

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULIQUE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de Diplôme de Master en Génie Mécanique
Spécialité Energétique

**Réalisation Et Expérimentation D'un Système De
Séchage Solaire Destiné Pour Le Produit Agro-
alimentaire**

Promoteur :

Mr. KETFI Omar

CO-Promoteur :

Mr. LOUNICI Billel

Réalisé par :

Mme CHIBOUT Romaisa

Promotion : 2022/2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULIQUE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Titre proposé par le jury

Projet de Fin d'Etude
Pour l'obtention de Diplôme de Master en Génie Mécanique
Spécialité Energétique

**Réalisation Et Expérimentation D'un Système De
Séchage Solaire Pour Le Produit Agro-alimentaire**

Promoteur :

Mr. KETFI Omar

CO-Promoteur :

Mr. LOUNICI Billel

Réalisé par :

Mme CHIBOUT Romaiassa

Promotion : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Allah de m'avoir donné la santé et la capacité de compléter ma recherche et mon projet de début à la fin.

Deuxièmement, je remercie mon encadrant *Mr. KETFI Omar* ainsi que mon Co-encadrant *Mr. LOUNICI Billel* pour leur présence tout au long de la réalisation de mon projet et aussi pour m'encourager à fournir le meilleur.

Aussi, je dois remercier mes parents et ma famille d'être à mes côtés tout au long de mes études et pour leurs encouragements et leurs prières, mes enseignants, mes amis et tous ceux qui m'aident puissent Allah vous bénir tous.

Résumé

L'opération de séchage des produits agroalimentaires est simple dans son principe, mais très complexe dans son mécanisme. Devant cette complexité on s'est intéressé à une approche expérimentale. La présente étude consiste en la réalisation et l'expérimentation d'un séchoir solaire à circulation naturelle et forcée réalisée au sein de département mécanique de l'université de Blida 1 destinée au séchage indirect des produits agroalimentaires.

L'air rentre dans le capteur du côté inférieur où il subit un chauffage le long de son trajet vers la sortie située en haut de ce dernier. Les aliments à savoir de l'oignon et de la tomate ont été déposés sur trois claies (étages) permettant le séchage du produit.

Les résultats expérimentaux indiquent que l'évolution des températures de séchage est fortement liée à la variation de l'éclairement solaire et la température ambiante. Le temps de séchage étant plus faible lorsque les tests sont effectués par ciel clair.

Mots clés : Séchage solaire, expérimentation, conservation des aliments.

Abstract

The drying operation of agro-food products is simple in principle, but very complex in its mechanism. In view of this complexity, an experimental approach was taken. The present study consists in the realization and the experimentation of a solar dryer with natural and forced circulation carried out in the mechanical department of the university of Blida 1 for the indirect drying of food products.

The air enters the sensor on the lower side or it undergoes heating along its path towards the exit at the top of the latter. The food, namely onion and tomato, was placed on three trays (stages) allowing the product to dry.

The experimental results indicate that the evolution of drying temperatures is strongly related to the variation of sunlight and ambient temperature. The drying time is lower when tests are performed in clear sky.

Keywords : Solar drying, experimentation, food preservation.

ملخص

إن عملية تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية بسيطة من حيث المبدأ، ولكنها معقدة للغاية في آليتها. ونظراً لهذا التعقيد، اتخذ النهج تجريبي. تتألف هذه الدراسة من تحقيق وتجريب مجفف شمسي مع دوران طبيعي وقسري يتم إجراؤه في القسم الميكانيكي بجامعة البليدة 1 من أجل التجفيف غير المباشر للمنتجات الغذائية.

يدخل الهواء إلى المستشعر من الجانب السفلي ويخضع للتدفئة على طول مساره نحو المخرج في الجزء العلوي من الأخير. تم وضع البصل والطماطم، على ثلاث صواني تسمح للمنتج بالتجفيف.

تشير النتائج التجريبية إلى أن تطور درجات حرارة الجفاف يرتبط ارتباطاً وثيقاً باختلاف ضوء الشمس ودرجة الحرارة المحيطة يكون وقت الجفاف أقل عند إجراء الاختبارات في السماء الصافية.

الكلمات المفتاحية : التجفيف الشمسي التجريب والحفاظ على الغذاء

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : Gisement Solaire

I.1	L'astre solaire.....	4
I.1.1	Paramètres physique de l'astre solaire.....	4
I.1.2	Le rayonnement solaire.....	6
I.2	Interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière	7
I.3	Mesure de rayonnement solaire sur terre	8
I.3.1	Composantes du rayonnement solaire	8
I.3.2	Eclairement ou densité de puissance	9
I.3.3	Irradiation ou densité d'énergie	9
I.4	L'effet de serre.....	10

CHAPITRE II : Notion Générale sur le séchage

	Introduction.....	12
II.1	Capture solaire	12
II.1.1	Technologie des capteurs solaires plans	13
II.1.1.1	Composants du système de conversion thermique	13
II.1.1.2	Principe d'un capteur solaire.....	13
II.1.1.3	Fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	14
II.1.1.4	L'efficacité des capteurs solaires	15
II.1.1.5	Composants des capteurs solaires d'air.....	16

II.1.1.6	Position et orientation d'un capteur	16
II.1.2	Application de capteurs solaires	17
II.2	Les différents modes de séchage.....	17
II.2.1	Séchage par convection	17
II.2.2	Séchage par conduction	17
II.2.3	Séchage par rayonnement	18
II.3	Le séchage a l'air libre	18
II.4	Les différents types de séchoir solaire	19
II.4.1	Séchoir solaire passif ou à convection naturelle.....	19
II.4.2	Les systèmes actifs (les séchoirs hybrides).....	20
II.4.3	Séchoir solaire direct	20
II.4.4	Séchoir solaire indirect	21
II.4.5	Séchoir solaire mixtes.....	22
II.5	Evaluation des séchoirs solaires.....	22
II.5.1	Caractéristiques physiques du séchoir	23
II.5.2	Performances thermiques.....	23
II.5.3	Qualité du produit séché	23
II.6	L'air humide.....	23
II.6.1	L'humidité absolue (X)	23
II.6.2	L'humidité relative (φ).....	24
II.6.3	Température sèche T_S	24
II.6.4	Température sèche T_H	24
II.6.5	Température de rosée	24
II.6.6	Enthalpie de l'air humide.....	24

II.7	Caractéristique des solides humides	25
II.7.1	Humidité absolue	25
II.7.2	Humidité relative	25
II.8	Courbe caractéristique de séchage	25
II.9	Les formes d'eau dans les aliments	26
II.9.1	Eau d'hydratation.....	27
II.9.2	Eau de constitution.....	27
II.9.3	Vapeur d'eau	27
II.10	Types de modifications de la qualité du produit a séché.....	27
II.10.1	Modification biochimiques dues à la température	27
II.10.2	Pertes d'arômes.....	28
II.10.3	Modifications physiques et mécaniques	28

CHAPITRE III : Réalisation

Introduction.....	30
III.1 Localisation des expériences et climat de la zone.....	30
III.1.1 Lieu d'expériences	30
III.1.2 Climat de la zone.....	30
III.2 Prototype de séchoir solaire indirect actif	32
III.3 Description du système.....	32
III.3.1 Le capteur solaire.....	33
III.3.1.1 Conception du capteur solaire à air.....	33
III.3.1.2 Etapes de fabrication du capteur à air.....	35
III.3.2 La caisson de dessiccation (Volume de séchage).....	41
III.3.2.1 Conception la chambre de séchage	42
III.3.2.2 Etapes de fabrication de la cambre.....	43
III.4 Mesure de température.....	45

III.5 Fonctionnement du système.....	46
CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations	
IV.1 APPAREILLAGES DE MESURES	49
IV.2 Protocole expérimentale	50
IV.3 EXPERIMENTATIONS	51
IV.3.1 Lieu de déroulement des tests.....	51
IV.4.2 Période de tests	51
IV.4 RESULTATS ET INTERPRETATION.....	51
IV.4.1 Distribution des températures le long de la plaque absorbante	51
IV.4.2 Influence des ouvertures de passage sur les performances du capteur solaire	55
IV.4.3 Séchage des Aliments.....	58
IV.5 Cout de revient	63
CONCLUSION GENERALE.....	64
BIBLIOGRAPHIE.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau [II.1] : Avantages et inconvénients du séchage sous séchoir solaire.....	18
Tableau [II.2] : Avantages et inconvénients du séchage à l'air libre.....	19
Tableau [III.1]: Légende des composants de la figure	35
Tableau [III.2]: Légende des composants de la figure	43
Tableau [IV.1] : Appareillages de mesures.....	49

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1) : La structure interne du Soleil et de son atmosphère.....	4
Figure (I.2): Le rayonnement solaire	6
Figure (I.3) : spectre solaire.....	7
Figure (I.4) : phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission Au niveau du capteur solaire.....	8
Figure (I.5) : composante du rayonnement global.....	9
Figure (I.6) : l'effet de serre.....	10
Figure (II.1) : Schéma d'un capteur plan à air.....	13
Figure (II.2) : Principe d'un capteur solaire.....	14
Figure (II.3) : fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	15
Figure (II.4) : Un angle capteur plat (hiver-été)	16
Figure (II.5) : Séchoir solaire indirect	21
Figure (II.6) : Différents types de séchoirs solaires.....	22
Figure (II.7) : Courbe caractéristique du séchage en fonction du temps	26
Figure (III.1) : Image satellite de la zone d'expérience.....	30
Figure (III.2) : Température moyenne maximale et minimale à Blida.....	31
Figure (III.3) : humidité relative moyenne à Blida	31
Figure (III.4) :conception un Séchoir solaire indirect actif ou forcé	32
Figure (III.5) : Diagramme schématique du séchoir indirect actif	33
Figure [III.6] : vue éclatée de capteur solaire à air	34
Figure (III.7) : un boîtier extérieur d'un capteur à air.	36
Figure (III.8) : un boîtier extérieur isolée	38
Figure (III.9) : capteur solaire à air.....	41

