

- Température moyenne à Oued Souf :

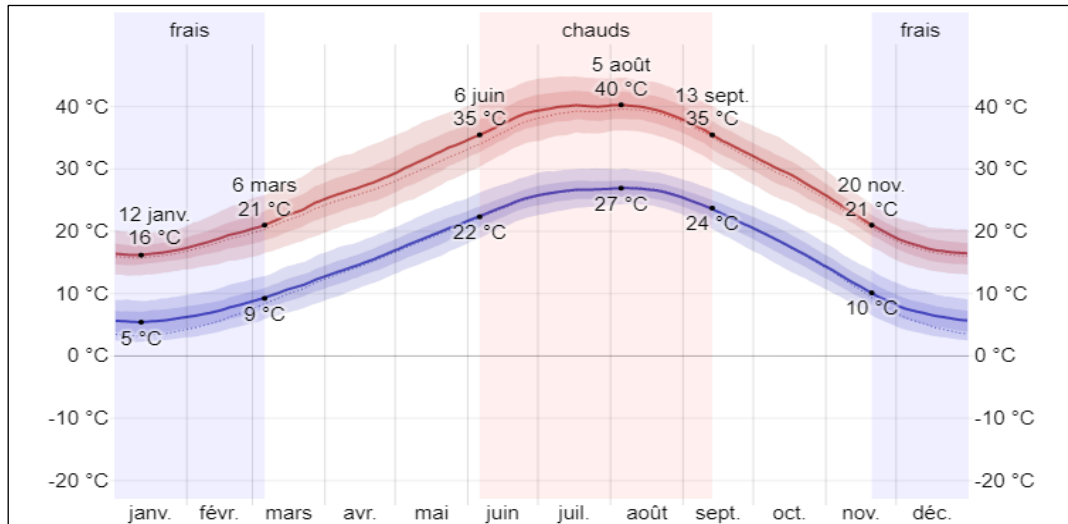


Figure I.11: Variation Température moyenne à Oued Souf eloued 2021 [19]

- Heures de clarté et crépuscule à Oued Souf :

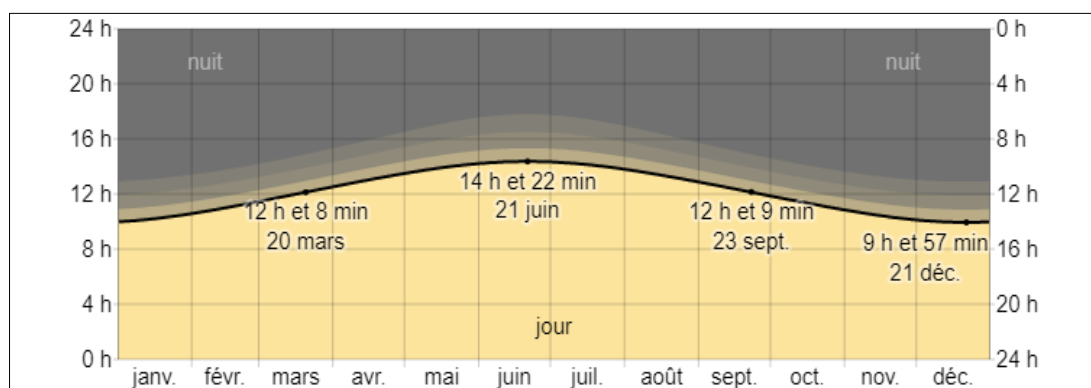


Figure I.12: Heures de clarté et crépuscule à Oued Souf [19]

• Niveaux de confort selon l'humidité à Oued Souf :

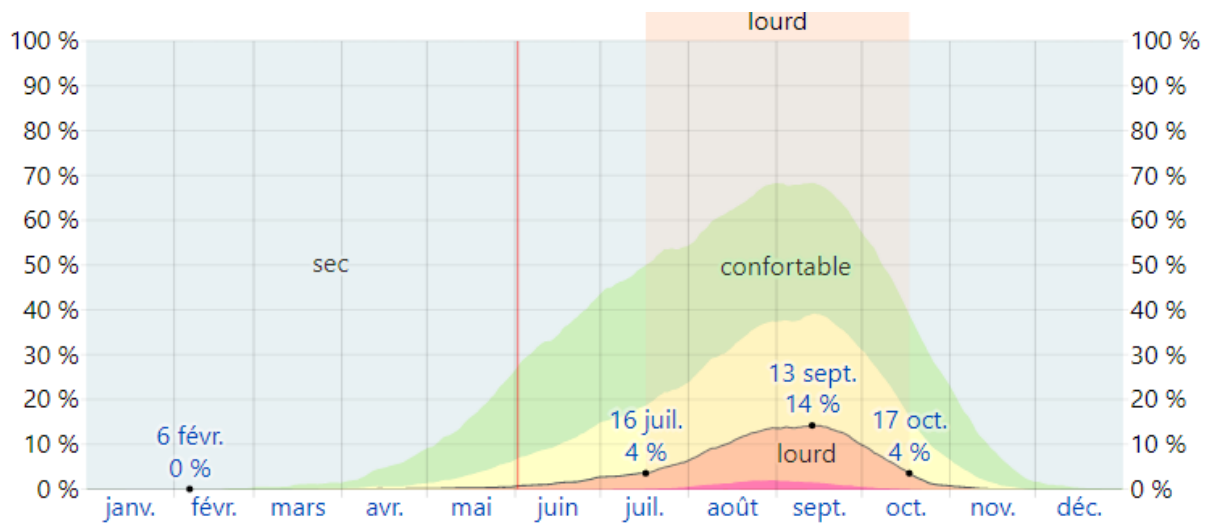


Figure I.13: Niveaux de confort selon l'humidité à Oued Souf [19]

• Vitesse moyenne du vent à Oued Souf :

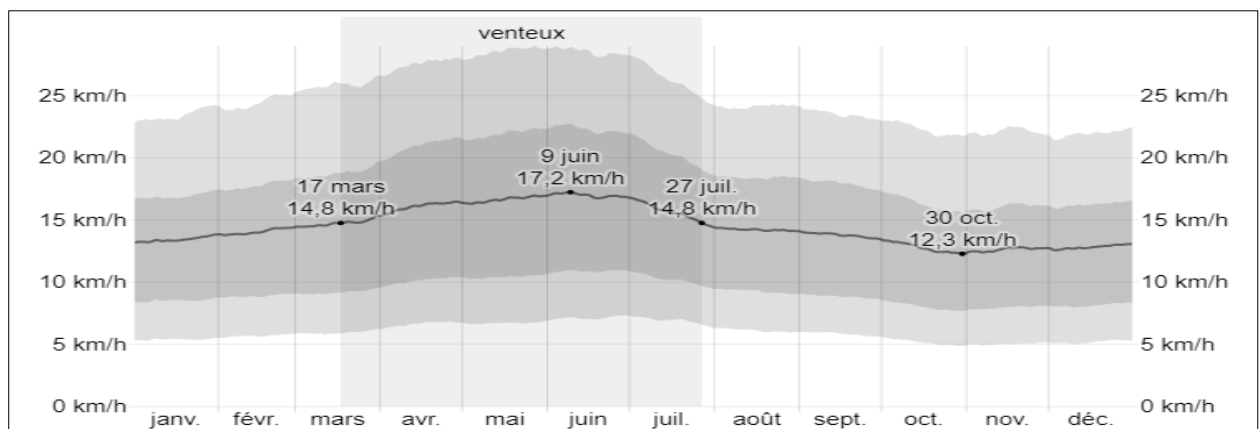


Figure I.14 : Vitesse moyenne du vent à Oued Souf [19]

• Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen à Oued Souf :

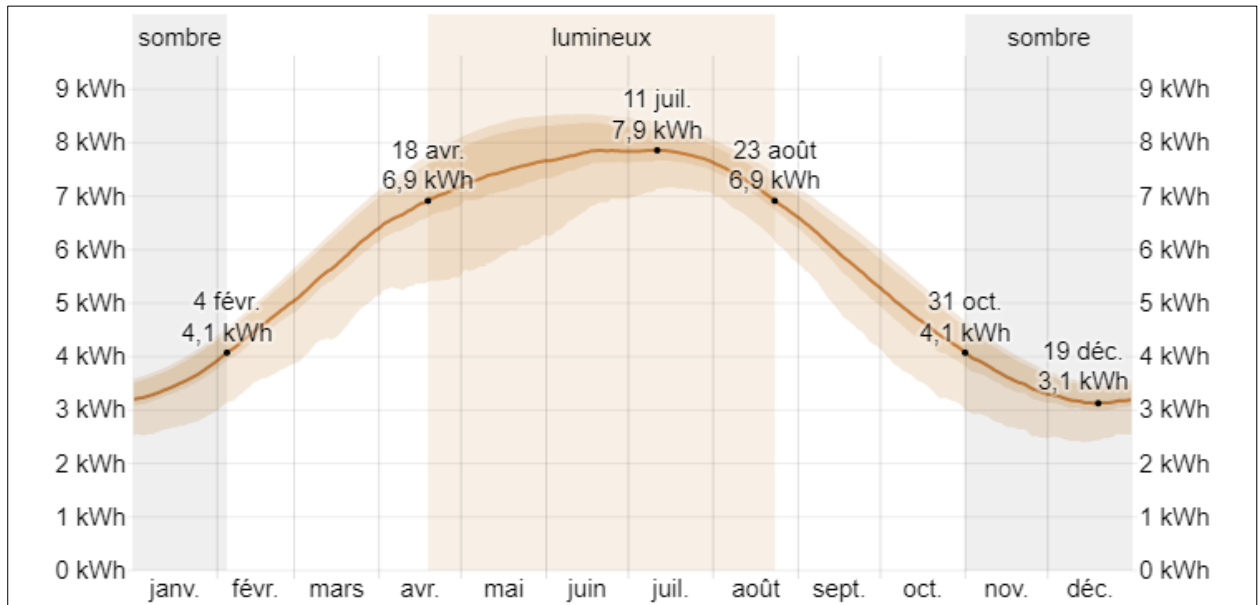


Figure I.15: Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen à Oued Souf [19]

Chapitre II

GÉNÉRALITÉS SUR LE SÉCHAGE ET SECHOIR SOLAIRE

Chapitre II

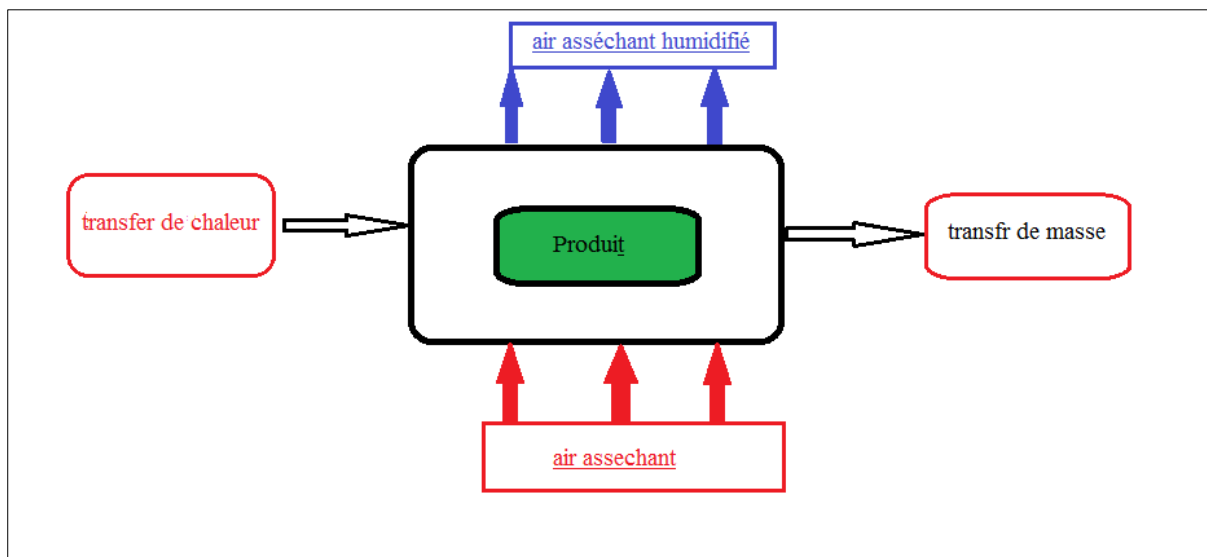
GÉNÉRALITÉS SUR LE SÉCHAGE ET SECHOIR SOLAIRE

I.1. généralités sur le séchage :

I.1.1. Définition de séchage et le but :

Le séchage est un procédé visant à séparer une partie d'un solvant d'un corps humide, en évaporant ce solvant pour obtenir un produit final sec sous forme de solide ou de Le séchage est un procédé visant à séparer une partie d'un solvant du corps humide, en évaporant ce solvant pour obtenir un produit final sec sous forme de solide ou de poudre.[21]

Le séchage est un processus combiné de transfert de chaleur et de masse qui nécessite de l'énergie. Par conséquent, de nombreux types de séchoirs ont été conçus et adaptés à cet effet



FigureII.1 : schéma d'opération de séchage

- **Le But du séchage :**

L'objectif principal du séchage est de réduire la teneur en eau des produits alimentaires agricoles à des valeurs qui empêchent toute activité bactérienne dans un produit, permettant à ce produit d'être stocké et protégé contre la détérioration.

1.1.1 Domaines d'utilisations :

- **Industrie agroalimentaire**

Le séchage des produits alimentaires suscite un grand intérêt sur le marché alimentaire, car il s'agit d'une étape essentielle dans la réduction des produits périssables et ses applications aux produits alimentaires.

- ✓ Les pâtes alimentaires.
- ✓ Le sucre cristallisé est obtenu par évaporation.
- ✓ Le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché

- **Industrie papetière**

Dans ce type d'industrie, le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

- **Industrie du bois**

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois.

- **Matériaux de construction et industrie céramique**

Par exemple : les briques, le carrelage, les assiettes, les bols et les plats

- **La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique**

Comme la fabrication de la levure en poudre, des antibiotiques et le séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage (Vasseur, 2009).

1.1.2 Mécanisme de séchage :

Il suffit de ventiler un produit avec suffisamment d'air chaud et sec pour le sécher. Entre cet air et le produit humide, il y a échange de chaleur et d'humidité. L'air qui est chaud transmet une partie de sa chaleur au produit, ce qui entraîne une pression d'eau partielle à la surface du produit. Surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage Le transport des matières de la surface du solide vers l'air est causé par une différence de pression. Séchage. Par conséquent, il y a deux choses cruciales à considérer lors du contrôle du 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 Fig. II.4.
Le solide a un film d'eau adhérant à sa surface externe par des forces superficielles.[22]

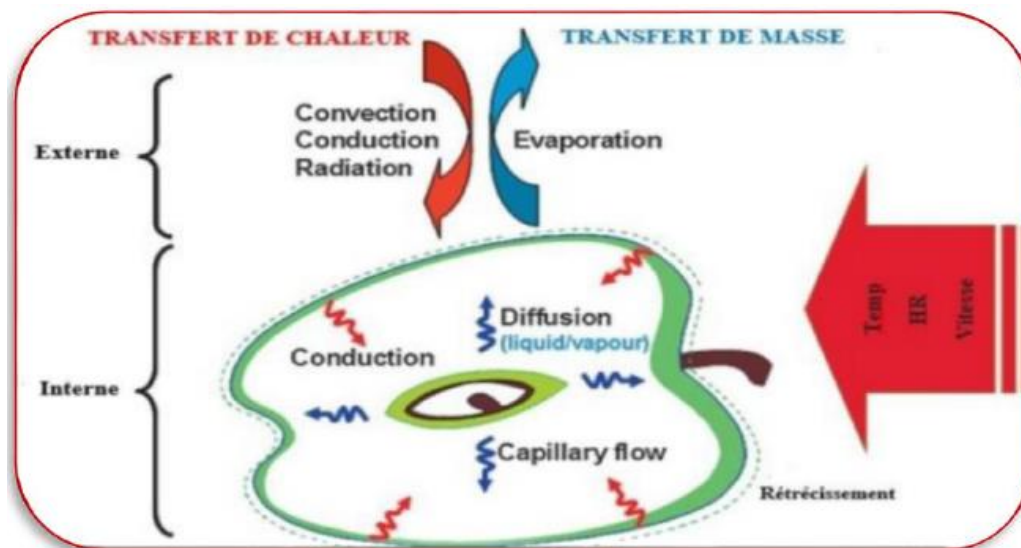


Figure II.2 : Présentation schématique d'un produit humide.[23]

1.1.2.1 Les phénomènes de transfert de chaleur et de matière en séchage :

Le séchage est une opération complexe qui met en jeu des transferts couplés de matière (d'eau essentiellement) et de chaleur, accompagnés de modifications physico-chimiques et de structure du matériau. [23]

1.1.2.1.1 Transfert de matière :

Le transfert de masse est le mouvement d'un constituant d'une solution fluide d'un emplacement de concentration élevée vers une région de concentration plus faible. En établissant une comparaison avec la transmission de la chaleur, nous pouvons rapidement saisir le mécanisme de transfert de masse. Il est possible de transférer de la masse..[23]

1.1.2.2 Le transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu qui les sépare. [23]

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température..

On reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

➤ **Par conduction :**

L'énergie thermique nécessaire au séchage est délivrée par contact direct entre l'objet et une paroi chauffée, plutôt que par un gaz circulant autour de la chose à sécher. Les vapeurs produites par le séchage sont soit aspirées (séchage par ébullition), soit entraînées par un gaz de balayage, dont le débit est toujours inférieur à celui nécessaire au séchage par convection.. Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation :

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad [\text{II.1}]$$

Avec :

Q : débit massique de l'air (kg/s) ;

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m.K) ;

dT/dt : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit ;

A : surface d'échange (m²).

➤ **Par convection :**

C'est probablement la forme la plus courante de transfert d'énergie lors du séchage. Il s'agit de mettre en contact un gaz (air) avec un corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques, et se déplaçant selon un régime généralement turbulent..

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante

:

$$Q = \alpha A (T_a - T_s) \quad [\text{II.2}]$$

Avec :

Q : La quantité de chaleur transférée par unité de temps (W) ;

A : surface d'échange (m²) ;

($T_a - T_s$) : l'écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher (K) ;

α : coefficient d'échange par convection (W / m²· K).