Figure (III.10) : vue éclatée de la chambre de séchage.	42
Figure (III.11) : la chambre de séchage	44
Figure (III.12) : Disposition des Thermocouples dans le Système.....	45
figure (III.13): Séchoir solaire indirect actif ou forcé.....	46
Figure (IV.1) : Variation de l'éclairement solaire journalier.....	52
Figure (IV.2) : Variation de la température de l'air au niveau Bas du capteur (sur/sous la plaque absorbante).	53
Figure (IV.3) : Variation de la température de l'air au niveau haut du capteur (sous/sur la plaque absorbante).	53
Figure (IV.4) : Variation de la température de la plaque absorbante en deux niveaux (Haut et Bas).	55
Figure (IV.5) : Variation de l'éclairement solaire journalier.....	56
Figure (IV.6) : Variation de la température de l'air à la sortie du capteur.	57
Figure (IV.7) : Variation de la température de l'air à la sortie du capteur	58
Figure (IV.8) : Variation de la température du niveau inférieur et supérieur de la chambre	59
Figure (IV.9) : Variation de la température du niveau inférieur et supérieur de la chambre	60
figure (IV.10): les tomates fraîches.....	61
Figure (IV.11) : les tomates séchées	61
Figure (IV.12) : les abricots frais.....	61
Figure (IV.13) : les abricots Sèche	61
Figure (IV.14) : Les oignons frais.....	62
Figure (IV.15): les oignons séchés.....	62
Figure (IV.16): Les pêches fraîches.....	62
Figure (IV.17) : les pêches séchées	62

NOMENCLATURE

h	Constante de Planck	$6,626 \times 10^{-34}$
ν	La fréquence	HZ
C	La vitesse de lumière	$299\,792\,458 \text{ m/s}$
λ	Longueur d'onde	m
φ_i	L'énergie solaire incidente	J.m^{-2}
φ_r	L'énergie absorbée	J.m^{-2}
φ_a	L'énergie réfléchi	J.m^{-2}
φ_t	L'énergie transmise	J.m^{-2}
G	Le rayonnement global	W.m^{-2}
D	Rayonnement diffus	W.m^{-2}
I	Rayonnement direct	W.m^{-2}
Q	Puissance thermique utile	Watt
I_T	Rayonnement solaire totale incidente sur le capteur	W.m^{-2}
I_A	Zone d'ouverture de l'absorbeur	m^2
Q_{conv}	Le flux de chaleur par convection	Watt
h	Coefficient d'échange par convection	W.m^{-2}
$T_{a,a}$	Température de l'air ambiante	K
$T_{s,p}$	Température de la surface du produit	K
cp_a	La chaleur massique de l'air	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
cp_v	La chaleur massique de l'eau	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
L_v	La chaleur latente de vaporisation de l'eau	0°C

Introduction

Générale

Ces dernières années, les énergies fossile (pétrole et gaz) ont causé de grave dommage à l'environnement, notamment en termes d'émission de gaz qui ont conduit à la pollution de l'air et la mer, c'est aussi une énergie non renouvelable et est en passe d'influencer. Ce qui a conduit à réfléchir sur les énergies renouvelables représentées dans l'énergie solaire, que j'utilise comme énergie primaire dans le prototype proposé dans ce travail.

L'Algérie semble avoir une dotation Naturelle et divine dans le domaine de l'énergie, et des capacités qui ne sont pas disponible pour de nombreux pays développés riches, nous ne devons pas manquer l'occasion de nous efforcer d'exploiter cette richesse, et bénéficier de notre peuple grâce au progrès matériel et permettre à notre économie de prospérer en permanence en garantissant la liberté, l'exploitation et la sécurité.

Parmi les différents moyens de séchage, je propose, dans ce mémoire, le séchage solaire qui est l'une des applications réponsues de l'énergie solaire, c'est le séchage thermique des aliments, ce domaine est très encouragé dans notre pays vu qu'il rentre dans la préservation de la sécurité alimentaire.

Le séchage solaire des produits agricoles constituera une solution avantageuse pour la réduction des pertes après récolte. Où Chaque année le monde perd ou gaspille un tiers de la nourriture qu'il produit, cela signifie qu'environ 14% de la nourriture produite et perdue entre la récolte et la vente ou détail. Ces chiffres sont intolérables dans un monde où quelque 870 million de personnes n'ont pas assez à manger, selon l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. Le marché arabe en a grandement besoin, parce qu'il n'est pas très répondu par rapport aux marchés européens, par conséquent, le séchage solaire des légumes et des fruits est nécessaire et réalise de grands bénéfices. La réduction de la facture d'importation des fruits sec sera notée, de ce fait, travailler plus sur la production locale d'un produit moins chère, naturelle (couleur conservée, gout, sucre) et de meilleure qualité.

Le séchoir solaire atteint l'efficacité énergétique, parce que le séchage à la manière traditionnelle (électrique) est un processus énergivore, par exemple en France, le secteur industriel est responsable de 14% de la consommation énergétique d'où 40% de cette énergie est consommée en séchage étant imputable aux industries agro-alimentaires (Nadeau et Puiggali, 1995).

Les séchoirs solaires sont conçus pour fournir un processus de séchage à basse température ce qui permet de conserver aux aliments une très grande partie des enzymes, antioxydants sans les appauvrir en minéraux, et nutriments naturellement présents dans les fruits, si une bonne stratégie d'investissement est adaptée pour ce type de système.

Le prototype réalisé et présenté dans ce mémoire est un séchoir solaire thermique indirecte destiné pour le séchage des aliments de différentes natures. Il est composé d'une partie de captation/conversion solaire thermique appelée Capteurs solaire thermique à air pour la production de l'air chaud sec ainsi d'une partie de séchage appelée Volume de séchage ou Chambre de séchage. Le séchoir est conçu d'une manière de fonctionner par l'énergie solaire directe ou diffuse, sans ou avec ventilation forcée.

Le présent travail se divise en quatre parties, la première porte sur le Gisement solaire. Dans cette partie est à propos de l'étoile solaire, le rayonnement solaire, l'interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière et l'effet serre.

La deuxième partie porte sur les généralités sur le séchage. Dans cette partie, quelques Généralités sur le séchage sont données. Il s'agit de définition, des capteurs solaires, les différents modes de séchage et les différents types de séchoirs existants.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et la réalisation de séchoir. C'est la partie la plus longue de ce travail car elle englobe les différentes parties de réalisation des parties du séchoir.

Pour terminer, le quatrième chapitre porte sur l'évaluation des performances du dispositif à partir des tests ou l'influence de quelques paramètres sur l'opération de séchage tel que la température distribuer de différents points étudiés. Les résultats obtenus sont discutés et suivis d'interprétation.

CHAPITRE I

Gisement Solaire

I.1 L'astre solaire :

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

I.1.1 Paramètres physique de l'astre solaire

Le Soleil tel que nous le connaissons, appartient à la séquence principale des étoiles. Il se trouve dans un état d'équilibre hydrostatique (gravitation/pression) et thermique (production d'énergie nucléaire/rayonnement), ne subissant ni contraction, ni dilatation continue. Le soleil est formé d'une masse gazeuse de $1.9891 \cdot 10^{30}$ kg principalement composé d'éléments légers tels que l'hydrogène (92.1% du volume) et l'hélium (7.8% du volume). Il contient aussi, dans des proportions moindres, de nombreux autres éléments (oxygène, carbone, azote, néon, silicium, magnésium, soufre, etc.). Dont le rayon est égal à 695980 km soit 109 fois le rayon de la terre. Il est situé à une distance moyenne de 149598000km de la terre. Sa densité est de $1,41 \text{ g/cm}^3$ celle de la terre est égale à $5,51 \text{ g/cm}^3$ [1].

Le Soleil possède une structure interne et une atmosphère (Figure 1.1). La structure interne du Soleil est constituée de plusieurs zones (le noyau, la zone de radiation et la zone de convection). L'atmosphère du Soleil est constituée de plusieurs régions (la photosphère, la chromosphère, la couronne et l'héliosphère).

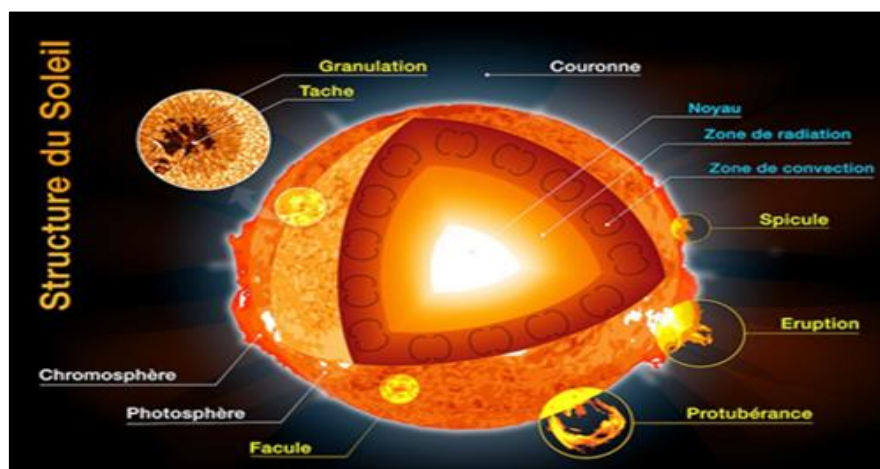


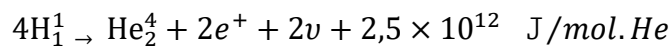
Figure (I.1) : La structure interne du Soleil et de son atmosphère

On trouve du centre vers l'extérieur selon les théories actuelles :

- Le noyau :

De dimension et de composition inconnue et qui est inaccessible aux investigations car tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures. La température atteint 15 millions de degrés et la pression 1 milliard atmosphère. C'est dans le noyau que se produisent une suite de réactions thermonucléaires exothermiques compliquées (fusion thermonucléaire) dite cycle de Bethe qui transforment l'hydrogène en Hélium et libère de l'énergie sous forme de rayonnement, électricité, vent solaire

La réaction s'écrit globalement :



Où e^+ désigne l'électron positif, ν_e neutrino électronique.

- Une zone radiative :

Zone de rayonnement de 500.000 km d'épaisseur à travers laquelle l'énergie est véhiculée uniquement par rayonnement, qui émise par le cœur est transférée vers la surface sous de radiation électromagnétique.