➤ **Par rayonnement :**

L'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement dans ce processus de séchage. Cette méthode de séchage est particulièrement efficace pour éliminer l'eau, en particulier lorsque le produit à sécher est insensible à la chaleur. La relation énergie est donnée

par la loi suivante :

$$Q = A_1 C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi \quad [\text{II.3}]$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad [\text{II.4}]$$

Avec :

T1 : température de la source émettrice(K) ;

T2 : température du produit(K) ;

A1 : surface du corps recevant le rayonnement (m²) ;

A2 : (m²) surface de l'émetteur d'infrarouge (m²) ;

φ : facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit

ε1 : émissivité du produit à traiter ;

ε2 : émissivité de l'émetteur ;

II.1.4. Méthodes de séchage :

II.1.4.1. Séchage en vapeur d'eau surchauffée :

Le séchage en vapeur d'eau surchauffée continue d'être présenté comme une solution émergente le produit à sécher est mis en contact direct d'une vapeur d'eau surchauffée, qui sert simultanément à apporter l'énergie nécessaire au séchage et à extraire la vapeur produite lors du séchage. Ce concept est connu depuis plus d'une centaine d'années et les premières applications effectuées en Allemagne remontent à une soixantaine d'années. (Arlabosse, 2008).

II.1.4.3. Séchage par osmose :

La déshydratation/ imprégnation (également connu sous le nom de déshydratation osmotique ou déshydratation par osmose directe) est une procédure qui consiste à exposer des produits entiers ou hachés, en particulier des fruits et légumes, à des liquides hautement concentrés. Il en résulte essentiellement deux transferts de masse simultanés dans le sens opposé du courant. : [27]

- Un important départ d'eau, du produit vers la solution.

- Un transfert de soluté, de la solution vers le produit

II.1.4.4. Séchage par ébullition :

Le produit est porté à la température telle que la pression de vapeur d'eau du produit devient égale à la pression totale ambiante régnant dans le séchoir. La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition.[26]

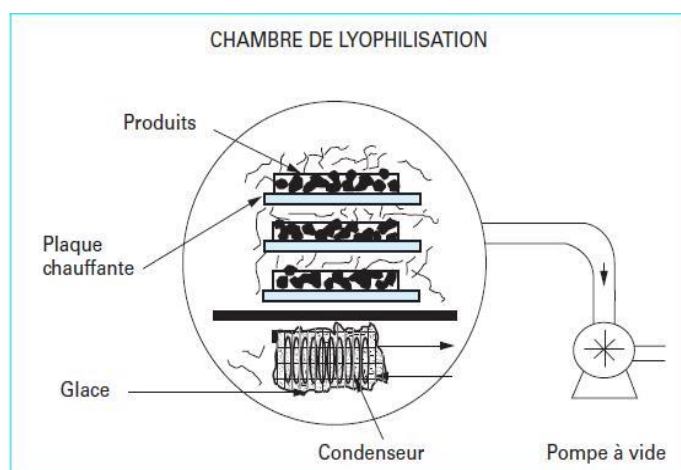
II.1.4.5. Séchage par entraînement :

L'énergie est apportée par un gaz vecteur en mouvement, généralement de l'air chaud. Ce gaz est conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle du produit, et la pression de vapeur d'eau P dans le produit est supérieure à la pression partielle d'eau p dans l'atmosphère qui l'entoure. Il s'agit en fait d'un transfert de masse par gradient de pression de vapeur d'eau. (Boussalia, 2010).

II.1.4.6. Séchage par lyophilisation :

La lyophilisation combine les effets du froid et du vide pour provoquer la sublimation des cristaux de glace ou la transition directe de l'état solide (glace) à l'état de vapeur.

Des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur sont alors utilisés pour retirer ces derniers de la chambre de séchage.[28] [ouache hidiya]



FigureII.3 :Lyophilisation [48]

II.1.4.7. Séchage à l'étuve :

Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour, et la taille de l'échantillon à tester. Même si cette taille n'est pas en général critique, le temps de séjour dans l'étuve doit être adapté au rapport surface/volume. On appelle « matière sèche » la masse finale constante restante, et la perte de masse (différence entre la pesée avant et après séchage) donne

la teneur en eau initiale. (Vasseur, 2009).

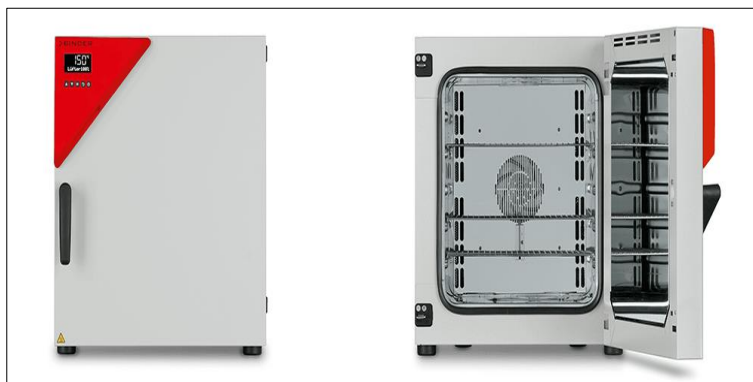


Figure II.4: Photographie d'une étuve [48]

II.1.4.8. Séchage par micro-ondes :

C'est un processus complexe impliquant un transfert de chaleur et de masse, qui est basé sur le chauffage volumétrique. La vapeur est générée à l'intérieur d'un produit alimentaire et qui se propagent ensuite par les gradients de pression. En raison de la forte pénétrabilité des micro-ondes, les aliments à l'intérieur et à l'extérieur sont chauffés en même temps et la température des aliments augmente simultanément. Le séchage par micro-ondes traduit la haute fréquence électromagnétique l'énergie en chaleur, ce qui permet l'évaporation intensive de l'humidité liquide et transporté vers la surface de la matière alimentaire. (Guo et al., 2017).

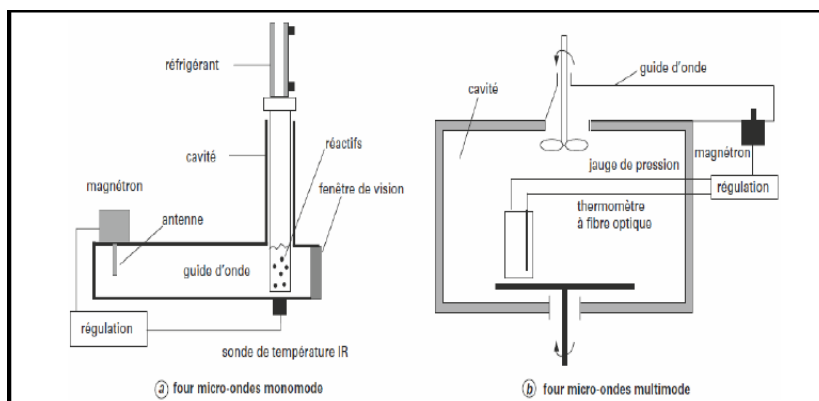


Figure II.5 : Schéma d'un four micro-ondes monomode et multi mode (Perino et Chemat, 2015).

II.1.4.9. Séchage par énergie solaire :

Des capteurs solaires pour l'air sont utilisés. La chaleur que ces capteurs collectent est transférée à l'air qui circule dans le canal d'écoulement. Cet air chaud circulera dans une pièce contenant les matériaux de séchage. Cela garantit une plus grande hygiène tout en évitant la modification et la perte de produit. Ce mécanisme de séchage est utilisé pour sécher les herbes

médicinales, les fruits et légumes, la viande, le poisson et d'autres articles légers qui pourraient s'envoler (Labeled, 2012).

II.1.4.9.1. Les différentes principes de séchage solaire :

En séchage solaire, deux types de procédés sont généralement utilisés. Soit du matériel pour Le séchage reçoit l'énergie solaire directe, ou un dispositif solaire capte l'énergie solaire destinée à préchauffer l'air qui circule ensuite sur les grilles du séchoir ou l'air est chauffé par un capteur thermique qui à son tour chauffe un produit dans une pièce spéciale. [Youssef Ali, 2001] [Touati, 2008]

Ainsi, il semble logique de classer les séchoirs solaires en deux catégories. [29]

❖ Séchage en mode direct :

Il s'agit d'un type traditionnel et facile qui dépend de l'exposition d'un produit directement au soleil

Cette technique n'est pas hygiénique et a pour conséquence la perte significative de produit, due particulièrement à la contamination par la saleté, la poussière, le vent, l'infestation par des insectes

❖ Séchage en mode indirect :

On recourt à des dispositifs conçus pour que le séchage s'opère sous forme indirecte. Des capteurs solaires sont alors utilisés pour préchauffer l'air de séchage afin de contrôler ses caractéristiques hygrométriques avant qu'il ne circule sur le produit

En mode direct comme en mode indirect, lorsque la circulation de l'air est assurée par un ventilateur, l'écoulement de l'air par convection forcée apporte des améliorations au séchage par mode indirect et convection forcée

II.1.5. Paramètres de séchage :

II.1.5.1. Caractéristiques dès l'air de séchage :

II.1.5.1.1. L'humidité absolue (H) :

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau ; représentant le rapport de la masse de la vapeur d'eau (m_{ve}) contenue dans un volume V de l'air humide sur la masse d'air sec (m_{as}) contenue dans ce même volume. (Benammar et Gouri, 2018).

$$H = \frac{m_{ve}}{M_{as}} \quad [II.5]$$

II.1.5.1.2.L'humidité relative(H_r) :

L'humidité relative H_r) c'est le rapport entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air(P_v) sur la pression de saturation ($P_{s,\theta}$) de cette vapeur d'eau à la température θ . (Benammar et Gouri,2018).

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad [II.6]$$

II.1.8.1.3. degré de saturation (Ψ):

En pratique, on utilise beaucoup plus l'humidité absolue (H) que la pression P_v par conséquent on donne le rapport entre l'humidité absolue (H) de l'air pour une certaine température et H_s humidité absolue correspondante à l'état de saturation pour la même température ; rapport appelée degré de saturation Ψ .

$$\Psi = \frac{H}{H_s} \quad [II.7]$$

II.1.5.1.4.Température :

➤ **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. [31]

➤ **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. [30]

II.1.5.2.Caractéristiques des solides humides :

II.1.5.2.1.Teneur en eau (à base séché) :

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau ou humidité à base sèche s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche [31]

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad [II.8]$$

II.1.5.2.2 Humidité relative (teneur en eau) :

L'humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad [\text{II.9}]$$

II.1.5.2.3. Hygroscopicité :

L'hygroscopicité d'un corps c'est sa tendance à absorber l'humidité de l'air.

La présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur due aux forces de surface et de force capillaire qui sont fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température.

II.1.8.2.4. Activité de l'eau dans le produit :

L'activité de l'eau dans le produit (A_w) est une grandeur liée à l'humidité du produit. On a défini l'activité de l'eau a_w dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) à la pression de vapeur de l'air saturé (P_{vs}). [32]

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad [\text{II.10}]$$

Avec :

P_{vp} : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit,

P_{vs} : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé.

II.1.5.3. Vitesse de séchage :

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface d'évaporation du matériau. L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors [33]

$$V_s = \frac{-dM_v}{S_s dt} = \frac{M_s dx}{S_s dt} \quad [\text{II.11}]$$

$$M_v = M_s dX \quad [\text{II.12}]$$

$$dX = X_e - X_s \quad [\text{II.13}]$$

M_v : La masse d'eau évaporée.

M_s : La masse de produit sec.

dX : L'humidité de produit au début et à la fin de l'opération.

S : La surface de séchage.

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

-La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.

-La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur.

II.1.5.4. Cinétique du séchage :

Des courbes illustrant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps permettent d'étudier la cinétique de séchage de différents produits. Ces courbes sont souvent obtenues dans des conditions expérimentales variées.

Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps. [31]

II.1.5.4.1. Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide :

La nature du produit détermine les courbes de vitesse de séchage en fonction du temps dans toutes les activités de séchage. Cependant, nous voyons que le processus de séchage comporte trois phases distinctes. [31]

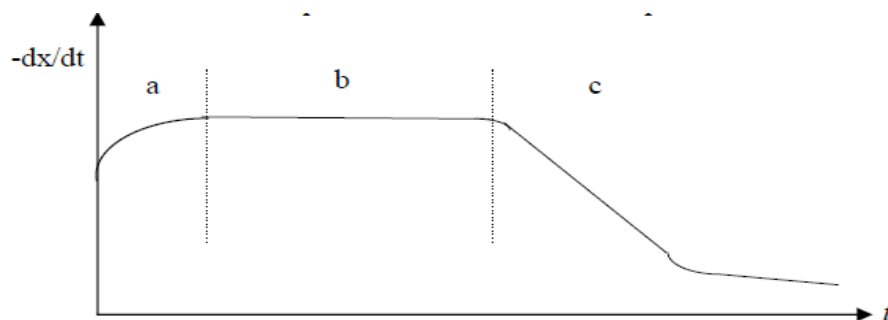


Figure II.6: périodes du séchage [31]

➤ **Période de mise en température (région a) :**

Elle est souvent très courte et se caractérise par une vitesse de séchage croissante et correspond à la montée en température du produit jusqu'à une température d'équilibre.

Lorsque le produit reçoit autant de chaleur de l'air qu'il doit en fournir à l'eau, il est alors en phase de sa vaporisation. Cette température d'équilibre n'est pas atteinte de suite puisque le produit avait au départ du séchage une température plus basse, et une inertie thermique relativement importante.

➤ **Période à allure constante (région b) :**

Période à vitesse de séchage constante : Dans cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet de la température de bulbe humide; l'activité de l'eau à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique.

Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit (Mouafki, 2004)

➤ **Période de ralentissement (région c) :**

A ce phase, la vitesse de séchage diminue Correspond à une évaporation d'eau restreinte. Eau libre qui se déplace de l'intérieur vers l'extérieur du produit pour être complètement convertie en vapeur d'eau [35]

II.1.6. Avantages et inconvénients du séchage :

Tableau II.1 : avantage et inconvénient du séchage

Avantages du séchage	Inconvénients du séchage
Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois	Perte de vitamine A (3% pour les légumes) après 6 mois de conservation et la vitamine B1 (10 à 20 %) et la vitamine C (35%)
La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments	Coût énergétique élevé
L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau	Migration des constituants solubles
La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique.	Formation d'une couche gommeuse imperméable suite à un séchage rapide
Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récoltes	Réaction de Maillard (brunissement) suite à une surchauffe et Concentration de la coloration

II.2. Séchoir solaire :

II.2.1. Description d'un séchoir solaire :

Le séchoir solaire est une construction qui capte les rayons solaires pour sécher les aliments disposés à l'intérieur. Il nous permet comme le dé hydrateur de sécher tous les fruits, légumes, herbes, poissons et viandes. Il est souvent construit en bois avec une plaque de verre qui sert à reproduire un effet de serre à l'intérieur du séchoir.

Le séchoir solaire a un potentiel important dans le secteur agricole, où il est utilisé pour le séchage des légumes, des fruits et des plantes médicinales. Ainsi minimiser la dépendance sur le séchage au soleil et le séchage industriel, d'où économiser d'énormes quantités de fossiles [34].

II.2.2. Classification des systèmes de séchoirs solaire :

Le choix d'un type de séchoir est une opération très importante, il devrait être orienté en fonction des besoins propres à l'utilisateur :

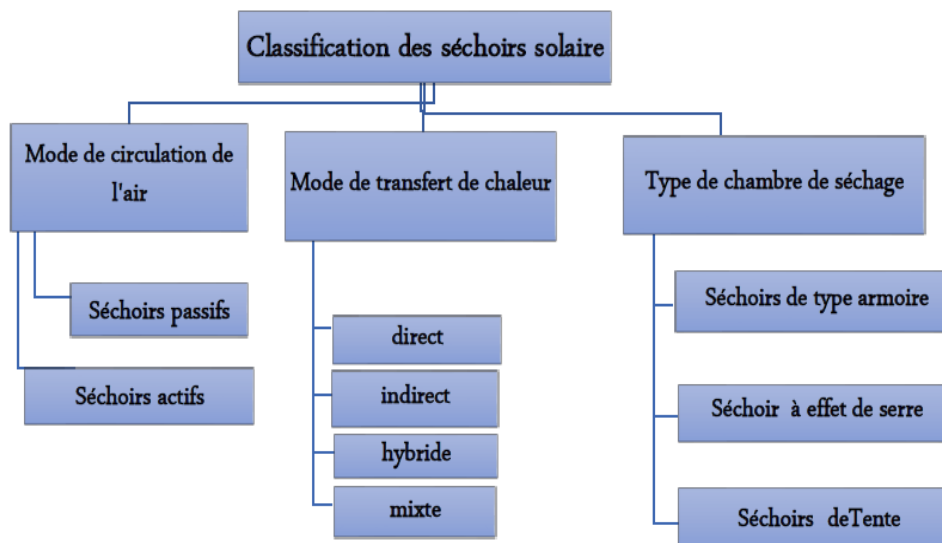
Pour cette raison plusieurs types de séchoirs solaires ont été conçus et étudiés. Ainsi, suivant qu'il s'agit de fruits, de grains ou de bois... etc., les structures des séchoirs sont variables (disposition des produits, dimensions, température ...). Suivant leur origine énergétique on peut distinguer : [37]

-Les systèmes passifs : l'énergie solaire seule en assure le fonctionnement ;

- Les systèmes actives : ils associent à l'énergie thermique solaire une énergie d'appoint fuel gaz pour chauffage ou bien l'électricité pour la circulation de l'air

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.



FigureII.7 : Classification des séchoirs solaires selon

II.2.2.1 Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont faciles à utiliser et à assembler. Du séchoir coffre avec plateau, qui convient aux petites productions, au séchoir cabine, qui peut gérer de grands nombres, ils offrent un large éventail d'options de conception [37]

II.2.2.1.1.Principe de fonctionnement :

Dans ce type de séchoirs, les rayons solaires frappent directement les produits. Et d'après la figure (04) le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois d'une chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l'interaction directe « rayonnement solaire – produit » engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments. [38]

II.2.2.1.2.Avantages et inconvénients :

➤ *Avantage :*

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel
- Grandes possibilités de conception.