- 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'aurole 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.1.2 Le rayonnement solaire

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

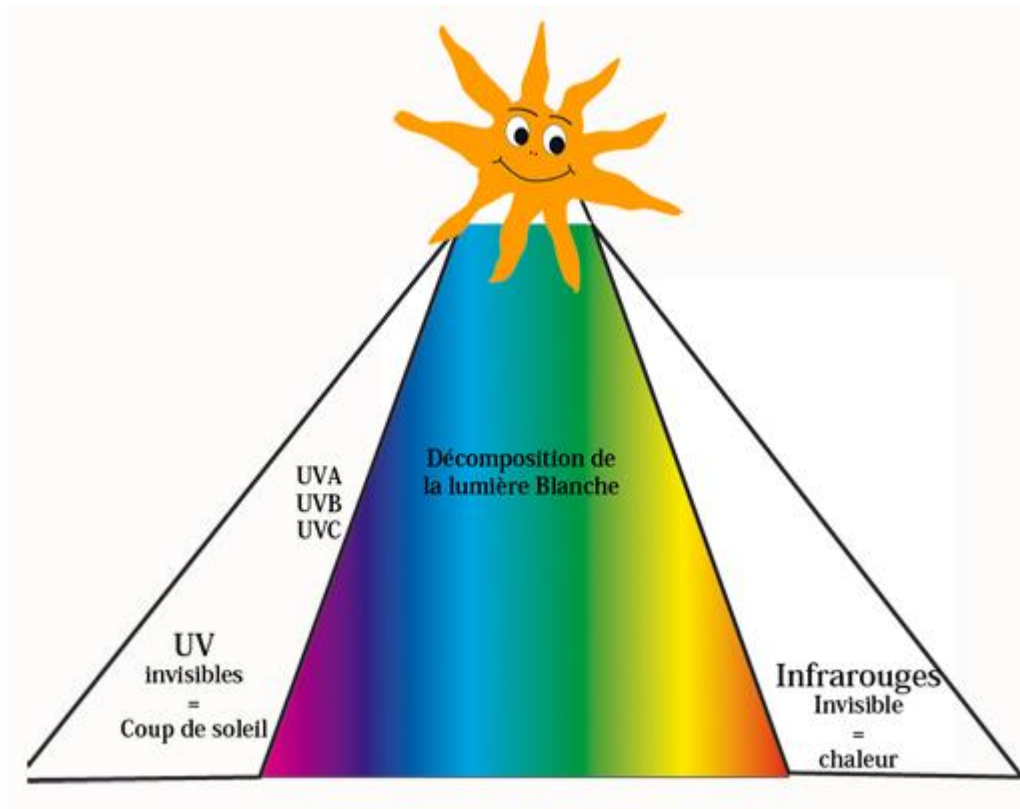


Figure (I.2) : le rayonnement solaire

- **Spectre solaire :**

Le rayonnement solaire est constitué par un flux de particule appelé photons émise par le soleil et se déplaçant à la vitesse de $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Ces photons composants le rayonnement électromagnétique sont porteur d'une énergie d'après la loi de Louis de Broglie

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : la constante de Planck

ν : la fréquence

c : la vitesse de la lumière

λ : longueur d'onde

Le spectre du rayonnement solaire c'est sa décomposition en longueur d'onde ou (couleurs). La lumière solaire est composée de toute sorte de rayonnement de couleur différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde qui s'étend en hors atmosphère pratiquement de 0.1 μm à 0.4 μm , répartie comme suit :

- Zone spectrale de 0.1 μm a 0.38 μm rayonnement : ultra-violet
- Zone spectrale de 0.38 μm a 0.78 μm rayonnement : visible
- Zone spectrale de 0.78 μm rayonnement : infra-rouge

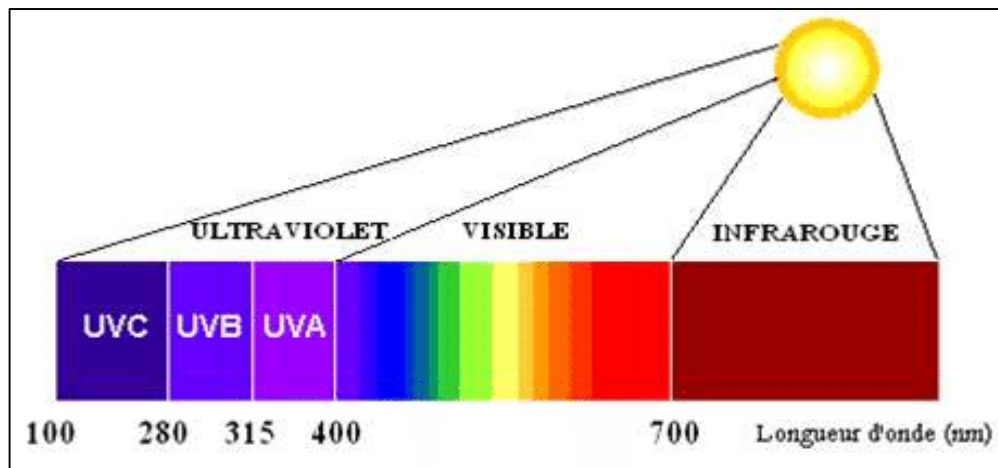


Figure (I.3) : spectre solaire

I.2 Interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière

L'ensemble des capteurs solaires ne répond pas de la même façon quand ils sont exposés face au soleil.

Les cellules photovoltaïques par exemple répondent au rayonnement global et dépendent beaucoup de la longueur d'onde. Elles sont particulièrement sensibles aux radiations solaires de longueur d'onde comprise entre (0.4 et 1 μm) du spectre solaire ; par contre les capteurs thermiques (séchoir, chauffe-eau) sont plus sensibles aux

rayonnements infra rouges, de plus, lorsque l'énergie solaire incidente (φ_i) atteint le capteur (Figure 1.4), la surface peut absorber l'énergie (φ_a), réfléchir (φ_r) ou transmettre l'énergie incidente (φ_t) de tel façon que :

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (I.2)$$

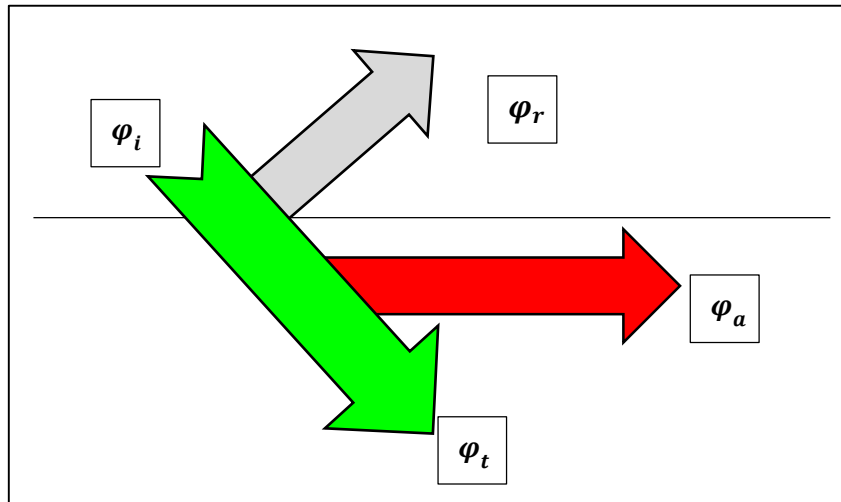


Figure (I.4) : phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission au niveau du capteur solaire

I.3 Mesure de rayonnement solaire sur terre

I.3.1 Composantes du rayonnement solaire

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

$$G = I + D \quad (I.3)$$

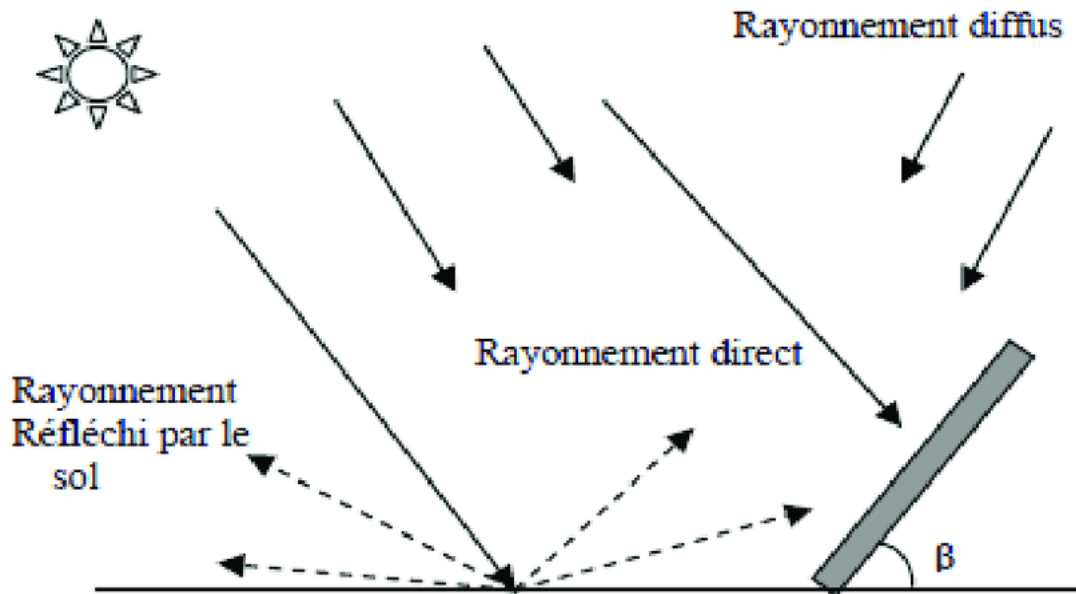


Figure (1.5) : composante du rayonnement global

Le rayonnement global est mesuré expérimentalement à l'aide d'un pyranomètre appareil dont son globe de verre lui confère une grande acceptante angulaire de tel façon qu'il peut capter les rayons venant de toutes les directions, lorsque l'appareil est muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement diffus. Le rayonnement direct (I) est mesuré à d'un pyréliomètre, appareil très coûteux généralement équipé d'un système asservi qui (suit le soleil) dans sa trajectoire. Connaissant ces deux grandeurs on peut en déduire le rayonnement diffus à l'aide de l'équation (I.3).

I.3.2 Eclairement ou densité de puissance

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

L'éclairement global moyen au niveau de notre capteur à air incliné à la latitude de Blida avoisine les $612 Wm^{-2}$

I.3.3 Irradiation ou densité d'énergie

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

I.4 L'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet de maintenir, à la surface de la terre, une température positive moyenne compatible avec le développement de la vie. Le soleil rayonne de l'énergie solaire sur la terre. La majeure partie de cette énergie (45%) est renvoyée dans l'espace.

Les gaz à effet de serre de l'atmosphère contribuent au réchauffement global par absorption et réflexion de l'énergie atmosphérique et solaire. Si les gaz à effet de serre n'existaient pas, les températures sur terre seraient inférieures à - 18 degrés. A l'état naturel, la vapeur d'eau (H₂O) est le gaz à effet de serre le plus présent dans l'atmosphère. On trouve aussi le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone troposphérique (O₃) [3].