➤ **Inconvénients :**

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

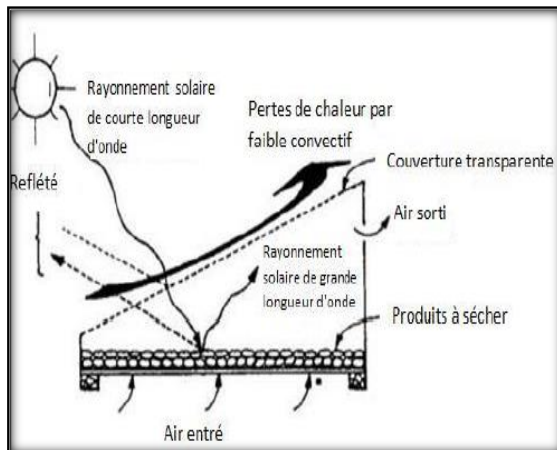
II.2.2.1.3. Type de séchoirs directs :

a) Séchoirs solaires passifs :

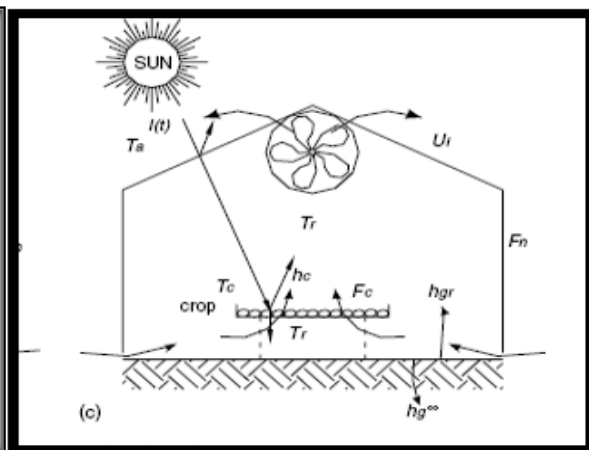
Ce type de séchoir est connu sous le nom de séchoir à caisson. La figure II.10 illustre le principe de ce type de séchoir [Sharma et al. 2009]. Une partie de l'énergie solaire entrante est réfléchiée par un couvercle transparent et le reste est dirigé vers le séchoir. Une partie de l'énergie solaire envoyée au séchoir est réfléchiée par les produits à sécher, et le reste est absorbé par ces produits et les matériaux qui composent les parois du séchoir. Le couvercle transparent aide également à réduire la perte de chaleur due à la convection avec le milieu ambiant [39].

b) Séchoirs solaires actifs :

Dans ce type de séchoir, l'air asséchant circule dans le séchoir sous l'action d'un ventilateur. Ainsi, le contrôle du débit d'air contribue à la réduction de la surchauffe du produit et à une diminution de la durée de séchage. La figure II.11 présente un exemple de ce type de séchoir [39].



Figure(II.8) : Schéma d'un séchoir Solaire direct passif [38]



Figure(II.9) : Schéma d'un séchoir solaire direct actif [38]

II.2.2.2 Séchoirs solaires indirects :

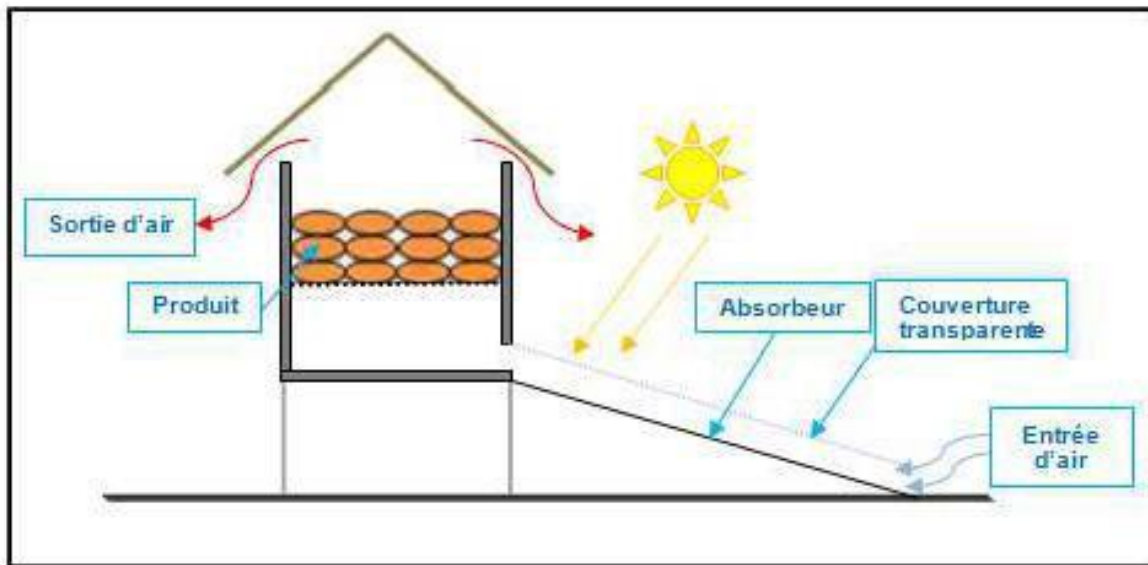
Ces séchoirs sont constitués de deux composants principaux, le capteur thermique et la chambre de séchage, qui sont interconnectés

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits ne sont pas exposés à la lumière du soleil, mais

plutôt le collecteur est dirigé pour recevoir les rayons incidents.

II.2.2.2.1. Principe de fonctionnement :

L'air pénètre dans le capteur solaire et se déplace le long de celui-ci par convection naturelle ou forcée, de sorte que la température de l'air augmente en raison du transfert de chaleur de l'absorbeur vers l'air et avec la lumière du soleil qui tombe d'une part, puis l'air se



déplace

Figure (II.10) : Le principe d'un échoir solaire indirect [39]

II.2.2.2.2. Avantages et inconvénients :

➤ Avantages :

- ✓ Les produits séchés conservent leur valeur nutritive et leur couleur
- ✓ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

➤ 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.

II.2.2.2.3. Types du séchoir indirect :

a) Le séchoir armoire :

Dans ce type de séchoir, le collecteur capte l'énergie solaire. L'air chaud s'élève jusqu'à la chambre de séchage où les produits sont disposés sur des claies superposées. [40]

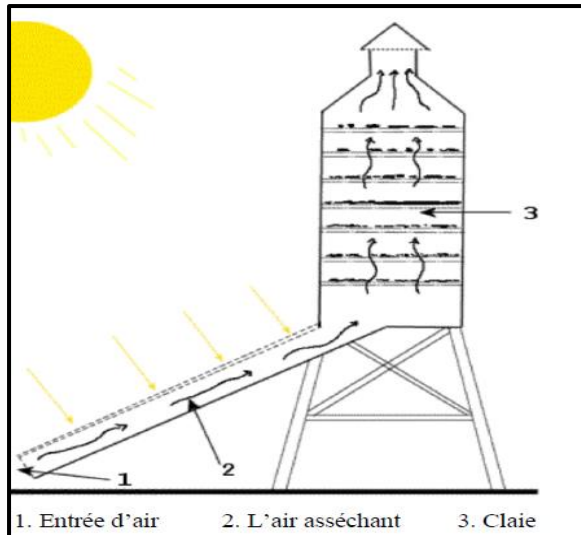


Figure II.11 : Diagramme schématique du séchoir indirect *armoïre* passif [31]

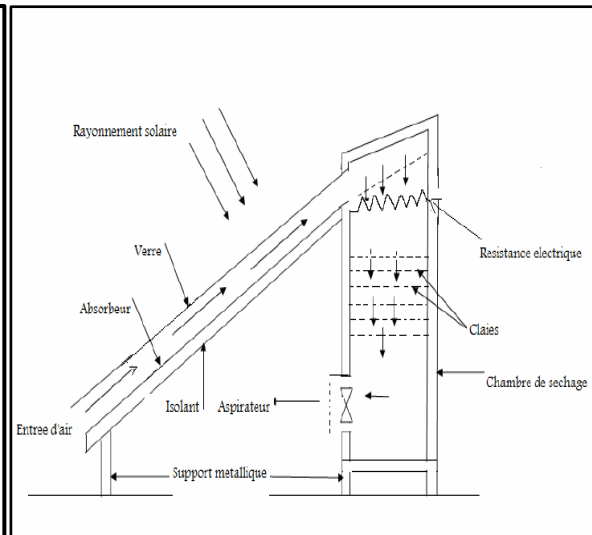


Figure II.12 : Diagramme schématique du séchoir indirect *armoïre* actif [31]

b) Les séchoir-tunnel :

Ce sont des séchoirs industriels destinés au séchage des grandes récoltes et dans les processus de conservation de certains aliments. Ils se composent d'un champ de capteurs solaires et d'un circuit aéraulique, le tout constituant le générateur d'air chaud. Le produit à sécher est disposé dans des chariots montés sur des rails, qui traversent un tunnel de quelques mètres de façon continue [40]



Figure II.13 : Séchoir solaire tunnel [39]

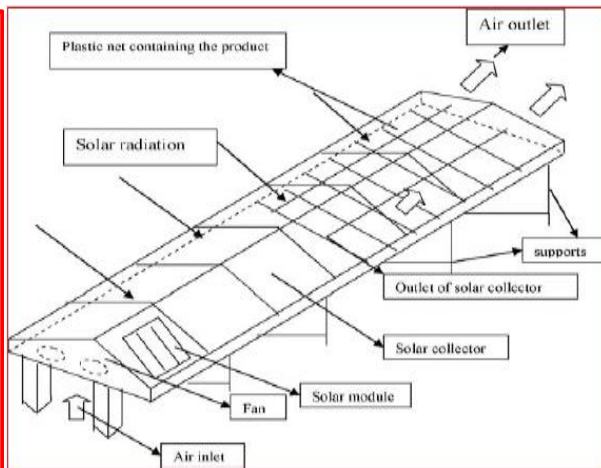


Figure II.14 : Schéma d'un séchoir solaire tunnel

II.2.2.3. Séchoirs solaires mixtes :

Ces séchoirs combinent les caractéristiques des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, l'effet combiné de la lumière directe du soleil sur le produit à sécher et du capteur

solaire est destiné à fournir la chaleur nécessaire au processus de séchage.

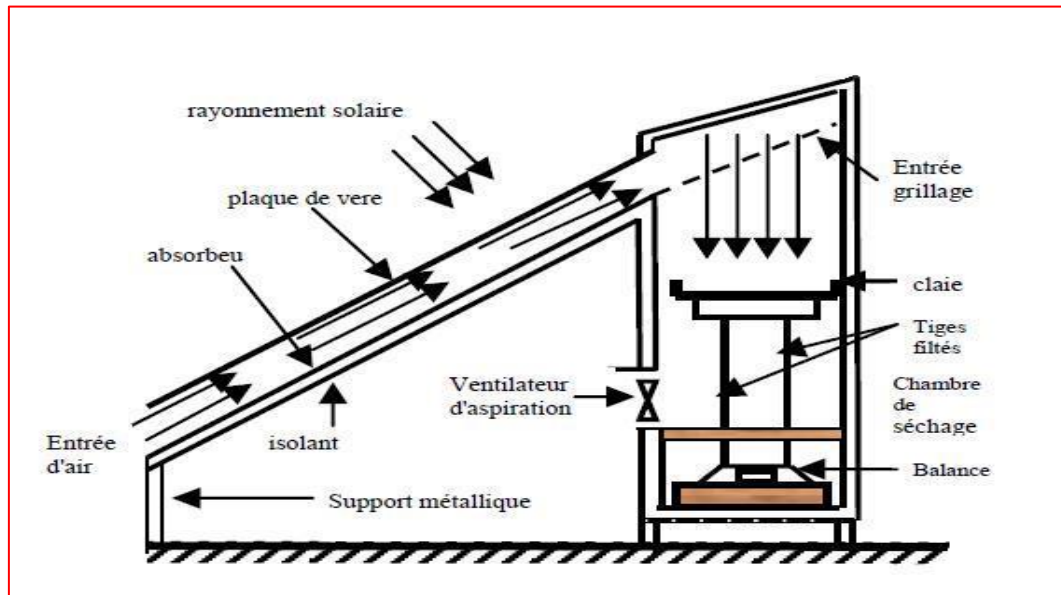


Figure (II.15). Séchoir solaire mixte (Khedimou, 2016)

II.2.2.4. Les séchoirs solaires hybrides :

Les systèmes de séchage actifs (hybrides) utilisent des systèmes de chauffage solaires, électriques ou à combustibles fossiles pour les ventilateurs ou les pompes avec moteurs pour faire circuler l'air, les entrées d'alimentation supplémentaires peuvent être :

- ✓ La puissance supplémentaire aide à maintenir une température constante à l'intérieur de la sécheuse, quelles que soient les conditions météorologiques l'énergie solaire devient secondaire, car elle permet à l'air d'être chauffé.
- ✓ Le ventilateur assure la circulation de l'air à l'intérieur du sèche-linge. L'énergie solaire reste cependant la seule source de chaleur le sécheur à une plus grande capacité d'évaporation grâce à l'important grâce à une ventilation améliorée. [41,42]

II.2.2.4.1. Avantages et inconvénients :

❖ Avantages

- ✓ Séchage rapide et d'excellente qualité et Très grande productivité
- ✓ Contrôle de la température.

❖ Inconvénients

- ✓ Coût très élevé de l'investissement
- ✓ Personnel qualifié pour la maintenance

II.2.2.4.2. Type de séchoir hybride :

a) Séchoir hybride solaire – gaz

Il se compose d'un capteur solaire qui chauffe l'air et d'une convection naturelle qui fait circuler l'air du capteur solaire vers l'armoire. Si la température est trop basse, un brûleur à gaz est activé pour l'élever au niveau requis. Ainsi, les produits peuvent rester secs par tous les temps [43]

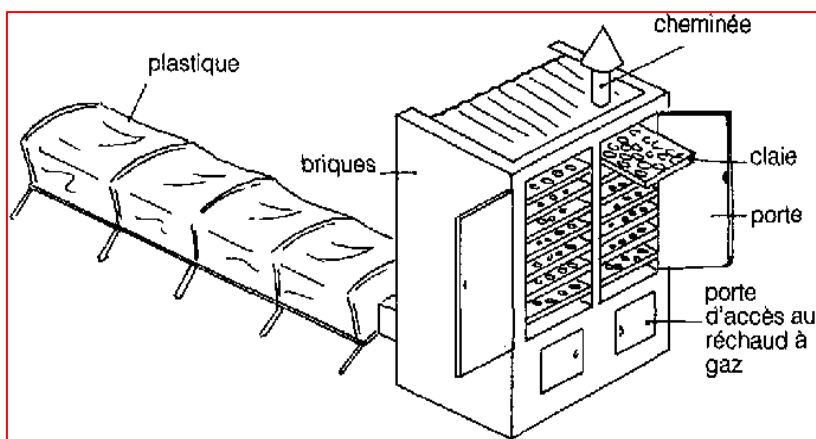


Figure (II.16) : Séchoir solaire hybride solaire-gaz (Dudez 1999)

b) Séchoir hybride à convection forcée :

Ce type de séchoir a un toit (Figure II.17) qui agit comme un capteur et un ventilateur qui assure une circulation d'air adéquate, permettant un séchage rapide. des produits. Un ventilateur aspire l'air de l'intérieur de la structure et le fait passer à travers un capteur solaire sur le toit. L'air chaud entre dans la chambre de séchage, qui comporte des rangées de casiers empilés avec les marchandises à sécher.

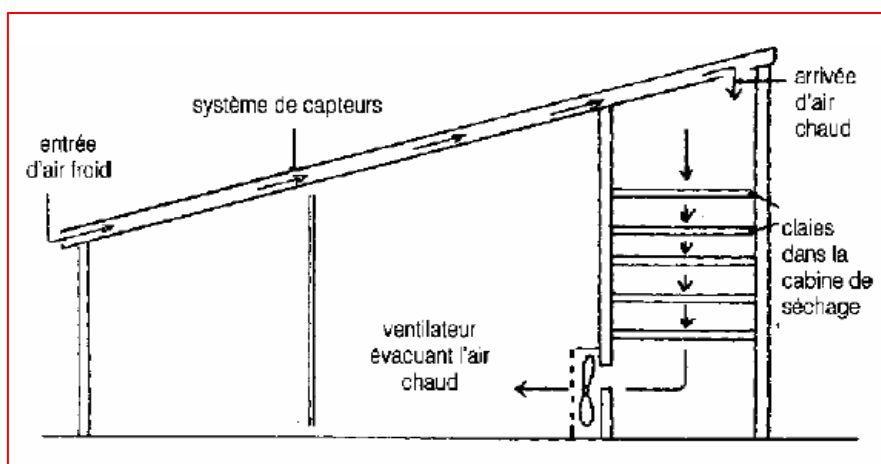


Figure (II.17) : Séchoir solaire hybride à convection forcée [43]

II.3. Capteur solaire thermique :

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils spéciaux d'échangeur de chaleur qui permettant la conversion de l'énergie de rayonnement solaire en énergie thermique [44].

Fondamentalement, Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- les capteurs plans.
- les capteurs par concentration.

II.3.1.Principe des échanges et fonctionnement d'un capteur solaire plan à air :

Les capteurs solaires sont conçus pour convertir le rayonnement incident en énergie thermique à basse et moyenne température et le transférer à un fluide caloporteur. La technique de ces systèmes est simple : elle est basée sur le pouvoir absorbant de la surface traitée,

Absorbeur. L'absorbeur absorbe les rayons solaires et s'échauffe, transfère une partie de l'énergie récupérée au fluide caloporteur (air) et en restitue une partie avec des rayons infrarouges. Au-dessus de l'absorbeur se trouve une fenêtre en polycarbonate en nid d'abeille qui est transparente au rayonnement solaire visible et opaque aux rayons infrarouges qui l'absorbe et le renvoie vers l'absorbeur, " piéger " le rayonnement entre l'absorbeur et le verre. Augmenter la température de l'absorbeur. C'est l'effet de serre. Isolation à l'arrière et sur les côtés du capteur. (Voir figure II.18).[46]

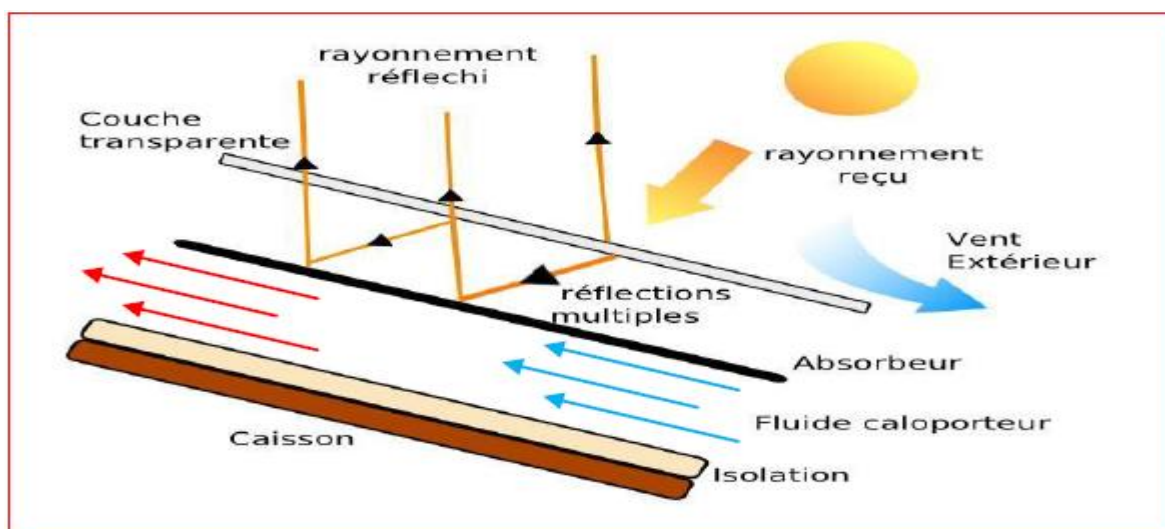


Figure (II.18). Principe de fonctionnement du capteur solaire plan [45]

II.3.2.Composants des capteurs solaires d'air :

II.3.2.1. Le fluide caloporteur :

Il est responsable du transfert de chaleur entre l'absorbeur et le capteur solaire L'air est abondant et vide et a une faible capacité calorifique

II.3.2.2. L’absorbeur :

L'absorbeur est le composant principal du capteur solaire, il capte rayonnement solaire globale à courte longueur d'onde et la convertit en chaleur. Il est composé d'une plaque en métal ou en plastique.

Un absorbeur efficace, en général, a une capacité d'absorption élevée et une faible émissivité. Les surfaces métalliques, en revanche, ont tendance à réfléchir la lumière, ce qui entraîne une perte d'énergie. [47]

II.3.2.2.1. Les différents revêtements possibles :

Tableau II.2 : Le coefficient d’absorption et le coefficient d’émission pour les supports les plus utilisés comme absorbeur [48]

Support et traitement	Coefficient d’absorption	Coefficient d’émission
Acier et chrome noir sur nickel	0,95	0,09
Cuivre noir	0.88	0.15
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08
Aluminium et oxyde de manganèse	0.70	0.08
Peinture noir époxy	0.95	0.18
Peinture blanche époxy	0,25	0.91

II.3.2.3.La couverture transparente :

❖ **Le verre :**

Le rayonnement solaire passe à travers mais le rayonnement infrarouge d'un émetteur, tel que l'absorbeur, est bloqué. De ce fait, la chaleur est piégée entre l'absorbeur et le couvercle. Le verre solaire qui servira de couverture doit être résistant aux chocs, aux changements de température et aux températures extrêmes. La transmissivité varie d'un matériau à l'autre, et cette différence a un impact direct sur les performances du capteur.

L'efficacité optique ou taux de transmission du verre est déterminée par la nature et l'épaisseur du vitrage, ainsi que par l'angle d'incidence et le type de rayonnement (direct ou diffus) (valeur typique de 0,91).[46]

II.3.2.4.L’isolation thermique :

L'absorbeur se réchauffe en absorbant les rayons solaires, en transférant une partie de l'énergie récupérée à un fluide caloporteur (l'air) et en en réémettant une partie dans l'infrarouge. Tout en réduisant les pertes de chaleur vers l'extérieur, l'absorbeur doit transporter

l'énergie captée vers le fluide caloporteur. Les capteurs solaires sont fournis avec une isolation thermique avec des épaisseurs allant de 4 à 8 cm à cet effet. Les mousses de polyuréthane et la laine de verre, ainsi que le bois et la céramique, sont les matériaux les plus couramment utilisés. Les matériaux isolants utilisés doivent pouvoir supporter des températures de fonctionnement jusqu'à 120°C. Les conditions climatiques influencent la durabilité et la résistance aux chocs dans le temps. [46]

II.4.Le stockage :

II.4.1.Stockage thermique :

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé [17].

La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes :

- La chaleur sensible
- La chaleur latente
- La chaleur des réactions (thermochimie)

II.4.1.1 Stockage sensible :

Cette méthode est basée sur le chauffage d'un milieu liquide ou solide sans changement de phase, la température du milieu de stockage augmente avec la chaleur transférée, et la chaleur n'est pas stockée et restituée à une température constante

L'énergie stockée dans une substance ou un milieu est proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique

$$E_{sensible} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [II.14]$$

II.4.1.2 Stockage latent :

Le stockage de chaleur latente consiste à chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, par exemple de solide à liquide, de liquide à gaz ou même de transition solide-solide, est appelé stockage de chaleur latente. Lorsqu'un matériau atteint sa température de transition de phase, il absorbe une certaine quantité de chaleur pour achever la transformation, appelée fusion par chaleur latente ou vaporisation, selon les cas. Lorsqu'un matériau liquide ou gazeux est refroidi, sa chaleur latente est restaurée et il retourne à la phase solide ou liquide. La quantité de chaleur stockée et restituée est proportionnelle à la masse de la substance et peut être calculée à l'aide de l'équation suivante [Laghzaoui, 2010].

$$Q = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} m C_{p,s} . dt + m\Delta h_{s-l} + \int_{T_{fusion}}^{T_{finale}} m C_{p,l} dt \quad [II.15]$$

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température énergie de la Figure si dessous

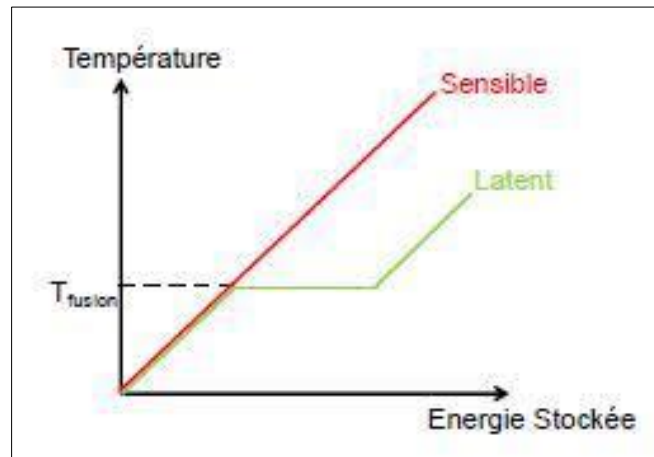
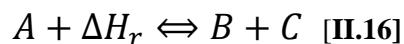


Figure (II.19) : Graphe température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [17]

II.4.1.3 Stockage thermochimique :

L'utilisation de réactions chimiques réversibles à énergie endothermique est la troisième approche pour stocker l'énergie thermique. La dissociation des réactifs chimiques en deux composants est fréquemment liée à la chaleur de réaction emmagasinée. Lors de la réaction de synthèse, tout ou partie de cette chaleur peut être récupérée.



ΔH_r : Chaleur de réaction en J/mol

B et C : Produits sous forme gaz, liquide ou solide

II.4.2. Comparaison des systèmes de stockage :

La charge, le stockage et la décharge sont les trois étapes de fonctionnement de tous les systèmes de stockage. Une grande variété de supports de stockage peut être reconnue en fonction de leurs qualités, de leur température de fonctionnement, du type de stockage souhaité et du domaine d'application prévu.

Pour choisir le type de stockage, vous devez d'abord considérer l'application pour laquelle il sera utilisé.

Tableau II.3 : Comparaison des différents types de matériaux stockage [17]

Stockage sensible	Température (°C)		Capacité Calorifique p (kJ/kg.K)	Masse Volumique ρ (kg/ m3)	Densité énergétique (kWh/m3)
	Froid	chaud			
Sable – roche	200	300	1.3	1700	61
Béton renforcé	200	300	0.85	2200	52
huile minérale	200	300	2.6	770	56
Eau	20	80	4.18	1000	70
Nitrates de sels fondus	250	350	1.5	1825	76
Stockage latent	Température de fusion Tfusion (°C)		Chaleur Latent ΔhS-L(kJ/kg)	Masse Volumique ρ (kg/ m3)	Densité Énergétique (kWh/m3)
Acide maléique	131 -140		235	1590	103
Xylitol	95		232	1500	97
Erythritol	118		340	1450	137
MgCl2.6H2O	117		165	1569	72
NaNO3	307		172	2260	108
Stockage thermochimique	Température de réaction (°C)		Enthalpie de Reaction ΔHr (kJ/mol)		Densité Énergétique (kWh/m3)
	Charge				
	Décharge				
MgH2 + ΔHr ↔ Mg + H2	380 à 1230 à 4 bar bar		-75		430
CaCO3 + ΔHr ↔ CaO + CO2	700	650	-178		110
MgH2 + ΔHr ↔ Mg + H2	450	25-400	-94.6(charge) 64.8(décharge)		300

Chapitre III

CONCEPTION ET RÉSOLUTION SÉCHOIR SOLAIRE INDIRECT

Chapitre III : CONCEPTION ET RESOLUTION SECHOIR SOLAIRE INDIRECT

III.1. Description du séchoir solaire :

Le séchoir solaire étudié (figure III.1) est un séchoir solaire indirect à convection force, dont les éléments constitutifs sont

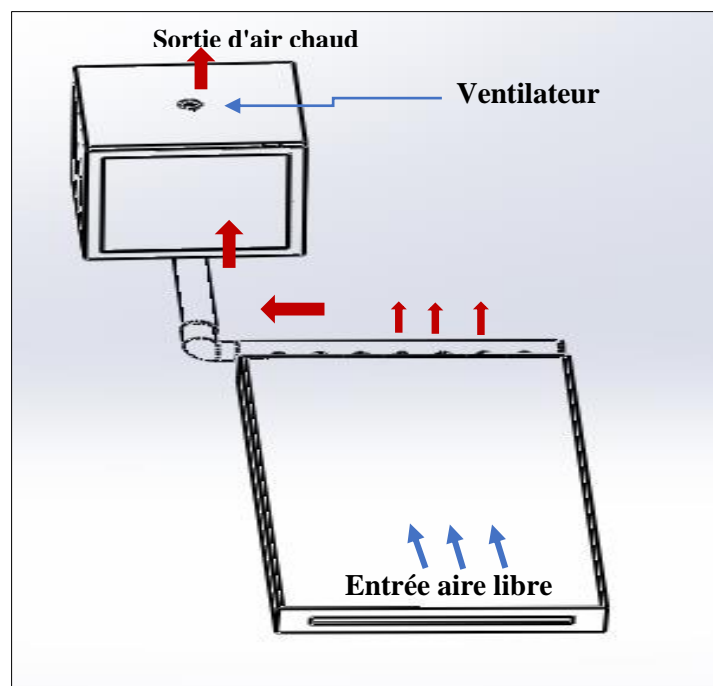


Figure III.1 : schéma fonctionnement séchoir solaire

III.1.1. Le capteur solaire :

Le capteur solaire est un capteur à air plat d'une longueur de 2,02 m, d'une largeur de 1,01 m et hauteur 0,18 m, le capteur est recouvert d'une plaque de verre d'une épaisseur de 0,005 m, Sous cette plaque et à une distance de 0,05 mètre une plaque de fer est placée enduit d'une couleur noire mate qui agit comme un absorbant de 1 mm d'épaisseur Une deuxième plaque de fer est placée en dessous, de 0,7 mm d'épaisseur, peinte en blanc, à une distance de 0,08 mètre. Le fond est isolé thermiquement avec du polystyrène pour réduire les pertes de chaleur. Le capteur est incliné d'un angle de 30° par rapport à un plan horizontal et est orienté vers le sud. Une entrée et une sortie d'air doivent être entre les deux plaques de fer de sorte que l'entrée soit avec une buse rectangulaire de dimensions (0,08 m ; 0,84 m) et la sortie soit munie de buses

circulaires d'un diamètre de 0,05 m reliées à un collecteur d'air chaud. tube isolé à la laine de verre

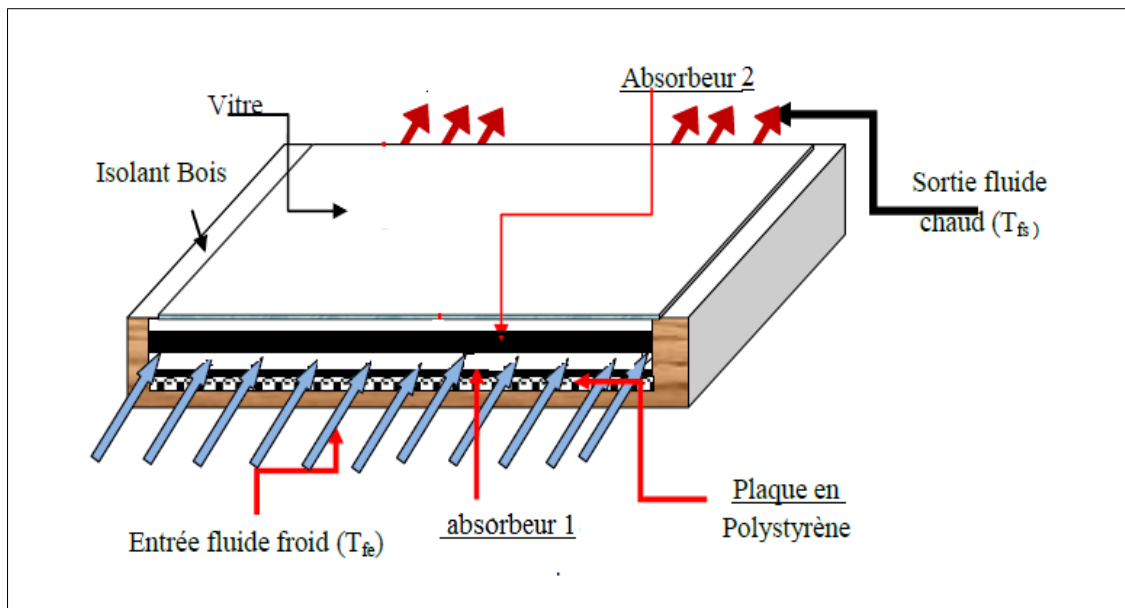


Figure III.2 : schéma fonctionnement capteur solaire

III.1.2. La chambre de séchage :

La chambre de séchage est une boîte galvanisée de forme cubique, Elle est de hauteur 1 m, de longueur 0.8m et de largeur 0,74 m ; les parois latérales, et les parties inférieure sont isolées thermiquement

La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés sur claie de forme rectangulaire et Un ventilateur aspirant est installé dans la chambre de séchage pour faire sortir l'air chaud sous le flux de convection forcée.

III.1.3. Fonctionnement du séchoir solaire :

L'air frais capté de l'extérieur circule dans le capteur solaire par convection naturelle chauffée avant d'atteindre l'entrée de la chambre de séchage, Puis il continue son chemin à travers les chambres de séchage. Enfin, l'air est aspiré par un ventilateur

III.2. Instruments de mesure :

III.2.1. Mesure du rayonnement solaire :

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en W/m^2 à l'aide d'un solarimètre (figure III.3) et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique



Figure (III.3) : Solarimètre à affichage numérique

III.2.2. Mesures des températures

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples de type K dans plusieurs endroits du capteur solaire :

- entrée et sortie du capteur solaire.
- entrée et sortie chambre de séchage.
- au niveau du produit à sécher.

Les résultats de mesure des thermocouples sont affichés sur un thermomètre figure (III.4).



Figure (III.4) : Thermomètre

III.2.3. Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air :

La vitesse de l'air asséchant est mesurée à l'entrée de la chambre de séchage. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre



Figure III.5 : anémomètre

III.2.4. Mesure de la perte de masse :

La mesure de la perte de masse du produit en fonction du temps est effectué sur l'ensemble produit – claie support, à l'aide d'une balance de précision à 0,1g ; pour la pesée systématique des produits séchés

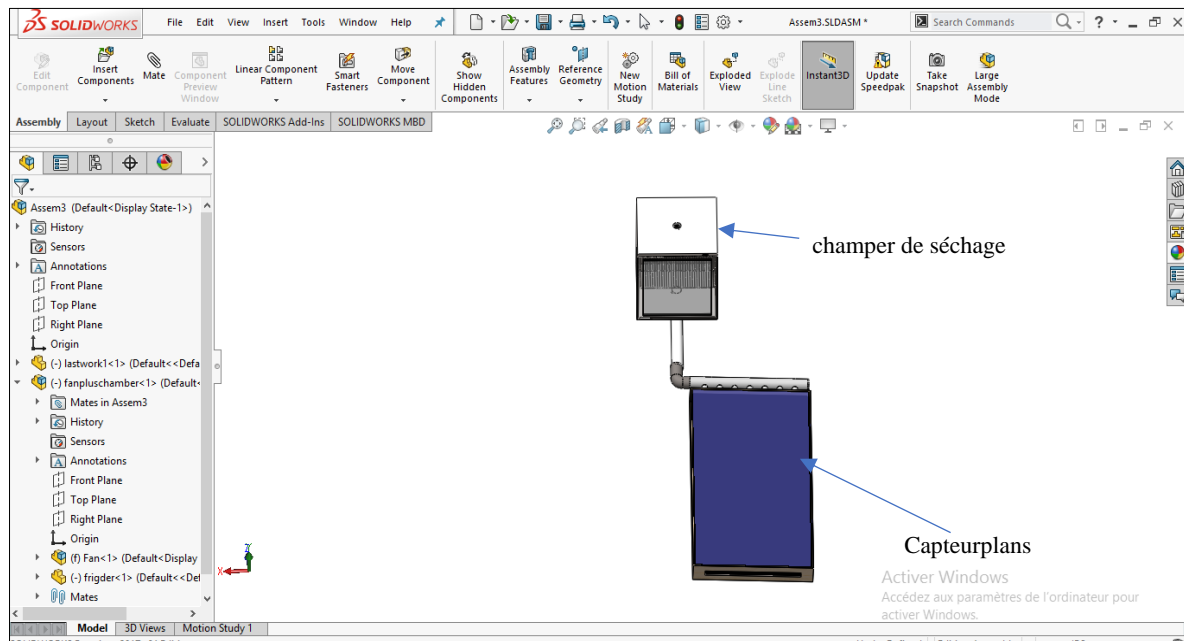


Figure III.6 : Balance numérique.