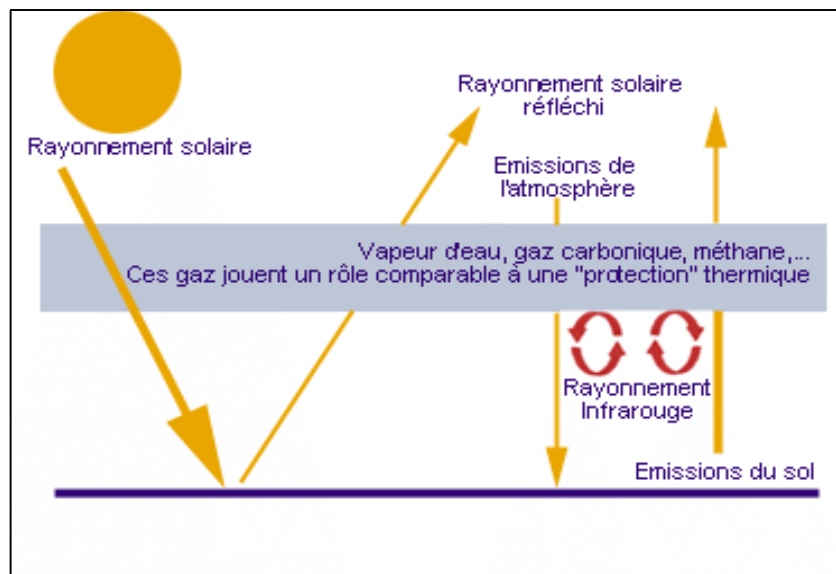


Figure (I.6) : l'effet de serre

CHAPITRE II

Notion Générale Sur

Le Séchage

Introduction

Le séchage solaire est l'un des procédés les plus anciens de conservation des produits agricoles utilisés par les humains. Est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide. Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. Cette opération met en jeu un transfert de chaleur (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide) et un transfert de masse (le liquide quitte le produit et passe à l'état de vapeur dans l'air asséchant).

L'objectif de sécher un produit (corps humide) est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année).

Les raisons du séchage Peuvent être regroupées comme suit :

- Faciliter la conservation des produits (en réduisant l'activité de l'eau).
- Diminuer la masse et le volume des produits pour réduire leur encombrement et faciliter leur Transport.
- Donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (flocons de purée de pomme de terre, café lyophilisé...etc.).

Mais en revanche les inconvénients du séchage sont :

- Modification du produit dans sa forme, sa texture, ses qualités nutritionnelles et Organoleptiques.

Donc dans ce deuxième chapitre nous allons voir les composants des capteurs solaires les plus efficaces dans le séchage, les différentes méthodes et modes de séchage solaire, et définir également les types de séchoirs existants et à quoi servent-ils.

II.1 Capteur solaire

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 [4]. Fondamentalement, Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- Les capteurs plans.
- Les capteurs à concentration.

II.1.1 Technologie des capteurs solaires plans (vitrés à air) :

II.1.1.1 Composants du système de conversion thermique

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants :

- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories) voir Figure (II.1), les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont l'eau et l'air [5]
- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution.

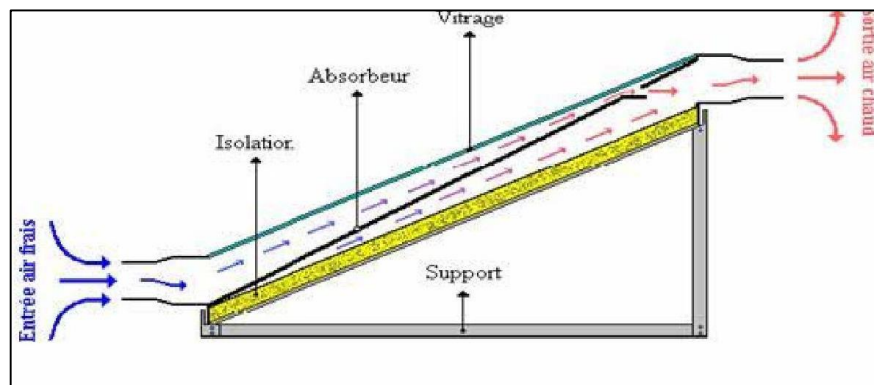


Figure (II.1) : Schéma d'un capteur plan à air

II.1.1.2 Principe d'un capteur solaire

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage.

Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction [6].

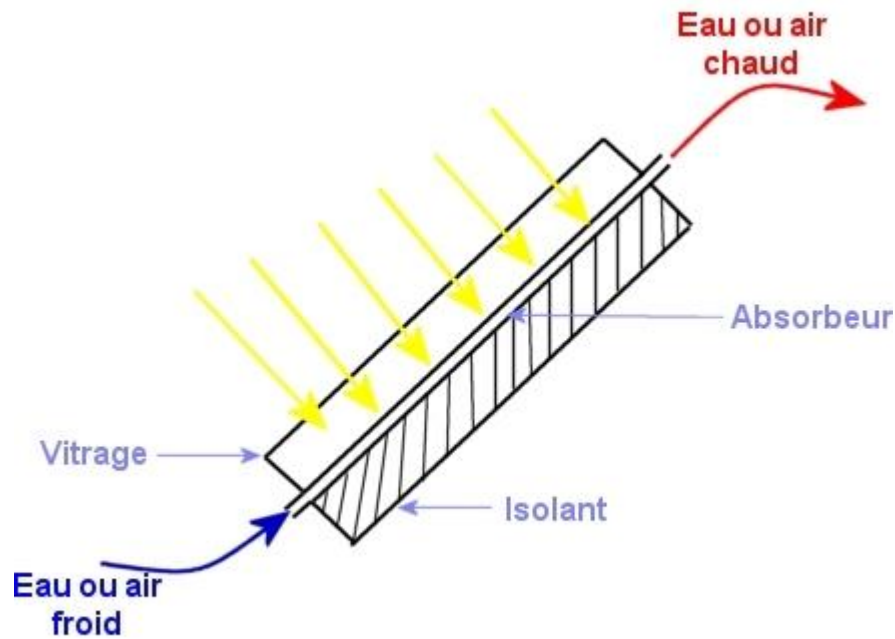


Figure (II.2) : Principe d'un capteur solaire

II.1.1.3 Fonctionnement d'un capteur solaire plan

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (Figure I.3) [7]. Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers le stockage, à partir duquel elle est transmise au consommateur.

Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour les rayonnements I.R lointains émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre.

L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement.

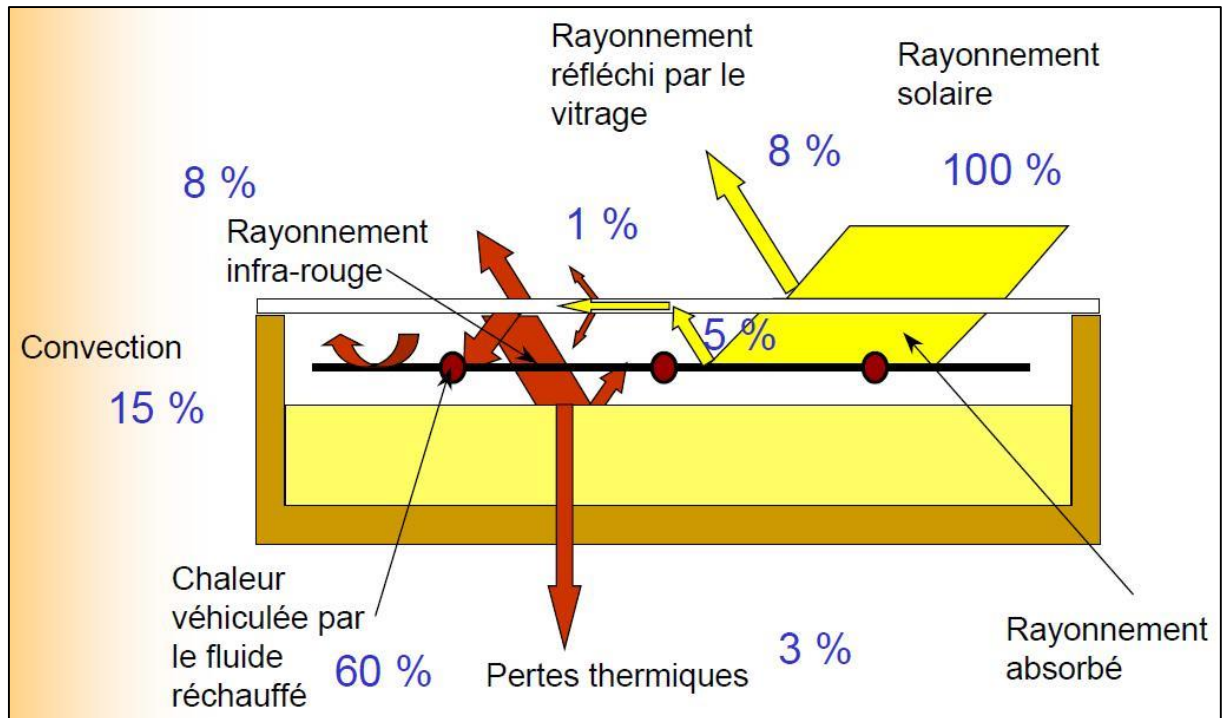


Figure (II.3) : fonctionnement d'un capteur solaire plan.

II.1.1.4 L'efficacité des capteurs solaires

L'efficacité des capteurs solaires dépend du matériau recouvert du capteur ; vitesse de l'air, l'absorbeur et sa place dans le capteur, le principal paramètre d'efficacité d'un capteur solaire est le degré de chauffage de l'air [8], le rendement instantané du capteur solaire η est défini comme [9].

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}} = \frac{Q}{I_T \cdot I_A} \quad (\text{II.1})$$

Q : puissance thermique utile en *Watt*

I_T : Rayonnement solaire total incident sur le capteur en W/m^2

I_A : Zone d'ouverture de l'absorbeur en m^2

II.1.1.5 Composants des capteurs solaires d'air

- L'absorbeur : L'absorbeur est l'un des éléments les plus importants d'un capteur thermique ; il convertit le rayonnement solaire en chaleur.
- La vitre : Le vitrage permet de protéger l'intérieur du capteur contre les effets de l'environnement et d'améliorer le rendement du système par effet de serre.
- L'isolant : L'isolant thermique permet de limiter les déperditions thermiques, sa caractéristique est le coefficient de conductivité ; plus il est faible meilleur est l'isolant.
- Le fluide caloporteur : Le fluide caloporteur (ou calorporteur) permet d'évacuer la chaleur emmagasinée par l'absorbeur et de la transmettre vers là où elle doit être consommée.