III.3. Prototype :

III.3.1. système de séchoir solaire indirect :

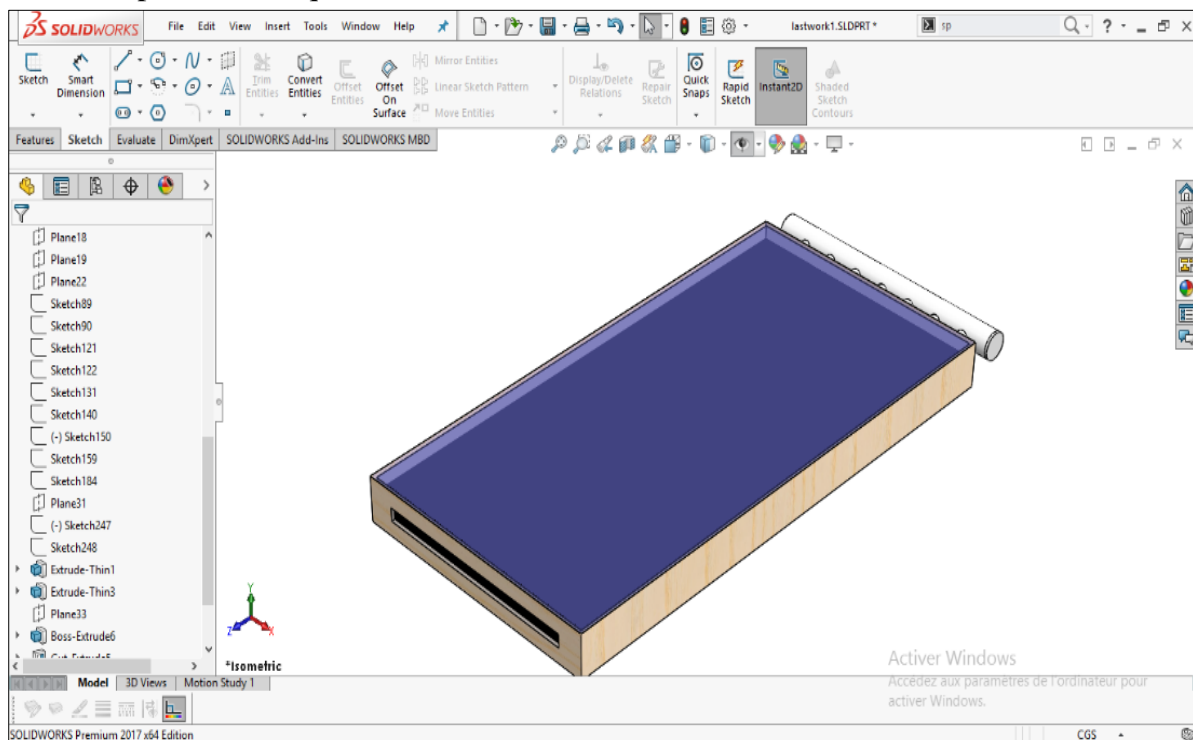
Les plans sont réalisés sous outil solidworks2017, logiciel de dessin 3D .Voici donc les plans de construction



FigureIII.7 : model 3D system séchoir solaire

III.3.2. Les plans de construction :

- Capteur thermique



FigureIII.8 : model 3D capteur solaire

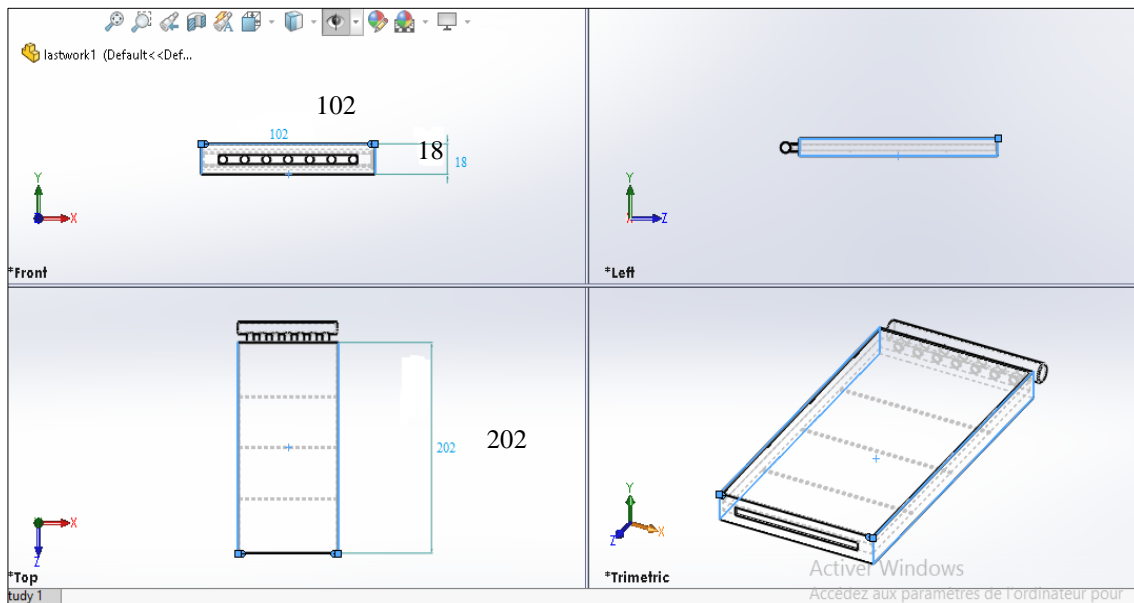


Figure III.9 : VUE capteur solaire

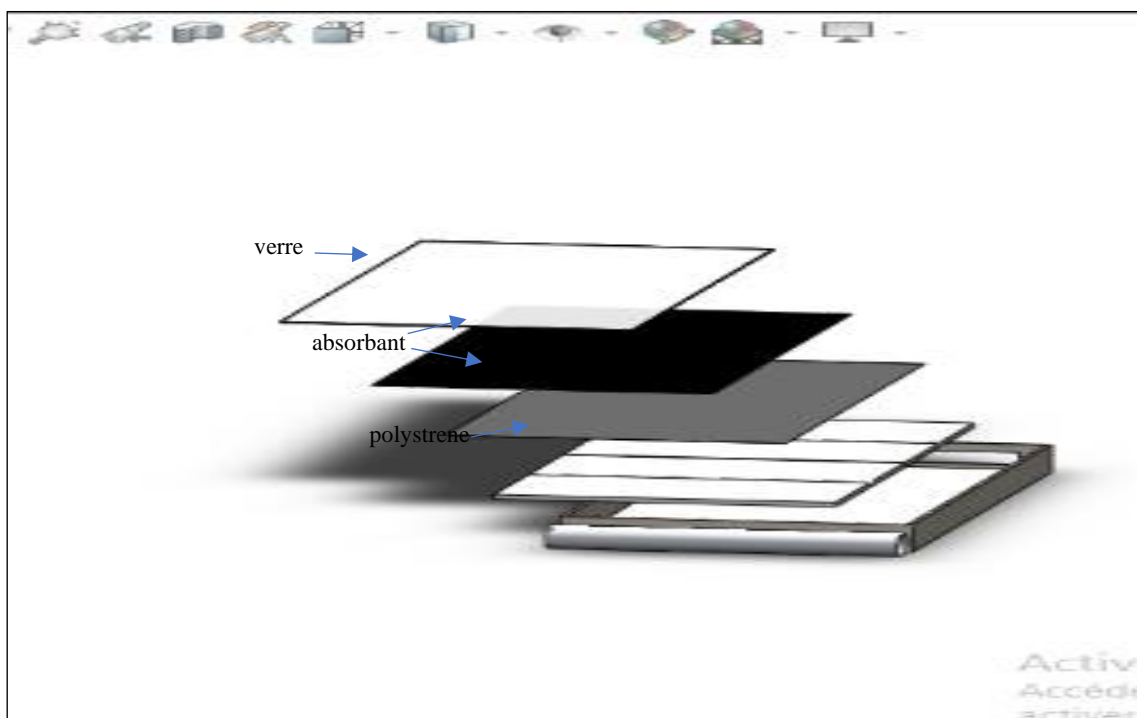


Figure III.10 : Composants du capteur solaire

- Champer de sechage

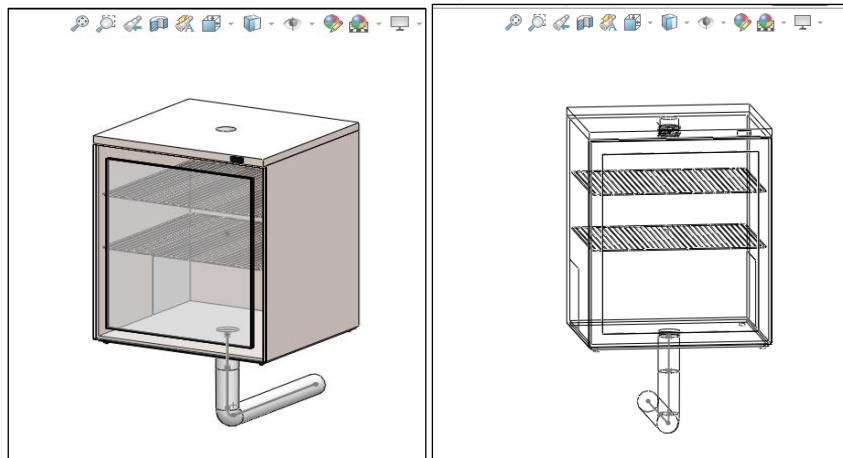


Figure III.11 : chambre de séchage

III.3.3. Matériaux utilisés pour la réalisation du séchoir :

❖ Bois Multiplies :

Il réduit le nombre d'assemblages et a un coefficient de conductivité thermique Bas, formant une bonne isolation globale, en U d'une épaisseur de 15mm, ce bois Excellente résistance à l'eau. Il se colle facilement et supporte la flexion. Une planche de Multiplies -bois (1.4m * 2.44m) a été utilisée.

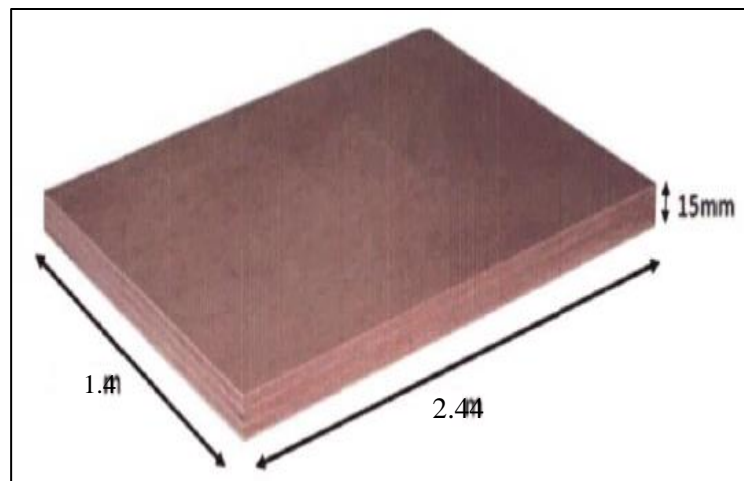


Figure III.12 : Schéma de la planche de bois

❖ Le Verre :

Il est rigide et parmi les voilages les plus résistants. La température qu'il peut supporter est élevée et acceptable pour le séchage. Il d'une épaisseur de 5 mm, dimensions (1m*2m)



Figure III.13 : Schéma de la plaque de Verre

❖ Le polystyrène :

Le polystyrène permet de diminuer les déperditions de chaleur au niveau de l'absorbeur. À ce titre c'est un matériau avantageux. On a utilisé plaque dimensions (1m*2m)

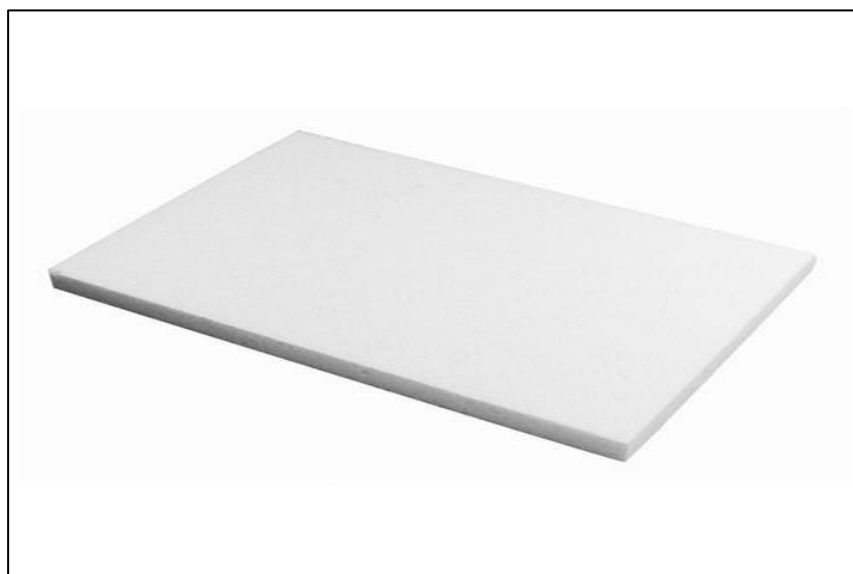


Figure III.14 : Schéma des plaques de polystyrène

❖ **plaques d'acier :**

La plaque est une fine plaque métallique qui représente la partie absorbante du capteur. Deux panneaux ont été utilisés, l'un peint en noir qui convertit autant que possible la lumière du soleil en chaleur.

Leurs dimensions (1m*2m)



Figure III.15 : La tôle

❖ **caractéristiques des matériaux :**

Les caractéristiques sont montrées dans le suivant tableau **Tableau III.1**

Le verre	
<i>Epaisseur</i>	$e = 5 \text{ mm}$
<i>Indice de réfraction</i>	$\delta = 0.9$
<i>Poids volumique</i>	$\rho = 2110 \text{ kg/m}^3$
<i>Température de résistance en chaleur</i>	$60^\circ < t < 90^\circ \text{C}$
<i>Conductivité thermique</i>	$\lambda = 1.5 \text{ w/mk}$
La tôle d'acier	
<i>Epaisseur</i>	$e_1 = 1 \text{ mm}, e_2 = 0.7 \text{ mm}$
<i>Conductivité thermique</i>	$k = 110.3 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Poids volumique</i>	$\rho = 77 \text{ kg/m}^3$
L'isolation	
❖ Polystyrène	
<i>Epaisseur</i>	$e = 4 \text{ mm}$
<i>Conductivité thermique</i>	$k = 0.038 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
❖ Contre-plaqué	
<i>Epaisseur</i>	$e = 15 \text{ mm}$
<i>Conductivité thermique</i>	$k = 0.23 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Poids volumique</i>	$\rho = 5 \text{ kg/m}^2$

❖ Système de ventilation :

Les ventilateurs qu'on va utiliser sont ceux qu'on trouve dans les micros ordinateurs, ils sont constitués de deux cotés comme le montre la figure (III.16) : le coté du ventilateur ou les pales sont bombées aspire l'air et l'autre côté où les pales sont incurvées souffle l'air.

C'est pour ça que le ventilateur doit être installé de manière que le coté bombé soit à l'intérieur de la chambre de séchage et que le coté incurvé soit à l'extérieur pour pouvoir extraire l'air chargé d'humidité. Ces ventilateurs sont alimentés en courant continu.

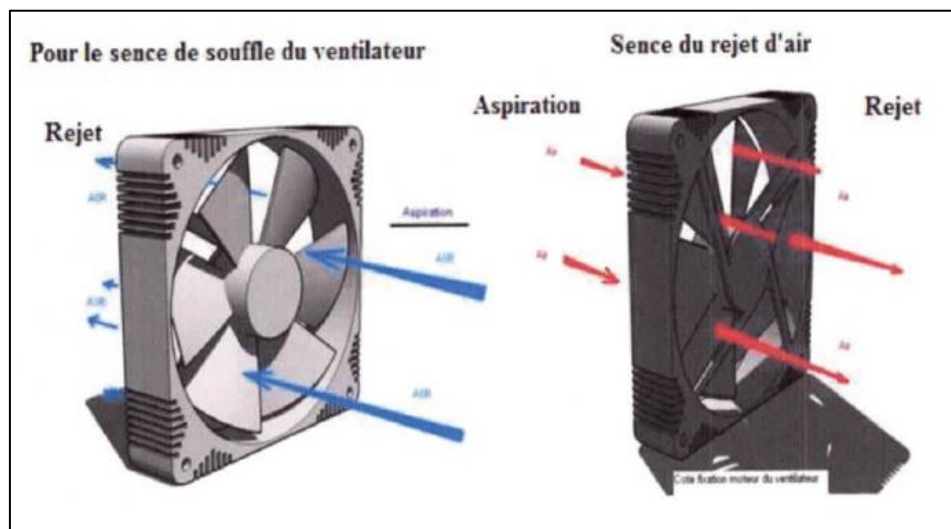


Figure III.16 : Sens de circulation de l'air dans un ventilateur

III.3.4. Etape de Réalisation :

III.3.4.1. la boîte de séchoir :

Découper la planche de bois pour obtenir une planche aux dimensions (2,01 m, 1,01 m) pour servir de base à une boîte de séchage, et le reste des pièces est utilisé pour fabriquer les



Figure III.17 : la boîte de séchoir

Parois de la boîte Des supports ont été ajoutés à la base de la boîte pour éviter la flexion de la plaque tous les 50 cm

III.3.4.2. Assemblage de pièces de capteurs solaires :

On commence par installer une feuille de polystyrène, puis on place une feuille de fer d'une épaisseur de 0,7 mm (l'absorbeur 1) peinte en blanc directement dessus, puis une deuxième feuille de fer d'une épaisseur de 0,1 mm (l'absorbeur 2) peinte en noir, là où il y a une distance de 8 cm entre eux (l'absorbeur 1, l'absorbeur 2)

Enfin, nous finissons d'installer un verre où la distance entre celui-ci et l'absorbeur (2) est de 5 cm, et Du silicone a été utilisé pour fixer les pièces

Une ouverture rectangulaire de dimensions (84,5 cm, 8 cm) a été créée à l'entrée du capteur solaire entre deux plaques absorbantes 1.2 pour être l'entrée d'air.