II.1.1.6 Position et orientation d'un capteur

La hauteur du soleil sur le ciel change presque chaque semaine de l'année. Le plus haut est en été quand est le meilleur moment pour le capteur et le plus bas en hiver.

Les capteurs sont généralement fixes et ne nécessitent aucun suivi du soleil. Le capteur doit être orienté directement vers l'équateur, face au sud dans l'hémisphère et au nord dans le sud.

L'angle d'inclinaison optimal du capteur est égal à la latitude de l'emplacement avec des variations d'angle de 10 à 15 ° plus ou moins selon l'application [11].

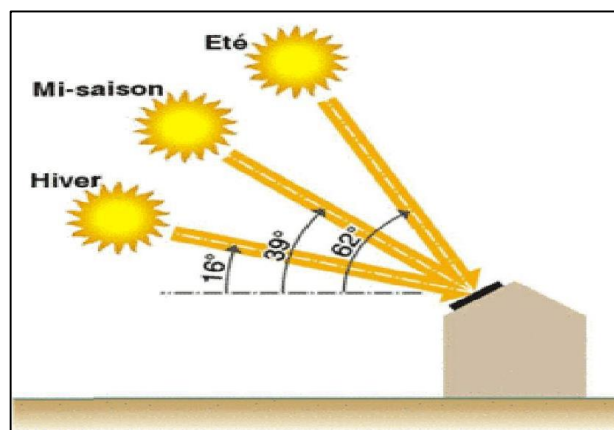


Figure (II.4) : Un angle capteur plat (hiver-été)

II.1.2 Application de capteurs solaires

Les capteurs solaires sont utilisés pour :

- Chauffage et climatisation des habitations.
- La distillation de l'eau.
- La cuisson solaire.
- À des fins agricoles : séchage des céréales, des fruits, des légumes, de la viande, etc.
- Usage ménager : chauffer de petits séchoirs.

II.2 Les différents modes de séchage

Il existe de nombreuses méthodes et manières pouvant être utilisées pour le séchage

II.2.1 Séchage par convection

Le caractère spécifique de ce mode de séchage réside dans le fait que l'air de séchage remplit deux fonctions simultanées l'apport de chaleur vers la surface du produit, selon la loi de Newton et récupération de la vapeur d'eau dégagée du produit. Il est à noter que la circulation du fluide caloporteur peut être une convection naturelle ou forcée.

$$Q_{conv} = h * S_p (T_{a,a} - T_{s,p}) \quad (II.2)$$

Q_{conv} : le flux de chaleur par convection en *Watt*

h : coefficient d'échange par convection

$T_{a,a}$ Et $T_{s,p}$: températures de l'air ambiant et la surface du produit respectivement en Kelvin

II.2.2 Séchage par conduction

Le séchage indirect est caractérisé par le contact du produit à sécher avec une paroi conductrice de chaleur chauffée, par un fluide caloporteur (air, eau, gaz, vapeur d'eau). Sous l'action de la chaleur ainsi transmise par conduction, le liquide s'évapore où se vaporise. La vapeur formée étant entraînée par l'action d'un léger courant de gaz auxiliaire ou par dépression.

Le transfert de chaleur par conduction assure le passage de l'énergie vers les couches internes du produit selon la loi de Fourier :

$$\varphi_{cond} = -\lambda * S_p * \frac{dt_p}{dx} \quad (II.3)$$

II.2.3 Séchage par rayonnement

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par l'éclairement. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible. Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil. La quantité de chaleur Q (en watts).

II.3 Le séchage a l'air libre

Méthode ancestrale utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant à étaler en plein air les produits à sécher. C'est une technique facile et pas coûteuse, néanmoins elle peut causer des pertes importantes. Un tableau comparatif a été dressé mettant en évidence les avantages et les inconvénients du séchage à l'air libre et sous séchoir. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

Séchage sous séchoir solaire	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du temps de séchage • Maîtrise de la teneur en eau finale désirée • Protection de produit contre le rayonnement ultra-violet • A l'abri des intempéries, des insectes et des champignons • Maîtrise de l'opération de séchage • Energie gratuite 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation de l'énergie conventionnelle (Electricité, gaz, bois,) si système hybride • Investissement relativement • Main d'œuvre qualifiée

Tableau (II.1) : Avantages et inconvénients du séchage sous séchoir solaire

Séchage à l'air libre	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Procédé simple et non coûteux • N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée • Source d'énergie solaire gratuite et non polluante • Pas de dépense d'énergie • Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit • Peu de changement de couleur 	<ul style="list-style-type: none"> • Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure) • Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire • L'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensible aux rayonnements ultra-violet, insectes, rongeurs, perte de vitamine...)

Tableau [II.2] : Avantages et inconvénients du séchage à l'air libre

II.4 Les différents types de séchoir solaire

Le séchage solaire c'est une solution d'économie d'énergie, pour les pays qui disposent d'un gisement solaire important. Pour cette raison, plusieurs types de séchoirs solaires ont été conçus et étudiés en variant la disposition des produits, les températures et le type de produit à sécher. Généralement, on distingue deux catégories : actif et passif.

- Les systèmes passifs : L'énergie solaire est la seule source qui assure le fonctionnement.
- Les systèmes actifs (hybrides) : Ils associent à l'énergie thermique solaire à une énergie d'appoint fuel gaz pour le chauffage ou bien l'électricité pour la circulation de l'air [12].

II.4.1 Séchoir solaire passif ou à convection naturelle

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance à monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher. L'écoulement de l'air asséchant ici se fait par effet de cheminée. L'énergie solaire seule assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de toute sorte de distribution d'énergie.

L'un des inconvénients de ce type de séchoir c'est le risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

II.4.2 Les systèmes actifs (les séchoirs hybrides)

Ce type de séchoir utilise une énergie supplémentaire à la source initiale à savoir le soleil comme énergie d'appoint, cette dernière peut se situer en deux points différents à l'intérieur de la chambre de séchage en utilisant une résistance électrique pour maintenir la température constante et dans ce cas l'énergie solaire est secondaire ou bien des Ventilateurs électriques pour accélérer la circulation de l'air.

Les Avantages de ces séchoirs sont :

- Indépendance par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.
- Forte croissance de la productivité par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

Les inconvénients :

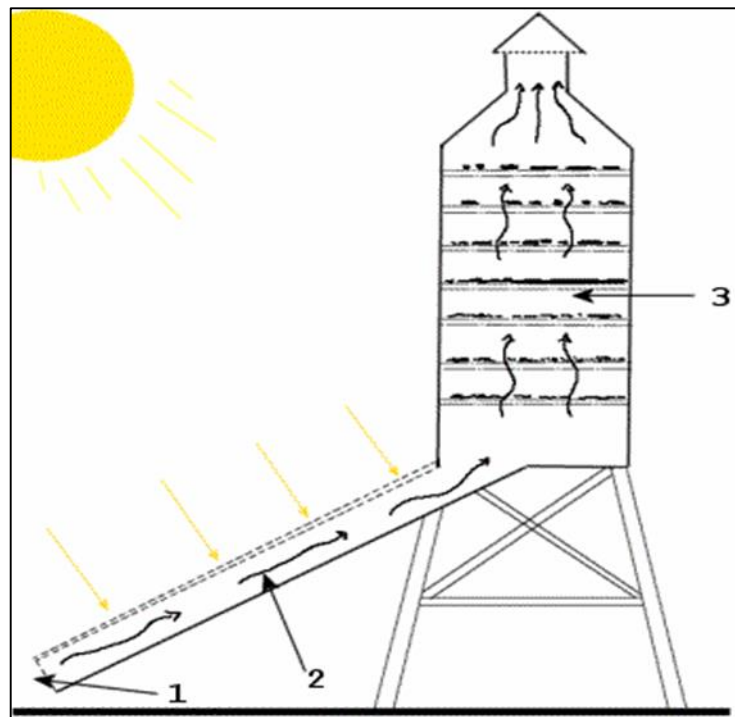
- Le coût de production et d'investissement est élevé.
- La nécessité d'approvisionnement du local en carburant, électricité, gaz.
- Demande un personnel qualifié pour la maintenance

II.4.3 Séchoir solaire direct

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l'interaction directe rayonnement solaire – produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments [13].

II.4.4 Séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire indirect (Figure II.5) se compose essentiellement de deux parties : en amont un insolateur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur où l'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de déssiccation contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. Ce dernier sort vers l'extérieur de la chambre de dessiccation par le biais d'une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits. Ces systèmes possédant des insolateurs plans en amont sont plus performants et plus répandus que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive...etc.). Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agro-alimentaires.