Une fente rectangulaire (84,5 cm, 8 cm) a été créée à l'entrée du capteur solaire entre deux plaques absorbantes 1.2 pour être l'entrée d'air.

A la sortie, des trous circulaires d'un diamètre de 5 mm ont été créés et reliés à des tubes puis ces tubes ont été reliés à un tube de 10 mm pour recueillir l'air chaud



Figure III.18 : Vue de la sortie d'air du séchoir



Figure III.19 : Vue de l'entrée d'air du séchoir



Figure III.20 : vue d'en face du séchoir

Chapitre III : CONCEPTION ET RESOLUTION SECHOIR SOLAIRE INDIRECT

Un tube collecteur thermique était relié à un autre tube de deux mètres de long et recouvert d'un isolant en laine de verre, et l'autre extrémité de celui-ci était reliée à une chambre de séchage

Un ventilateur est installé à l'intérieur de la chambre de séchage pour aspirer l'air chaud

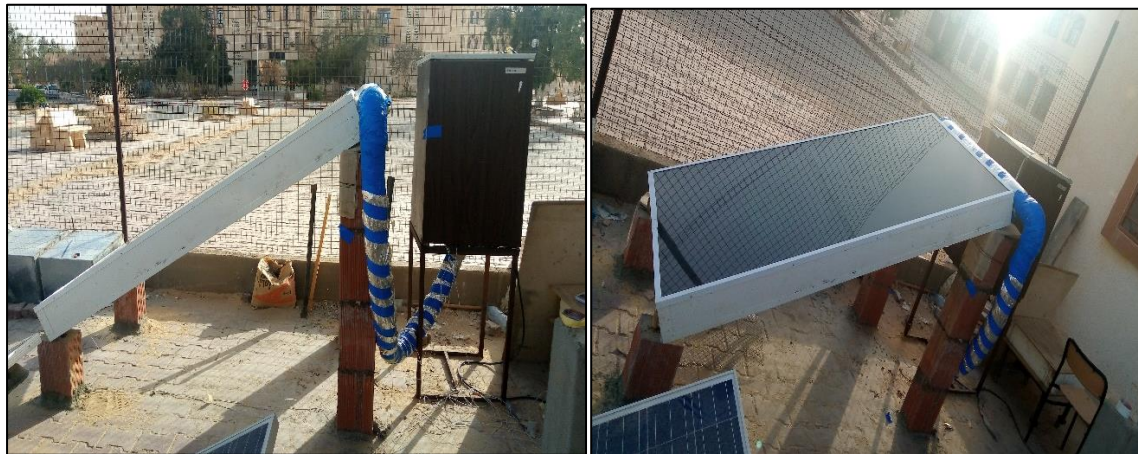


Figure III.21 : Vue latérale du séchoir

III.3.5. Coût de fabrication du séchoir :

Coût de fabrication du séchoir **tableau III.2**

Matériau	Le coût
Le bois et la main d'œuvre	11400 DA
La tôle et le verre	11000 DA
le polyester	500 DA
Ventilateurs	1200 DA
chambre de séchage	3000 DA
silikontransparo (3)	1200 DA
cornière aluminium	4000 DA
peinture noir (1kg) et blanc (2kg)	4000 DA
tuyau plastique	700 DA
isolation en laine de verre	600 DA
Ruban adhésif isolant	450 DA
Frais de transport de fournitures	2000 DA
Coût final	40050 DA

III.4. Expérimentation :

III.4.1. Emplacement du séchoir :

Comme son nom l'indique, les séchoirs solaires fonctionnent à l'énergie solaire. il doit donc être placé dans un endroit qui ne recevra aucun ombrage, d'arbres ou de construction, entre 7

Chapitre III : CONCEPTION ET RESOLUTION SECHOIR SOLAIRE INDIRECT

heures du matin et les heures. L'ombrage du séchoir aura pour effet de réduire l'accumulation de chaleur dans le séchoir.

Le séchoir solaire doit être orienté vers le sud ; dans un emplacement où on évite le vent ; le terrain doit être plat.

III.4.2. Séchage de la pomme de terre :

NOM DU PRODUIT	POMME DE TERRE
Ingrédients	Eau, sel, métabisulfite
Teneur en eau initiale	75 %
Teneur en eau finale recommandée	13 %
Température maximale	70°C
Rapport de séchage	1/7
Critère de fin de séchage	Produit croustillant et cassant
CONSERVATION	4 à 6 mois

Tableau III.3 : paramètres de séchage pomme de terre

III.4.2.1. Préparation du produit :

Les tubercules de pomme de terre ont été pelés et lavés à l'eau du robinet, puis coupés en rondelles d'une épaisseur de 3mm, elles ont été réparties sur la claie de séchage



Figure (III.22) : Préparation du produit

III.4.2.2. Mode opératoire :

Pour suivre la quantité d'eau évaporée d'une pomme de terre sur une période, nous avons mesuré sa masse à l'aide d'une balance d'une masse élémentaire de 200 g, tous les quarts d'heure (8:00h à 9:00h), puis une demi-heure (9:00h à 10:00h), puis une heure (10:00h à 11:00h), La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale. Des mesures de température, de rayonnement et de vitesse de l'air sont prises en même temps pour mesurer la masse de

III.4.2.3. Produit séché :

Après un temps nécessaire, nous avons obtenu de pomme de terre séchée



Figure(III.23) : pomme de terre après séchage

III.5. Résultats et Discussion :

Le processus de séchage et l'efficacité du séchoir sont liés aux facteurs climatiques. Ce processus affecte les paramètres de l'air et du produit.

Les résultats obtenus sont extraits expérimentalement puis discutés et interprétés. Ainsi, dans ce chapitre, nous présenterons un ensemble de figures liées aux courbes qui ont été obtenues expérimentalement lors du processus de séchage et étaient des variables entrées dans le programme ' Origin ', puis nous expliquerons ces courbes qui décrivent et expliquent les principaux facteurs de séchage

III.5.1. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage :

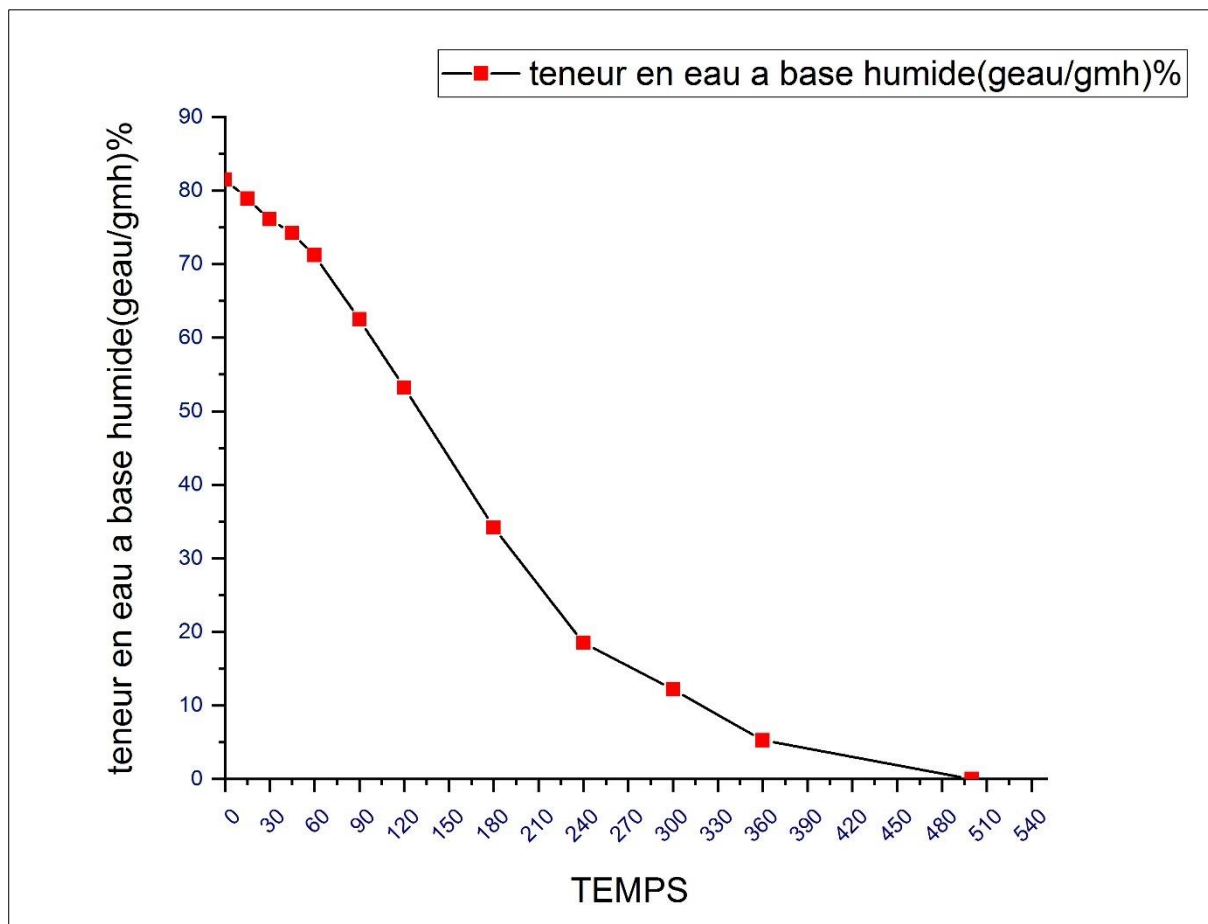


Figure IV.1 : Variation de la teneur (à base humide) en eau en fonction du temps de séchage

La figure IV.1 montre l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage. La teneur en eau finale a été obtenue après séchage pendant 10 heures de séchage, jusqu'à ce qu'il ait fallu 5 heures pour obtenir la teneur en eau finale $X_f = 13$,

$[X_h = (m_h - m_s / m_h) = (41 - 36) / 41 = 12.19]$, car pendant 240 minutes la teneur en eau sèche dans le matériau a diminué de (82% à 18,18%).) dans les 240 minutes en raison de températures élevées et d'une humidité élevée, car l'humidité à la surface du produit se déplace rapidement vers l'extérieur

Après 240 minutes, nous avons montré que le pourcentage de teneur en eau diminue légèrement avec le temps en raison du fait que les niveaux d'humidité deviennent minimales à l'intérieur du matériau

III.5.2. Variation de la teneur (à base sèche) en eau en fonction du temps de séchage :

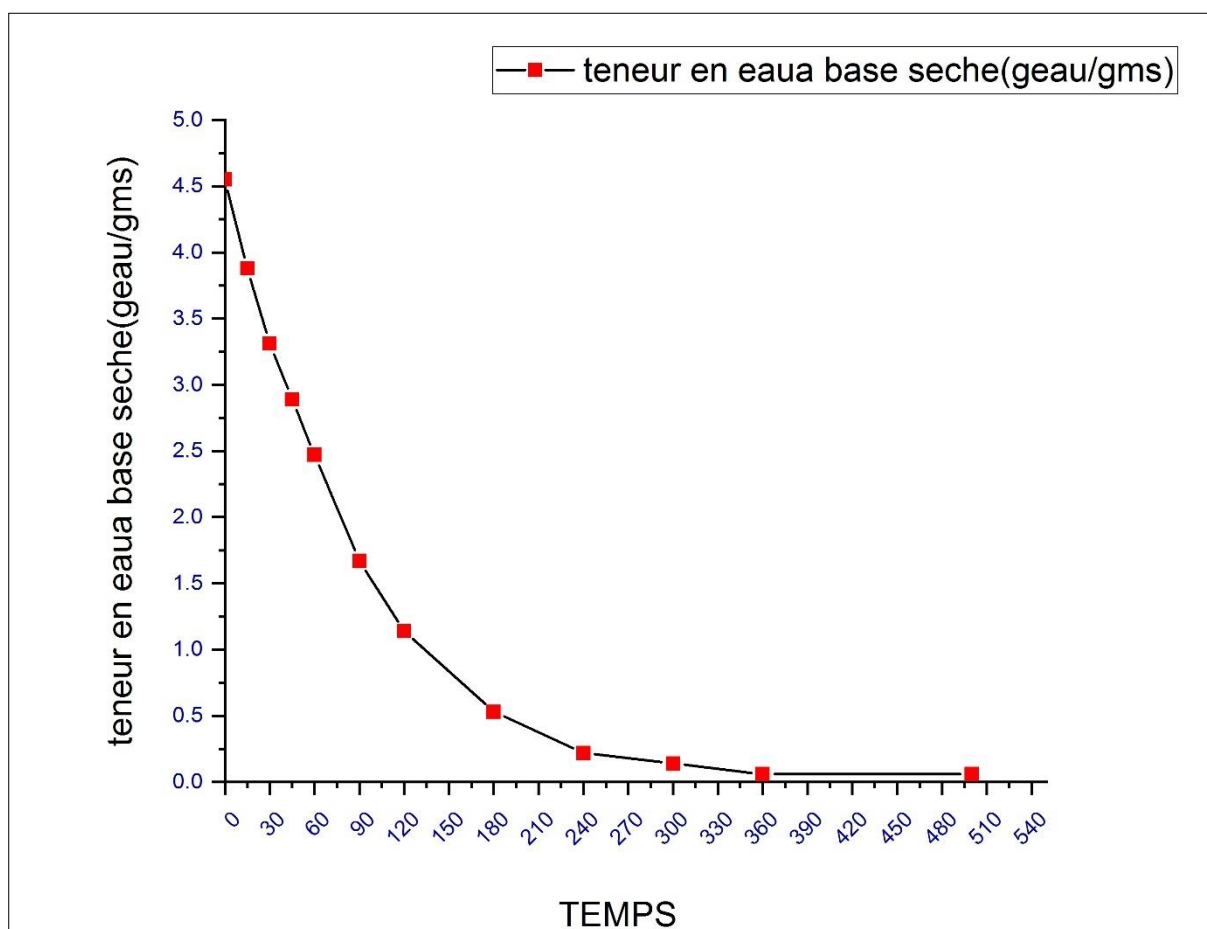


Figure IV .2 : Variation de la teneur (à base sèche) en eau en fonction du temps de séchage

La figure IV.2 illustre l'évolution de la teneur en eau sur sec en fonction du temps de séchage Où une forte baisse de la teneur en eau a été observée en 240 minutes, atteignant 0,22geau/gms ($X_9 = m_h - m_s / m_s = (44 - 36) / 36 = 0.22$)

Puis elle continue à décroître légèrement jusqu'à se fermer à zéro à 480 minutes, ce qui signifie qu'une masse d'eau s'est presque complètement évaporée

III.5.3. Variation de Radiation solaire en fonction de temps :

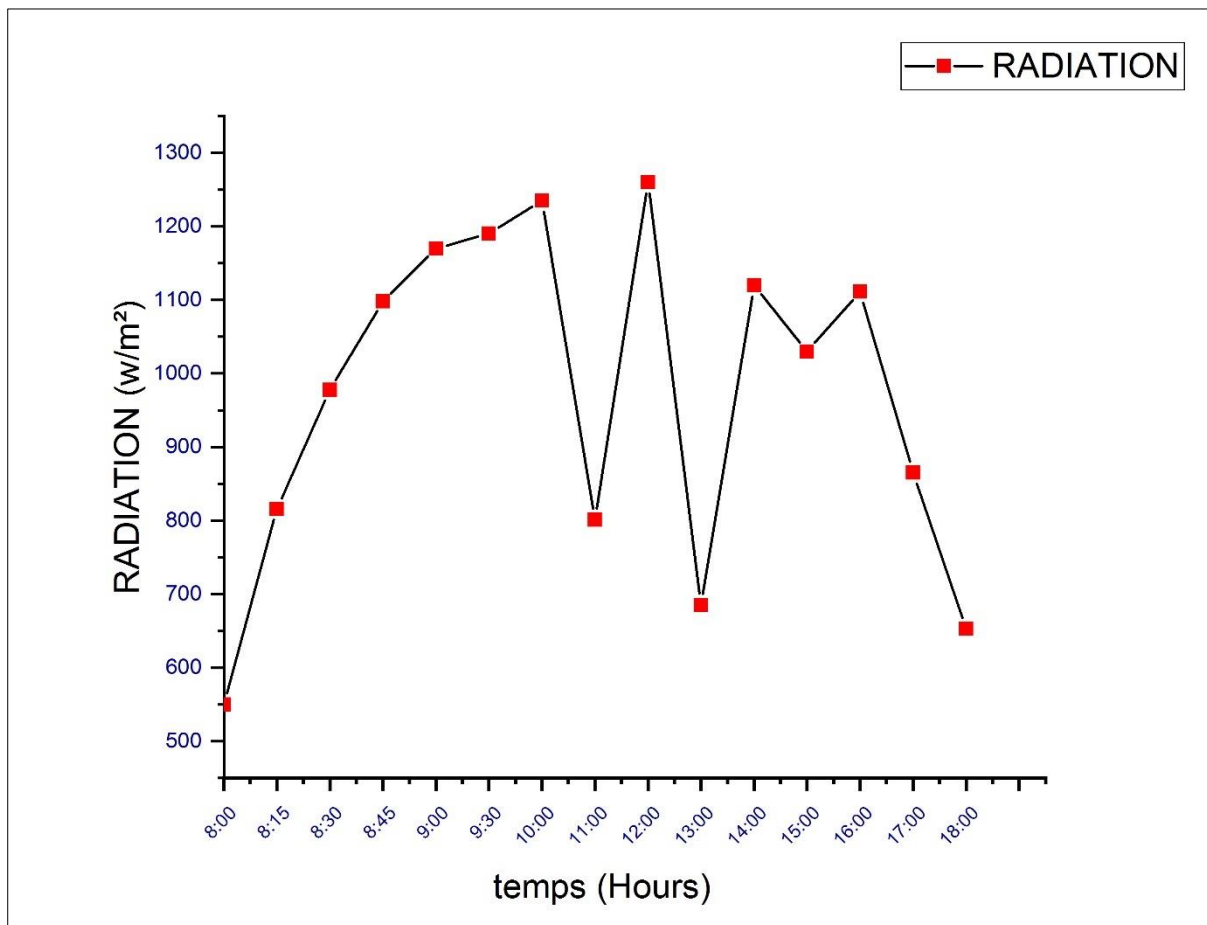


Figure IV.3 : variation de Radiation solaire en fonction de temps

La figure (III.5.3) représente la variation de l'intensité du rayonnement solaire pour la journée 25/05/2022

Nous avons remarqué que l'intensité du rayonnement solaire augmente progressivement pour atteindre à 12:00 h jusqu'à une valeur maximale de 1260 W/m^2 ,

On note une diminution des valeurs de rayonnement à partir de 12h00 pour atteindre une valeur minimale de 653 W/m^2 à 16h00.