1. Entrée d'air 2. Isolateur plan 3. Claies 4. Cheminée

Figure (II.5) : Séchoir solaire indirect

II.4.5 Séchoir solaire mixtes

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

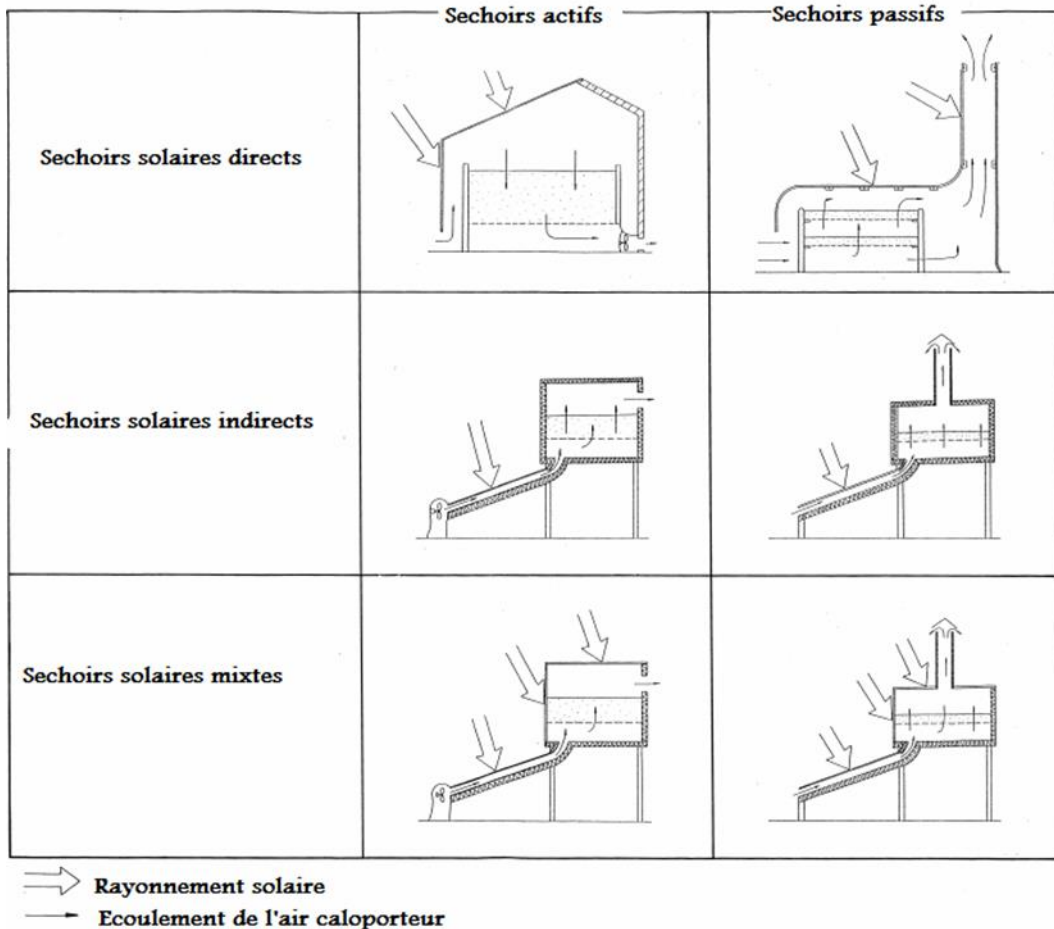


Figure (II.6) : Différents types de séchoirs solaires.

II.5 Evaluation des séchoirs solaires

Tester un séchoir est nécessaire pour évaluer ses performances techniques et fournit une base de comparaison avec les autres séchoirs, et peut aider les industriels à améliorer leurs designs et ainsi permettre aux usagers de sélectionner le séchoir approprié.

En général il n'existe pas de procédure particulière d'évaluation des séchoirs. Les séchoirs sont évalués en mesurant et en comparant certains paramètres sélectionnés.

Les paramètres généralement reportés lors de l'évaluation d'un séchoir [14] se résument comme suit :

II.5.1 Caractéristiques physiques du séchoir

- Type, forme et dimension du séchoir
- Capacité du séchage/ densité de charge
- Surface de la claie et nombre de claie (applicable)

II.5.2 Performances thermiques

- Temps de séchage et vitesse de séchage
- Température et humidité de l'air asséchant
- Flux de l'air asséchant
- Efficacité du séchoir

II.5.3 Qualité du produit séché

- Qualité organoleptique (couleur, saveur, goût, arôme, texture)
- Eléments nutritifs
- Capacité de réhydratation

II.6 L'air humide

Le mode de séchage le plus répandu est le séchage par convection ; il consiste à faire agir sur la matière à sécher un courant de gaz ou d'air (de faible humidité) et chaud qui vaporise l'humidité du produit et entraîne la vapeur en se transformant en un gaz ou air humide refroidi. Le mélange air sec et vapeur d'eau constituent l'air humide. Nous définissons ci-après les importantes grandeurs caractérisant l'air humide.

II.6.1 L'humidité absolue (X)

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau ; c'est la quantité de vapeur d'eau ($m_{v,e}$) contenue dans un 1kg d'air sec ($m_{a,s}$) est donnée par la relation suivante :

$$X = \frac{m_{v,e}}{m_{a,s}} \quad (\text{II.4})$$

II.6.2 L'humidité relative (ϕ)

L'humidité relative ou degré hygrométrique (ϕ) 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 même température θ .

$$\phi = \frac{P_v}{P_{v,s}} \quad (\text{II.5})$$

II.6.3 Température sèche T_S

C'est la température indiquée par un thermomètre ordinaire (thermomètre à mercure ou à l'alcool) nue placée dans le courant d'air ou de gaz.

II.6.4 Température sèche T_H

La température humide ou (température de bulbe humide) indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entourée par un tissu humide (coton, ...).

La différence ($T_S - T_H$) représente l'humidité relative de l'air.

*Elle est égale à zéro si l'air est saturé en vapeur d'eau c'est-à-dire $\phi = 100\%$ donc pas d'évaporation possible.

II.6.5 Température de rosée

C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau dans l'air humide commence à se condenser (apparition de gouttelette d'eau).

II.6.6 Enthalpie de l'air humide

C'est la quantité de l'énergie contenu dans un 1kg de l'air sec

$$H = Cp_a \theta + r(L_v + Cp_v \theta) \quad (\text{II.6})$$

Cp_a Et Cp_v : sont respectivement les chaleurs massiques de l'air et de l'eau à l'état gazeux

L_v : la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0° C.

II.7 Caractéristique des solides humides

II.7.1 Humidité absolue

L'humidité absolue d'une solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

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

II.7.2 Humidité relative

L'humidité relative d'une 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.

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

II.8 Courbe caractéristique de séchage

Van Meel (1957), Krischer et Kast(1978), ont proposé une représentation des résultats, obtenus à partir des différentes expériences effectuées sur un produit donné. Ceci a permis le traçage d'une courbe unique dite courbe caractéristique de séchage. Cette courbe regroupe des résultats obtenus dans des conditions différentes de vitesse de l'air, de température et de taux d'humidité de l'air [15].

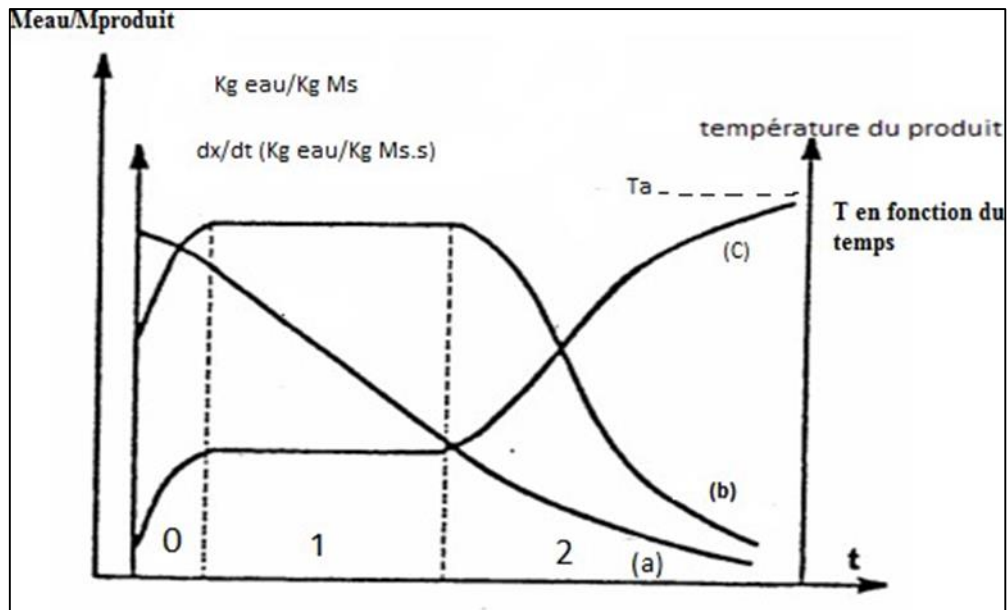


Figure (II.7) : Courbe caractéristique du séchage en fonction du temps

Pour comprendre le phénomène de migration de l'eau dans les produits humides on doit considérer simultanément les transferts de masse et de chaleur dans toutes les phases (solide, vapeur et solide)

Sur la figure (II.7) on distingue trois courbes essentielles d'opération de séchage, situées dans trois phases.

- La courbe (a) : représente l'évolution de la teneur en eau (rapport de la masse d'eau contenu dans le produit et de la masse sec)
- La courbe (b) : représente la vitesse de séchage en fonction du temps
- La courbe (c) : représente l'évolution de la température du produit en fonction du temps

Les phases de sont définies comme :

- Phase 0 : phase de mise en température du produit.
- Phase 1 : phase de séchage à allure constante.
- Phase 2 : phase de ralentissement.

II.9 Les formes d'eau dans les aliments

L'eau dans un aliment peut généralement se présenter sous trois formes [16] :

II.9.1 Eau d'hydratation

L'eau d'hydratation est retenue soit sous forme d'un film adhérent à la surface externe du solide ou dans les espaces interstitiels et les pores par des forces de capillarité liées à la tension superficielle du liquide cette eau est appelée (eau libre), soit d'une façon plus intime, par des forces de cohésion plus importantes avec la matrice solide et/ou avec les autres molécules d'eau, cette eau est appelée (eau liée).

II.9.2 Eau de constitution

L'eau de constitution participe à la structure moléculaire intime du solide, comme par exemple l'eau contenue dans les gels. Son élimination, plus ou moins complète, constitue une déshydratation et modifie la structure même du solide, et ce n'est pas notre but recherché lors d'un séchage. La déshydratation est accompagnée d'une modification de la structure moléculaire primitive du produit.

II.9.3 Vapeur d'eau

La vapeur d'eau mélangée à l'air sec occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.

II.10 Types de modifications de la qualité du produit a séché

II.10.1 Modification biochimiques dues à la température

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables, sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes [17] :

- Réactions de Maillard, c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle.
- Oxydations de matières grasses (rancissement)
- Destruction de vitamines
- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant.

- Réactions enzymatiques : si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elles produisent leurs effets de brunissement des poly phénols, hydrolyse des lipides, etc.

II.10.2 Pertes d'arômes

Le séchage un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule. Mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation.

II.10.3 Modifications physiques et mécaniques

Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- Migration des solutés vers la surface : outre son effet sur l'aspect du produit, cette accumulation de sucres ou d'autres solutés en surface est préjudiciable à la valeur du produit lorsqu'il est consommé réhydrater
- Fusion et migration de matières grasses.
- Modifications de forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permettent d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

CHAPITRE III

Réalisation

Introduction

Le séchage solaire est l'un des procédés qui a trouvé une application en Algérie en raison des quantités importantes d'irradiations solaires qui peuvent être exploitées dans ce pays, il a pour but de conserver les produits agricoles à température ambiante pour une utilisation ultérieure.

Ce chapitre est consacré à la présentation des étapes de réalisation de notre capteur à air ainsi que la chambre de séchage. Les détails de réalisation seront cités dans ce chapitre.