Mais il y a quelques fluctuations dans les valeurs de rayonnement dues aux nuages entre (11h00, 13h00, 15h00)

III.5.4. Variation de température ambiante en fonction du temps :

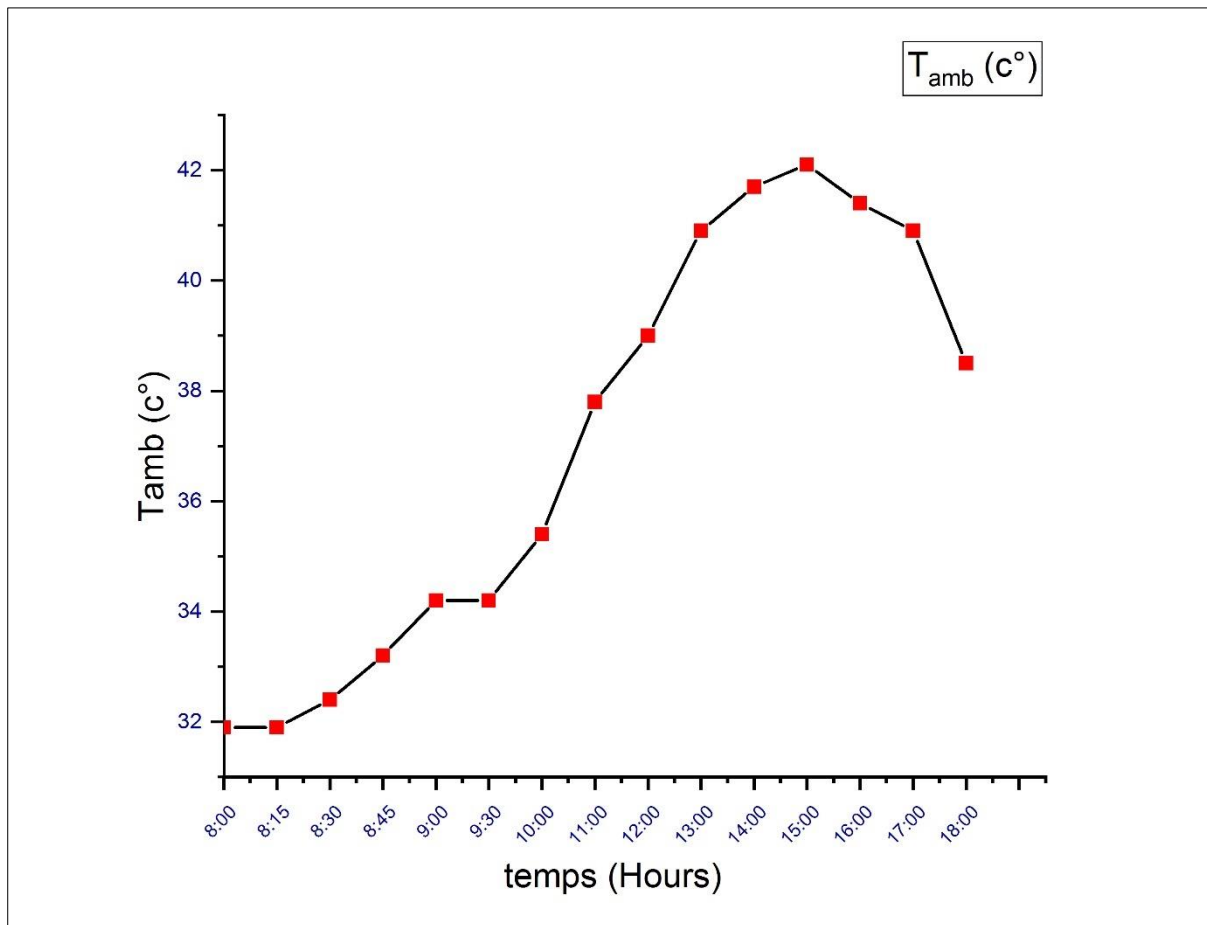


Figure III.5.4 : variation de température ambiante en fonction du temps

La figure III.5.4 montre les changements de température ambiante en fonction du temps dans la journée **25/05/2022 a el oued**

Où l'on a remarqué une augmentation progressive de la température, atteignant son maximum entre deux heures et trois heures de l'après-midi, pour atteindre 42,1 degrés à trois heures du soir, En suite, il tombe à 38,5 degrés à 18 heures.

III.5.5. Variation de vitesse du vent en fonction du temps :

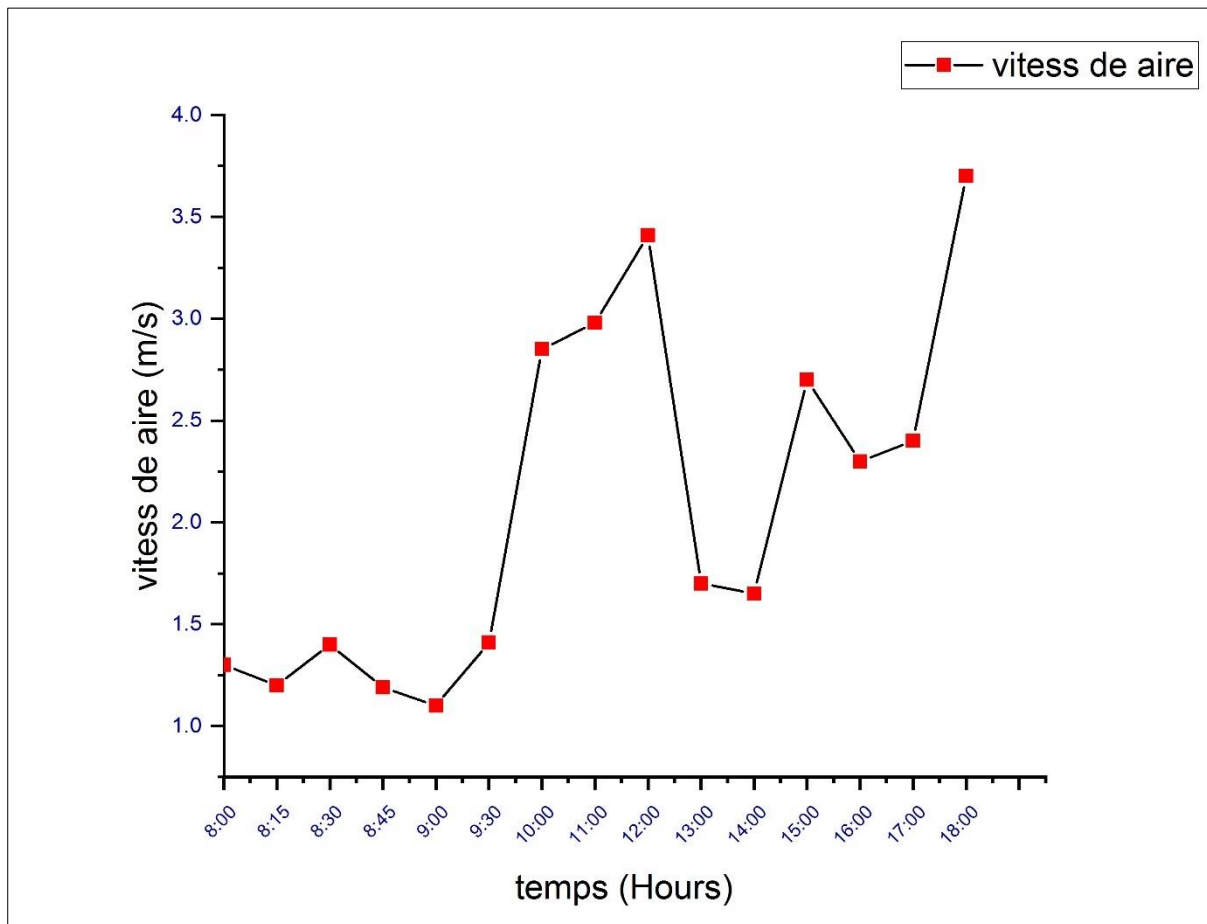


Figure III.5.5 : variation de vitesse du vent en fonction du temps

.La figure III.5.5 montre l'évolution de la vitesse du vent en fonction du temps au cours de la journée 25/05/2022

Où une fluctuation des valeurs de vitesse a été observée en raison des nuages, et la vitesse de l'air a atteint 3,7 mètres par seconde comme valeur maximale à 18h00.

Il est à noter que la vitesse du vent était faible presque toute la journée

III.5.6. Variation de température dans le capteur solaire :

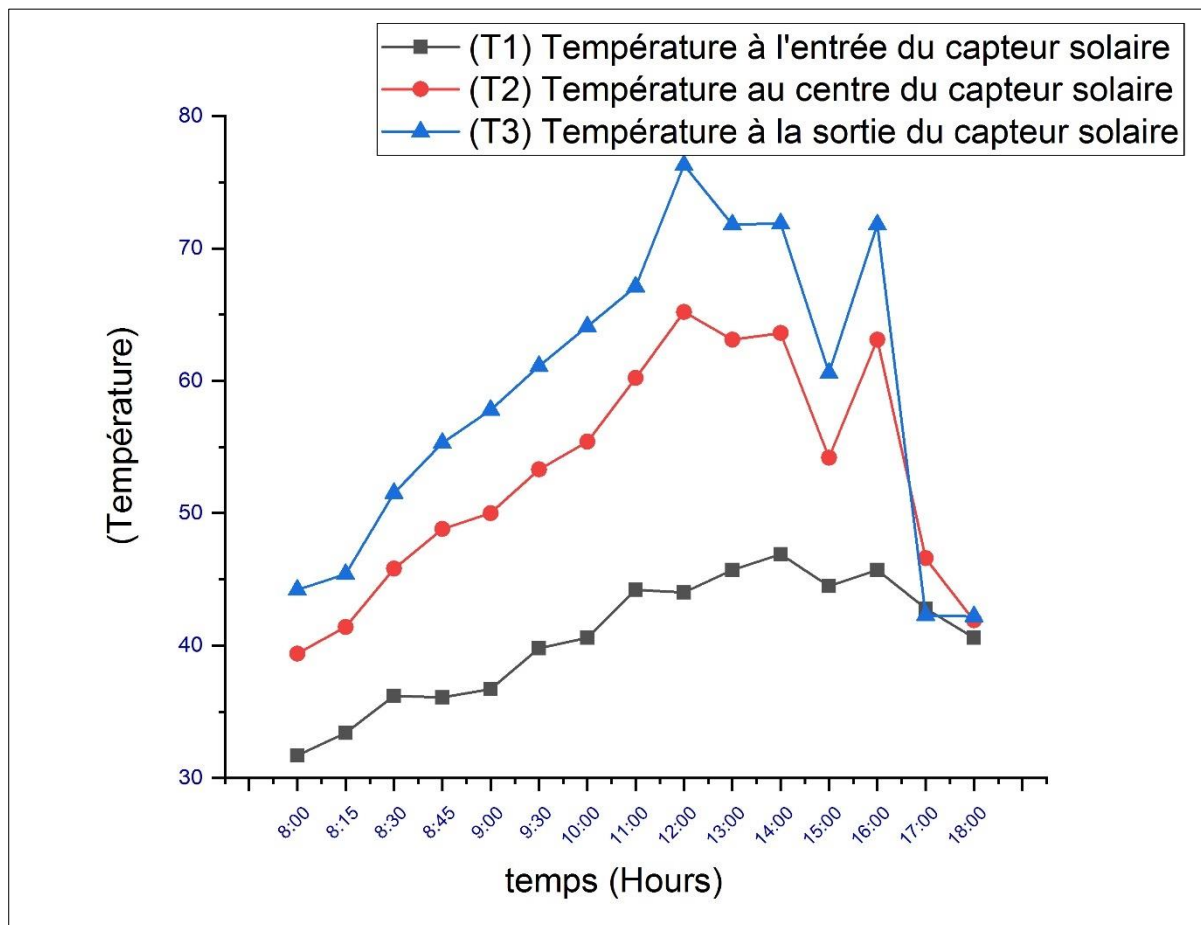


Figure III.5.6 : variation de température dans le capteur solaire

La figure III.5.6 montre la distribution de température dans le complexe de séchage solaire m pour la journée 25/05/2022 où la température de l'air de séchage est mesurée par trois emplacements, entrée du capteur solaire, au milieu du capteur ; et sortie du complexe. Lorsque la température d'entrée est comprise entre (31,7°C, 46,9°C) et au milieu du capteur solaire entre (65,2°C, 39,4°C) et à la sortie les valeurs de la sortie diffèrent entre (44,2°C, 76,3 °C), avec une augmentation de la température de sortie par rapport au milieu et à l'entrée, et la température de sortie du capteur solaire à 12h00 atteignant 76,3 °C comme valeur la plus élevée pour la température de l'air

Cette figure montre que la température d'entrée et de sortie du capteur varie Respectivement, il y a une grande différence entre eux

Ceci est dû à l'effet de l'absorbeur sur l'air circulant dans le capteur solaire

III.5.7 variation de température dans chambre de séchage :

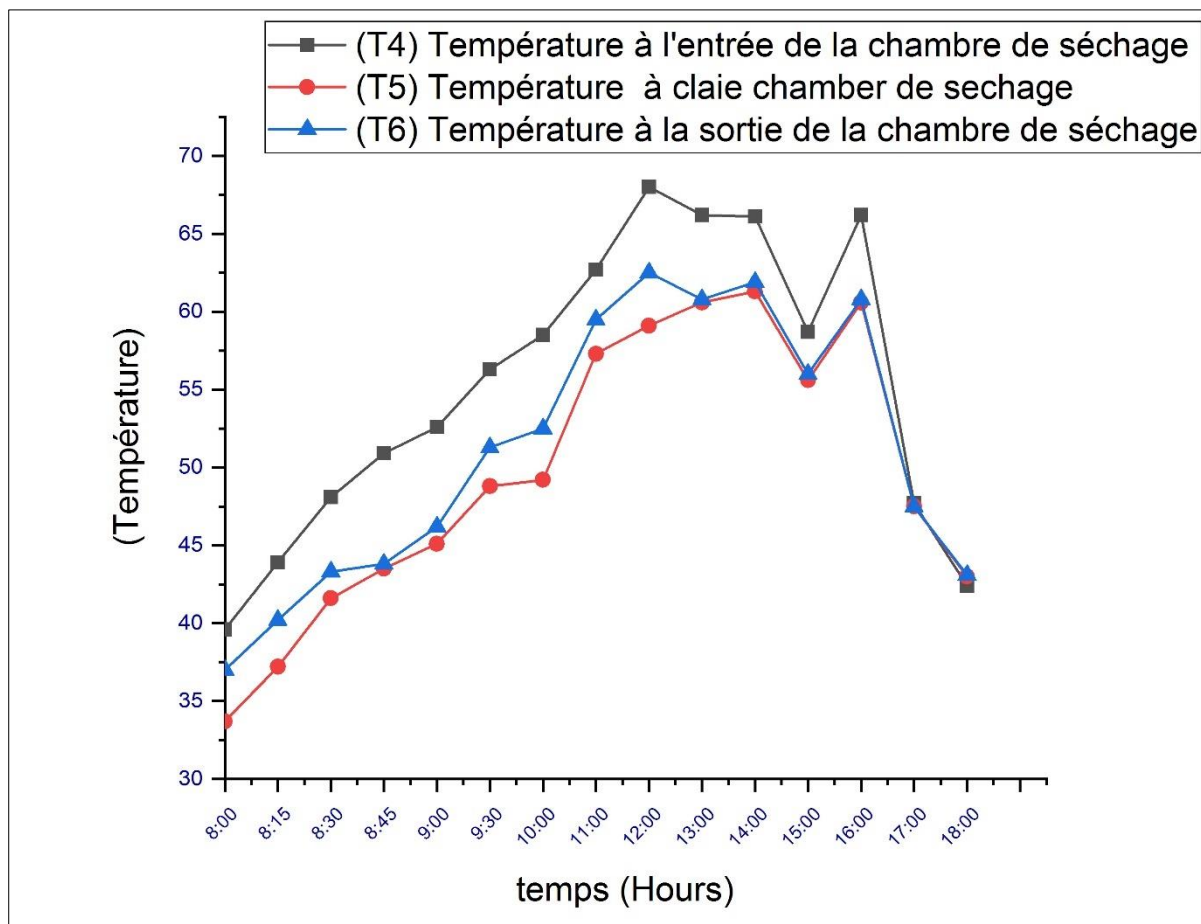


Figure III.5.7 : variation de température dans chambre de séchage

La figure III.5.7 suivante montre les changements de température aux 3 endroits de l'entrée de la chambre de séchage, sur l'étagère et à la sortie de la chambre

Là où la valeur de température maximale a été enregistrée à 68 degrés à 12:00 h et que les valeurs de température sur l'étagère diminuent et que la différence atteint un maximum de 61,3 degrés à 14:00 h, aux valeurs de sortie, elle revient avec une valeur légèrement supérieure et la valeur la plus élevée est 61,9 à 14h00

Il montre la température élevée de T4 car l'air chaud provient directement du capteur solaire jusqu'à ce qu'une perte de chaleur se produise lors du mouvement de l'air chaud de la sortie du capteur à l'entrée de la pièce et une diminution Température de l'air au centre de la pièce due à la consommation de chaleur Par l'évaporation de l'eau du produit et la montée en température en sortie grâce à un ventilateur qui absorbe l'air chaud et le concentre au milieu et aux sorties

III.5.8. Variation Vitesse de séchage en fonction du teneur en eau :