III.1 Localisation des expériences et climat de la zone :

III.1.1 Lieu d'expériences :

Les expériences ont été réalisées près de l'atelier de soudage du département de mécanique de l'université Saad Dahlab de Blida 1, qui est situé à une latitude de 36° et une longitude de 3° au nord d'Algérie avec 260 m d'altitude par rapport au niveau de la mer, la ville de Blida est située à environ 47 km d'Alger.



Figure (III.1) : Image satellite de la zone d'expérience.

III.1.2 Climat de la zone :

- **Température de l'air :**

La saison très chaude dure 2,9 mois, Le mois le plus chaud de l'année à Blida est août, avec une température 33°C [18].

La saison fraîche dure 4,0 mois, Le mois le plus froid de l'année à Blida est janvier, avec une température 15°C .

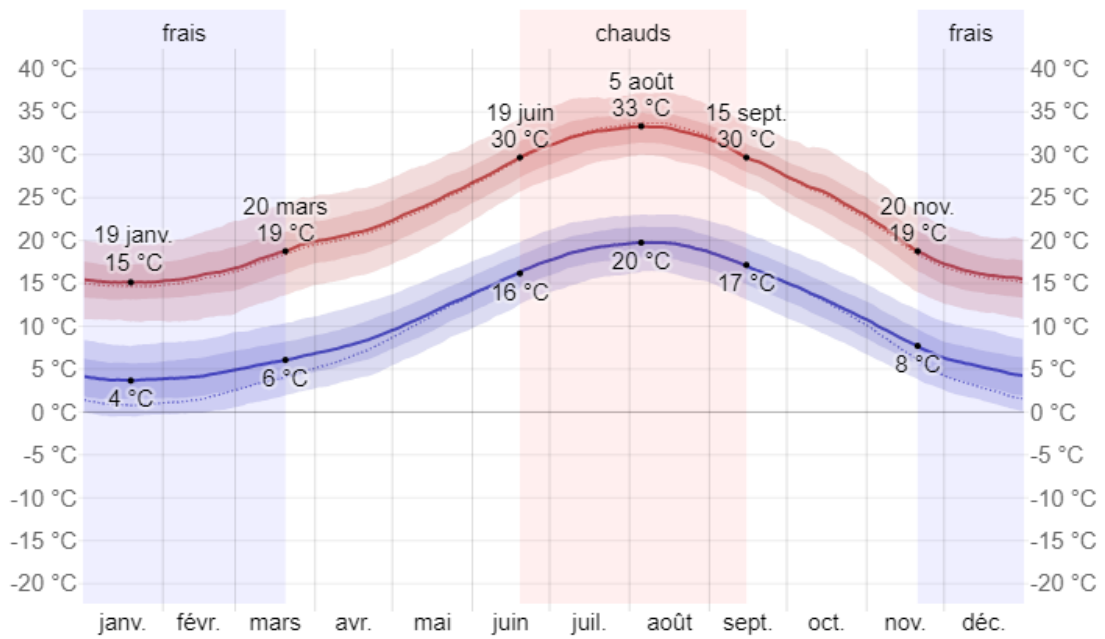


Figure (III.2) : Température moyenne maximale et minimale à Blida.

• **Humidité relative :**

L'humidité relative la plus basse de l'année est en juillet (57 %). Le mois où le taux d'humidité est le plus élevé est janvier (78 %).

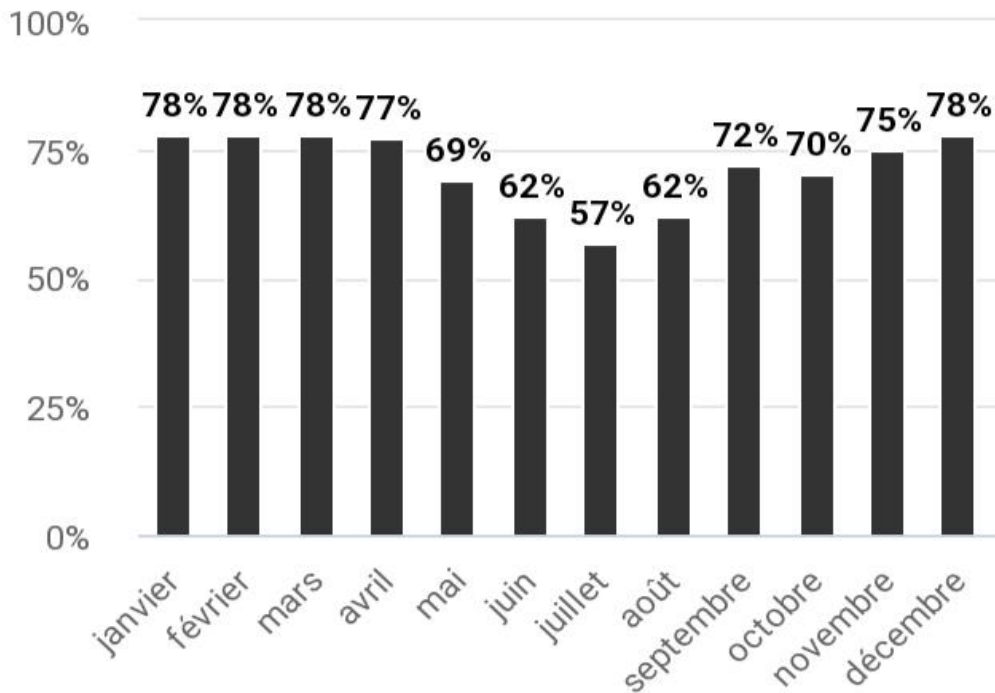


Figure (III.3) : humidité relative moyenne à Blida.

III.2 Prototype de séchoir solaire indirect actif :

L'objectif de ce présent travail est la conception et la réalisation d'un séchoir solaire indirect à vocation agricole, destiné au séchage des fruits et légumes, qui a été conçu et fabriqué dans l'atelier de soudage du département de mécanique de l'université de Blida 1 sur une durée étalée de mars à mai 2023. Le séchoir est constitué d'une boîte parallélépipédique de 0,21 m³ de volume. Il est alimenté en air chaud par un capteur solaire plan à air, incliné d'un angle égal à la latitude du site (Blida) 36°.



Figure (III.4) : conception un Séchoir solaire indirect forcé.

III.3 Description du système

Le prototype réalisé est schématisé en figure (3.5). C'est un séchoir solaire indirect fonctionnant à convection forcée et naturelle (par thermosiphon), il est constitué de deux unités : un capteur solaire plan à air et un caisson de dessiccation (volume de séchage).

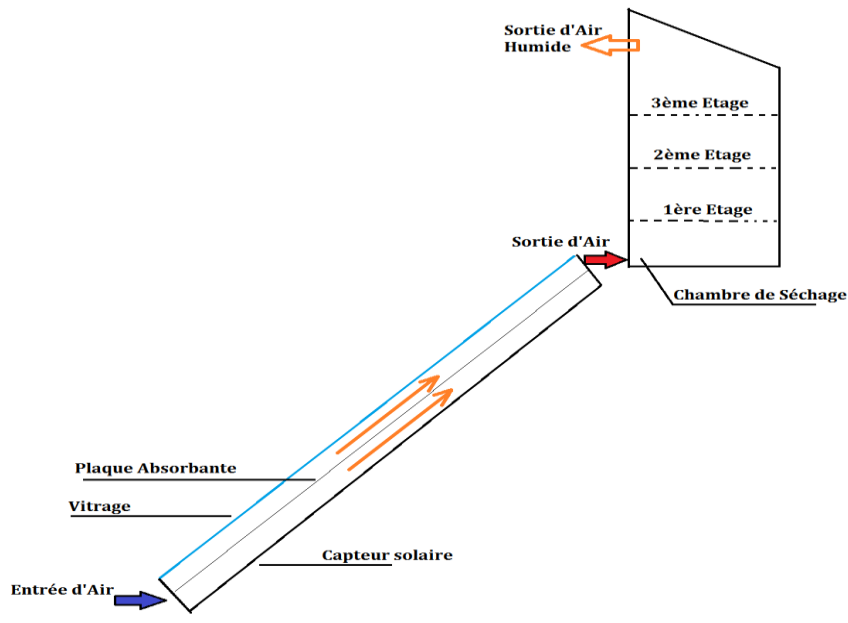


Figure (III.5) : Diagramme schématisique du séchoir indirect actif

III.3.1 Le capteur solaire :

C'est un capteur solaire plan à air à double circulation et à simple vitrage dont la configuration est parallélépipédique (2 m x 1 m) transformant ainsi le rayonnement solaire en énergie thermique transportée par l'air. Il est constitué d'un absorbeur en tôle galvanisée de 1 mm d'épaisseur peinte en noire mate. Il est recouvert aussi d'un vitrage de 5mm d'épaisseur. Les côtés latéraux et les parties inférieures sont isolés thermiquement avec 4 cm de polystyrène. L'air y circule entre les deux niveaux de la plaque absorbante, au-dessous comme au-dessus.

Pour effectuer les tests sur ce système, un support d'une inclinaison de 36° (La latitude du site de Blida) a été réalisé afin de sup

III .3.1.1 Conception du capteur solaire à air :

Avant de débiter la réalisation expérimentale du prototype de capteur solaire plan à air, une conception a été réalisée avec l'outil SolidWorks afin de remédier aux différents challenges ainsi de suivre une stratégie quasi-parfaite pour la réalisation du capteur.