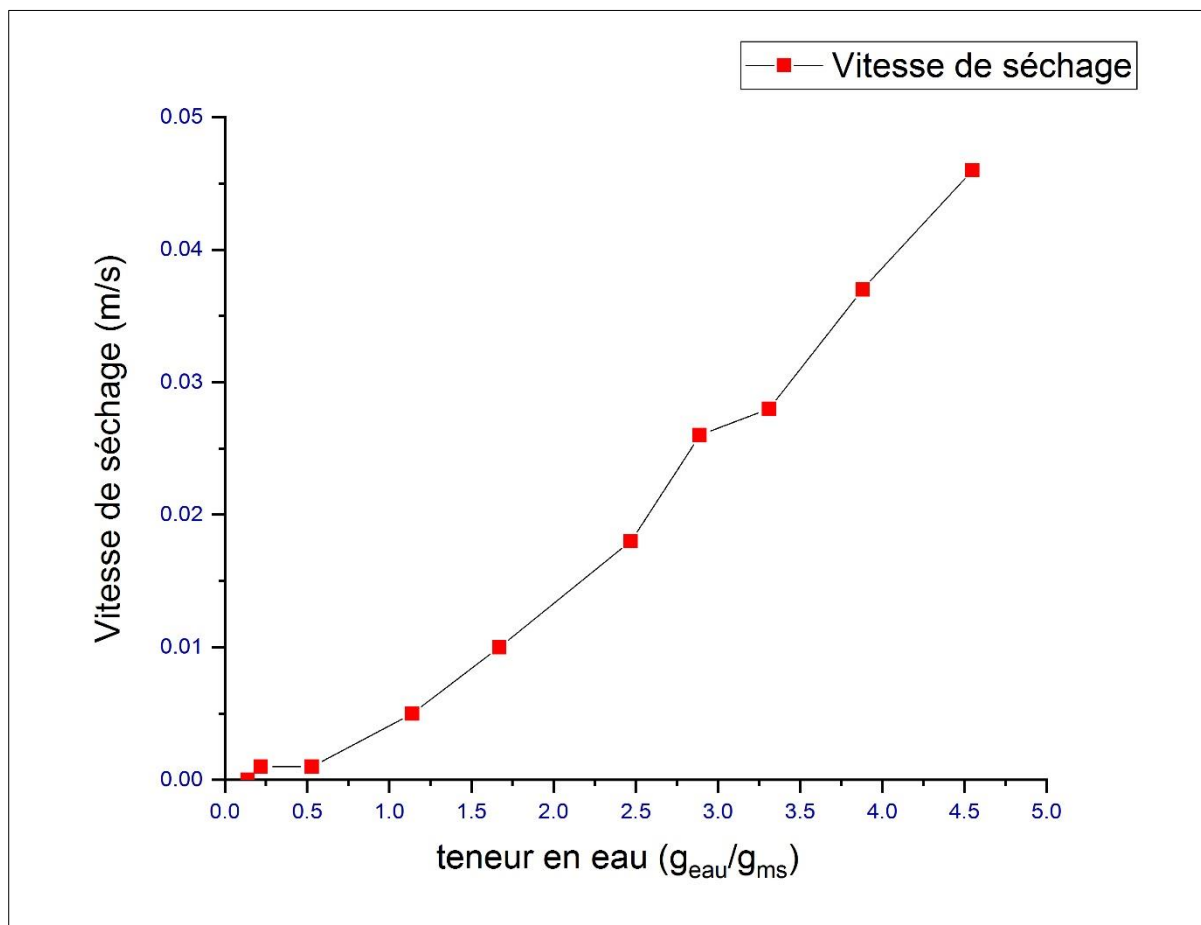


Figure III.5.8 : variation Vitesse de séchage en fonction du teneur en eau

La figure III.5.8 représente les changements de vitesse de séchage en termes de teneur en eau. Nous avons constaté qu'il y a un ajustement entre eux.

Lorsqu'une diminution de la teneur en eau s'accompagne d'une diminution de la vitesse de séchage,

En effet, la vitesse de séchage est le rapport de la différence de teneur en eau sur une certaine période $\left[-\left(\frac{dx}{dt}\right) = -\left(\frac{x_1-x_0}{t_1-t_0}\right)\right]$, et puisque la différence de temps est fixe. À mesure que la teneur en eau du matériau diminue, une diminution de la vitesse de séchage suivra.

❖ Dans ce chapitre, nous analysons et comparons un ensemble de variables qui reflètent les principaux facteurs influençant le processus de séchage solaire thermique, qui évoluent dans le temps. L'objectif principal de ce chapitre était d'étudier et d'expliquer les différents changements qui se produisent du début à la fin du processus de séchage. Il a été observé que ces facteurs s'influencent mutuellement, puisque le rayonnement solaire affecte directement la température moyenne du capteur solaire. La température de l'air chaud entrant dans la salle de séchage était la principale raison d'influencer la température de la salle de séchage, le séchage des produits et l'humidité relative.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le séchage est l'un des processus essentiels pour prolonger la durée de conservation des produits dans l'industrie alimentaire, et c'est un processus qui consomme beaucoup d'énergie. Ce travail est une contribution à l'étude du séchage solaire du produit de pomme de terre en utilisant le séchage solaire indirect par convection forcée d'air chaud à deux absorbeurs qui a été conçu à l'Université d'El-Oued.

Dans ce travail, nous intéressons à suivre l'étude de l'effet de certains facteurs sur le processus de séchage tels que la température, l'humidité et le temps de séchage, et à suivre le processus de séchage des pommes de terre pendant la journée pour vérifier l'efficacité de ce séchoir.

Solidworks a été utilisé pour rendre 3D de ce séchoir et le logiciel *OriginLab* pour tracer les courbes de changement des facteurs affectant le processus de séchage.

Malgré quelques fluctuations climatiques, les résultats que le séchoir nous a donnés étaient bons, il a fallu (5h00) pour atteindre la teneur en eau finale de $x_f = 13\%$, ce qui est une valeur acceptable pour le processus de stockage du produit, le temps nécessaire au séchage et connaître l'ampleur de l'effet du stockage thermique sur l'air et l'efficacité du complexe

L'effet de l'intensité du rayonnement solaire est le facteur principal pour accomplir le processus de séchage afin de chauffer la plaque absorbante, et cela affecte la température de l'air chaud sortant du capteur, ainsi que la surface d'échange. Si l'entrée de la chambre de séchage est éloignée de la sortie du collecteur, il y aura une perte d'énergie et la température diminuera à l'entrée de la chambre de séchage. Quant à la température du produit, elle est directement affectée par la température à l'entrée et à l'intérieur de la chambre de séchage, qui sert à éliminer l'humidité par évaporation, ce qui explique la "température élevée avec une faible humidité relative" qui l'accompagne. De plus, l'humidité relative du produit à sécher est élevée au début des expériences en raison de la forte teneur en humidité des échantillons de produit séché, puis diminue progressivement au fil du temps jusqu'à la fin de l'essai.

REFERENCE :

- [1]. J, BERNARD. " Energie solaire calculs et optimisation", Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2]. BOUGHALI, SLIMANE. "Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agroalimentaires dans les zones Arides et désertiques. 2010". PhD Thesism , Université de Batna 2
- [3]. MERDAOUI ZIAD,CARACTERISATION",radiométrique des sites de bouzaréah et de ghardia",mémoire de magister,universitede saaddahleb de blida.
- [4].]BOUDEM ABDELMALEK, "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque" Université Mentouri, 2008
- [5]. J,A.DUFFIE ET W.A.BECKMAN,"solar energie thermal process",ed.john Wiley,1991
- [6]. M.LQBAL,"introduction to solar radiation"academic Press 1983
- [7]. AHMED RIDHA EL OUEDERNI,"évaluation du gisement solaire au golfe de tunis – application a la faisabilite d’un mini concentrateur solaire parabolique",these de doctorat,l’ecole nationale d’ingenieurs de monastir,2016
- [8]. Serres Solaire de production,P.Y.C /EDISUD 1985.
- [9]. D, K, EDWARDS. "Capteurs solaires", Edition SCM, paris. (1979)
- [10].BELAID, WAHIBA. "Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifsdes convertissues de l'énergie solaire". 2014. PhD Thesis.
- [11].DJELLOUL BENATIALLAH, "Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie", Diplôme de Doctorat en science , universite africane ahmed draia adrar (2019)
- [12].PIERRE BESSEMOULIN ET JEAN OLIVIERI, "Le rayonnement solaire et sa composante Ultraviolette", Meteo-France, Service central d'exploitation de la meteorologie Toulouse, La Météorologie 8eme série - n°31 - septembre 2000
- [13].MEFTI, "Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement de données solaires au sol et d'images Météosat", These de Doctorat d'état, USTHB, Alger, 2007.
- [14].CAPDEROU M., (1985), « Atlas Solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger »
- [15].Portail Ministère de l'Énergie, www.energy.gov.dz , Consulté en Février 2018.
- [16].A, MEFTI; M, Y, BOUROUBI; H, MIMOUNI. «*Evaluation du potentiel énergétique solaire*», *Bulletin des Energies Renouvelables*, N°2, p 12, décembre 2002.
- [17]. ADELE SOUPART-CARON. "Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase".Génie des procédés. Université Grenoble alpes, 3 février 2016.
- [18].Mr MEFTI ABDERRACHID, "Contribution à la détermination du gisement solaire par traitementde données solaires au sol et d'images Météosat", . PhD Thesis., UNIVESITE DES HOUARI BOUMEDIENE, 2007
- [19].<https://fr.weatherspark.com/>, Climat à Oued Souf (2021)
- [20].ARRIANUS, FLAVIUS "known as Arrian, 96–180 A.D., Greek historian", History of Alexander and Indica, vol. II, "book VIII, Indica", in the Loeb Classical Library, Harvard University Press, Cambridge Mass, MCMLXVI, 1966.
- [21].W. MAAKE, H. J. ECHERT, ET J. L. Cauchepin, "Manuel technique du froid", Tome PYC Edition, Alamand 2001.
- [22].SOUHEYLA KHALDI, "Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie", de l'Université de BOURGOGNE FRANCHE-COMTE et l'Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, diplôme de Doctorat, 06 / 2018,

- [23].RAMDANI DJOHRA Et HADDOUCHE Lydia, "Séchage des Produits Alimentaires : notions de bases, Cinétiques de Séchage et Modélisation", Université A. MIRA – Bejaia, diplôme de **MASTER,2020**
- [24].Techniques de l'ingénieur – "génie des procédés Séchage Théorie et calculs". Par André charreau et Roland cavaille, j 2480-2 ; 2480-22.
- [25].S. WHITAKER Heat and mass transfer in granular porous media, "Advances in drying I, Hemisphere publication", 1980,pp. 23-16 , Cited par L. Bennamoun.
- [26].M. DAGUENET, " Les séchoirs solaires : Théorie et pratique." , UNISCO, 1985
- [27].CHANDRA, S. A. (2015). "Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review." Critical Reviews in Food Science and Nutrition (Vol. 55).
- [28].OETJEN, G.-W. A. (2004). "Freeze-drying."John Wiley& Sons
- [29].BENSEDDIK ABDELLOUAHAB, "Modelasation et simulation de sechage de la figure par des sechoire solaires indirects", Mémoire de magister, université aboubekrbelkaid Tlemcen,2011
- [30].Guessoum, M. HOUTI."Etude et amélioration du fonctionnement d'un séchoir solaire directà convection naturelle". Thème Master Académique. Université Ouargla.2016
- [31].BOUGHALI, Slimane. "Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agroalimentaires dans les zones Arides et désertiques". 2010. PhD Thesis. Université de Batna 2.
- [32].B. TOUATI. "Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la mentheverte (mentha viridis)".2004
- [33].M.SAID MAKHLOUF,"Etude et Realisation D'un sechoir pour margine", DIPLÔME DE Master, Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou,2018
- [34].Souheyla KHALDI, "Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie", de l'Université de BOURGOGNE FRANCHE-COMTE et l'Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, diplôme de Doctorat, 06 / 2018
- [35].J.P NADEAU , PUIGGALI J.R., "Séchage: des processus physiques aux procédés industriels."Tec & Doc- Lavoisier, 1995.
- [36].MAHDADI ROUKIA, "ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE DEUX PROTOTYPES DE SECHAGE SOLAIRE", diplôme de MAGISTER, Université KasdiMerbah Ouargla, 02/2009
- [37].SAF ANIS & REDDAM SOUAD,"Technologies de séchage. Etude de cas: séchage de deux matrices végétales par étuve ", Université A. MIRA – Bejaia , 2018
- [38].MME AUMPORN ORAWAN, "Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase", DIPLÔME DE grade de docteur, UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, décembre 2017
- [39].MR. TAREK DJETTOU, "Conception et réalisation d'un séchoir solaire". MÉMOIRE DE MASTER, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou,2019
- [40]. P. DUDEZ. "Le séchage solaire à petit échelle des fruits et légumes: expériences etProcédé", édition du Greth. France .1999.
- [41]. O.V. EKECHUKWE, B, Norton, "review of solar-energy drying systems II: an overviewof solar drying technology", energy conversion, mangement.40, 1999,615-655
- [42]. ANDRE CHARREAU ET ROLAND CAVAILLE "Techniques de l'ingénieur – génie des procédésSéchage Appareillage et choix d'un procédé", j 2484-2 ; 2484-16.
- [43].A. BOULEMTAFES " Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect ",Energies Renouvelables (1999) : 97-100
- [44]. R. SLAMA.et al : "Study of orange peels dryings kinetics and development of a solar dryer by forced convection", Solar Energy 85 (2011) 570–578
- [45]. MANAA SAADEDDINE, "Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation

des performances des insolateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques", diplôme de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017

- [46]. **S. YUCEF-ALI**, "Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing", Renewable Energy, Volume 30, Issue 2, February 2005, Pages 271-280
- [47]. **F. CHABANE, N. MOUMMI, AND S. BENRAMACHE.**, "Experimental Study on Heat Transfer For a Solar Air Heater and Contribution the Fins to Improve the Thermal Efficiency", International journal of Advanced Renewable Energy Research, Vol. 1, Issue 9, 2012, pp. 487-494;
- [48]. **DJEMMAA AMINA & BOUDOUAIA AHLEM**, Etude de comparaison entre le séchoir solaire direct et indirect, diplôme de Master en Agronomie, université abou bekr belkaid Tlemcen, 07/2021
- [49]. <https://ecofort.ch/fr/content/100-quest-ce-que-le-rayonnement-infrarouge>
- [50]. L'absorption de l'énergie solaire par l'atmosphère et le sol
lamap.inrp.fr/?Page_Id=16&Element_Id=528&DomainScienceType_Id=5

RESUME :

Dans ce travail, nous avons porté notre attention sur l'étude et la réalisation d'un séchoir solaire plat à convection forcée indirecte pour le séchage des matières alimentaires. Pour achever ce but nous avons dimensionné un modèle de séchoir par le programme (solidworks). avec des dimensions de (2 m * 1 m) avec quelques améliorations dans la conception du capteur solaire en installant deux panneaux absorbants pour le capteur solaire afin qu'il absorbe l'énergie solaire et la convertisse en chaleur afin que la chaleur soit transférée vers une chambre de séchage (0.85m*0.65m) sous l'effet de la convection forcée, puis l'air chaud est aspiré par un ventilateur, Une étude appliquée a été réalisée sur le terrain pour ce séchoir pour sécher le matériel de pomme de terre à l'Université d'El-oued pendant une journée (25/05/ 2022) de (8h00 à 17h00) lorsque les températures variaient au niveau du capteur solaire (de 42 à 76).) où elle max temperature au niveau de la sortie du capteur (76) à 12 :00h Ce séchoir a mis 4 heures pour sécher la pomme de terre, portant la teneur en eau de celle-ci à (x=13%) malgré les mauvaises conditions climatiques et ce sont de bons résultats.

Mots clés : séchage solaire, séchoir solaire forcé, capteur solaire, cinétique de séchage, Teneur en eau

ABSTRACT:

In this work, we have focused our attention on the study and the realization of a flat solar dryer with indirect forced convection for the drying of food materials. To achieve this goal we have dimensioned a model of dryer by the program (solidworks) . with dimensions of (2m*1m) with some improvements in the design of the solar collector by installing two absorber panels for the solar collector so that it absorbs solar energy and converts it into heat so that the heat is transferred to a drying room (0.85m*0.65m) under the effect of forced convection, then the hot air is sucked by a fan, An applied study was carried out in the field for this dryer for drying potato material in the University of El-oued for one day (25/05/2022) from (8:00 a.m. to 5:00 p.m.) when temperatures varied at the solar collector (from 42 to 76).) where it maxes out the temperature at the sensor outlet (76) at 12:00 p.m. This dryer took 4 hours to dry the potato, bringing its water content to (x=13%) despite the bad climatic conditions and these are good results.

Key words: solar drying, forced solar dryer, solar collector, drying kinetics, water content

ملخص

في هذا العمل نصب اهتمامنا على دراسة وانجاز مجفف شمسي غير مباشر مسطح يعمل بالحمل القسري لتجفيف المواد الغذائية ,لتحقيق هذا الهدف قمنا بتحجيم نموذج ثلاثي الابعاد لهذا المجفف بواسطة برنامج (solidworks) حيث اعتمد هذا التصميم على غرفة تجفيف (0.85 * 0.65 م) ومجمع شمسي بأبعاد (2 * 1 م) مع بعض التحسينات في تصميم المجمع الشمسي عن طريق تركيب لوحين ماصتين للمجمع الشمسي بحيث يعمل على امتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها إلى حرارة ليتم نقل الحرارة الى غرفة تجفيف تحت تأثير حمل القسري , ثم يتم سحب الهواء الساخن من غرفة التجفيف بواسطة مروحة وقد تم انجاز دراسة تطبيقية على ارض لهذا المجفف لتجفيف مادة البطاطا في جامعة الوادي ليوم (2022/05/25) من ساعة (8:00 الى 17:00) حيث تراوحت درجات الحرارة على مستوى المجمع الشمسي (من 42 الى 76) حيث وصلت لاعظم قيمة حرارة على مستوى مخرج مجمع (76) على ساعة (12:00h) بحيث استغرق هذا مجفف 4 ساعات لتجفيف مادة البطاطا ليصل محتوى مائي فيها الى (x=13%) رغم الظروف المناخية السيئة وهذه تعد نتائج جيدة

الكلمات المفتاحية: التجفيف الشمسي، المجفف الشمسي قسري، المجمع الشمسي، حركية التجفيف
المحتوى المائي