Cette partie nous a permis de corriger la majorité des défauts avant de les rencontrer en vrai pendant la réalisation. Un schéma éclaté du capteur est présenté en figure [3.6]

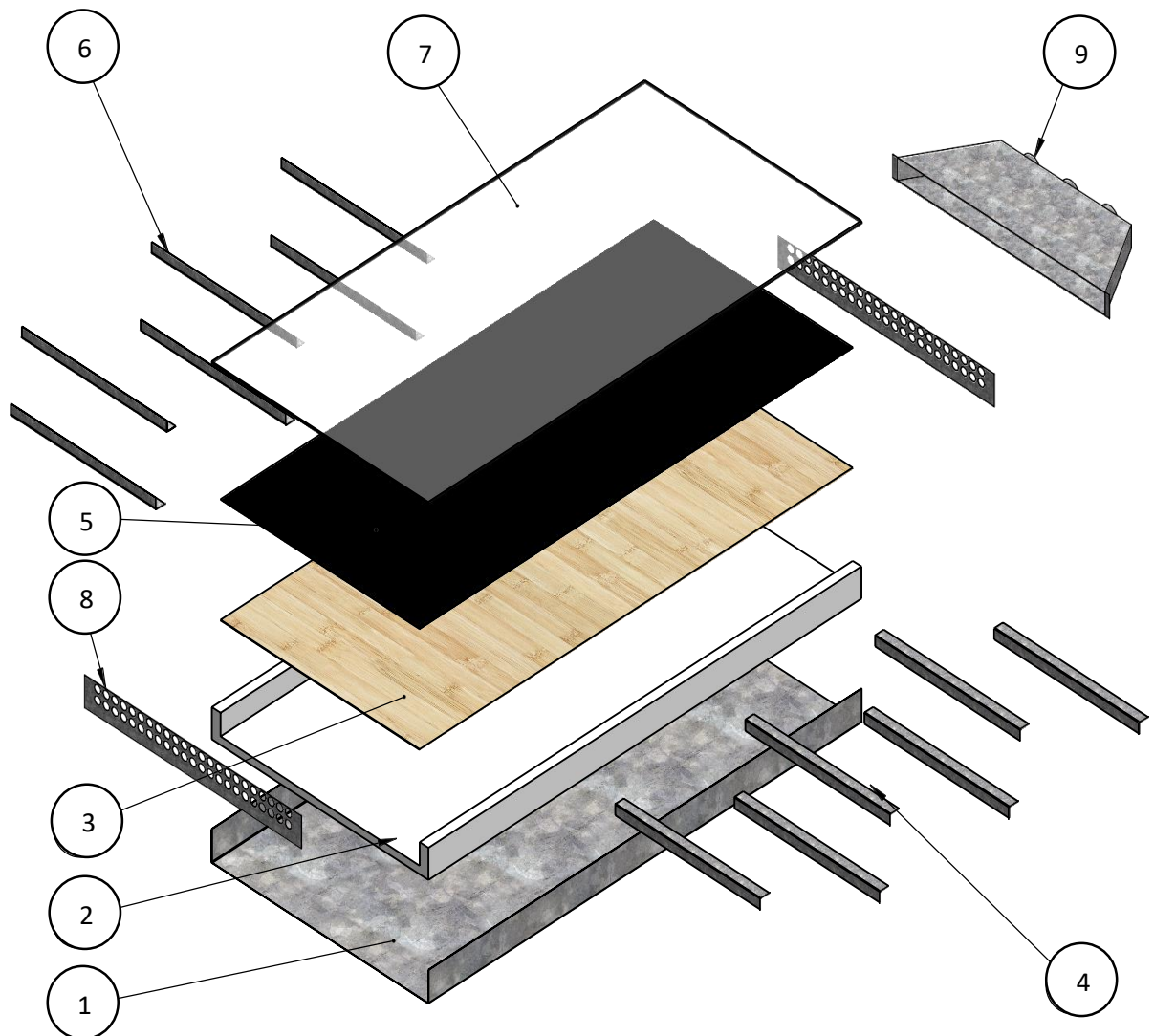


Figure (III.6) : vue éclatée de capteur solaire à air.

N°	Nom	Quantité	N°	Nom	Quantité
1	Plaquette	01	6	Obstacle_EXT	06
2	Polysterene	01	7	Plaque de verre	01
3	Contre_plaqué	01	8	Entre-sortie	02
4	Obstacle_INT	06	9	Collecteur de sortie	01
5	Absorbeur	01			

Tableau [3.1] : Légende des composants de la figure (III.6).

III.3.1.2 Etapes de fabrication du capteur à air :

Réalisation du boîtier extérieur :

Le boîtier a pour rôle d'assembler les différents composants du capteur ainsi que de contenir la couche d'isolant qui permet de limiter les pertes thermiques vers l'extérieur, pour le réaliser, les étapes suivantes ont été suivies :

- ✓ Préparation des feuilles galvanisées de 1 mm d'épaisseur et de dimensions 2x1m
- ✓ Réalisation de 2 calandres latérales (en longueur) de 2x0.115 m
- ✓ Pliage et découpage des différentes parties citées.



Trois calandres latérales (sur la largeur du capteur) ont été fabriquées afin de maintenir la structure du capteur. Des orifices de 30 mm de diamètre ont été réalisés sur ces calandres afin de permettre le passage de l'air chauffé de la partie inférieure jusqu'à la partie supérieure du capteur.





Le boîtier sera ensuite assemblé par procédé de soudage par point ainsi par rivetage (dans les parties étroites).



Figure (III.7) : un boîtier extérieur d'un capteur à air.

Isolation thermique du capteur :

L'application d'une isolation thermique aux différents côtés du capteur a pour objectif de limiter les déperditions thermiques dues au chauffage du capteur ainsi préserver cette énergie à l'intérieur du capteur et la transmettre ensuite au fluide caloporteur (l'Air).

Dans notre application, l'isolant choisi (selon sa disponibilité sur le marché) est le polystyrène qui est caractérisé par une forte capacité d'isolation et à moindre prix.

- ✓ Une plaque d'isolant de 2m² de surface et de 0.03 m d'épaisseur a été implantée en surface inférieure du capteur.
- ✓ La même matière d'isolation est fixée aux cotés latérales du capteur.
- ✓ Une plaque en bois dotée d'un film d'aluminium réfléchissant est implantée au-dessus de l'isolant afin d'éviter le contact direct plaque absorbante-isolant et de permettre de réfléchir le maximum de rayons infrarouge vers la surface inférieure de l'absorbeur.





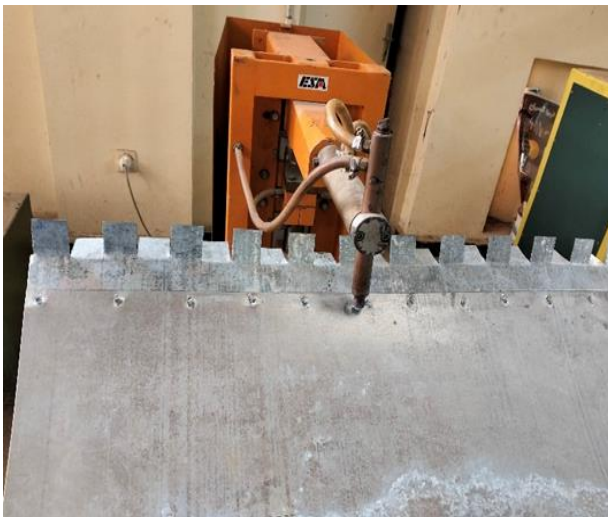
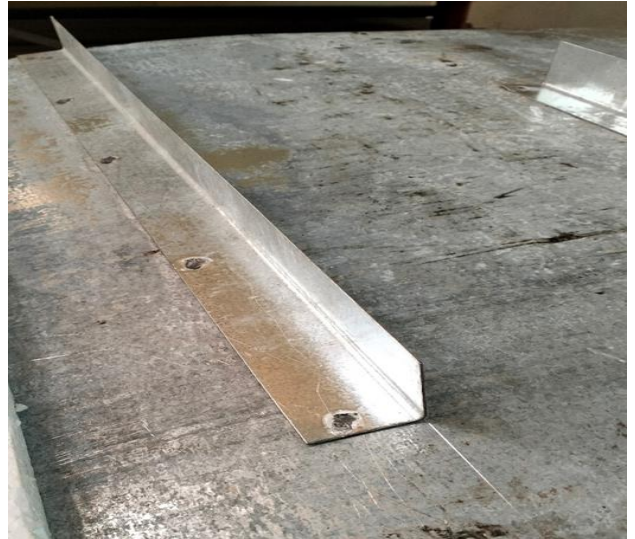
Figure (III.8) : un boîtier extérieur isolée

Réalisation de l'absorbeur :

L'absorbeur dans notre système est représenté par la plaque en galvanisé peinte en **noir mat** pour permettre la conversion des rayons solaires visibles en rayons Infrarouges. La matière constituant la plaque absorbante doit être caractérisé par une bonne conductivité thermique tout en respectant la limite d'investissement, pour notre cas, le matériau disponible a ux atelier était l'acier galvanisé caractérisé par une conductivité thermique de 50 W/mK.

Des chicane croisés en tôle galvanisé ont été soudés sur les deux faces de la plaque absorbante pour but de ralentir l'écoulement de l'air en passant par le capteur ainsi de maximiser les échanges thermiques entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur.

- ✓ Une plaque absorbante de dimension de 2x92 m.
- ✓ 12 obstacles de dimensions de 0.04x0.67m
- ✓ Assemblage des obstacles par soudage par point.



Collecteur de sortie :

Un collecteur a été réalisé afin de permettre la collecte de l'air chaud sortant de la partie supérieure du capteur, ce collecteur diffuse l'air chaud sur trois sorties, ces dernières se terminent par trois extracteurs alimentés en 12V DC (extraction forcée).



Le vitrage :

Ou couverture transparente, c'est l'élément créateur de l'effet de serre à l'intérieur du capteur en laissant traverser les rayons solaires de nature Visible et emprisonnant les Infrarouges, il respecte les caractéristiques suivantes :

- ✓ Surface totale de 2 m² (2x1m).
- ✓ Epaisseur de 5mm.
- ✓ Nature : Ordinaire.

Il est fortement recommandé d'utiliser du verre trempé doté de certaines caractéristiques comme une bonne transmittance aux rayons solaire, une qualité d'élasticité plus développée ainsi qu'une réflectivité réduite, malheureusement, dans notre cas, ces qualités sont difficile à trouver et coute beaucoup trop cher, dans notre prototype du verre ordinaire a été utilisé.



Figure (III.9) : capteur solaire à air

III.3.2 La caisse de dessiccation (Volume de séchage) :

Ou chambre de séchage, c'est le volume contenant les produits à sécher, dans notre projet la chambre est fabriquée à base de contre-plaqué de 3 mm d'épaisseur, le volume global de la chambre est calculé à 0.21 m³, le volume contient :

- ✓ Trois extracteurs de marque (EBM-PAPST 8312L, P= 1W) de 80mm de diamètre, (de vitesse 2000 tours/min, débit volumique max 0,00896 m³/s). Les extracteurs sont fixés à la base du caisson pour extraire l'air chaud du capteur et le distribuer dans la chambre.
- ✓ Trois claies (étages) en grillage galvanisé, chacune de surface de 0,3m² avec possibilité de contenance du caisson jusqu'à quatre claies ; ces dernières sont distantes les unes des autres de 0,12m. La masse de produit à sécher contenue sur chaque claie est dans notre cas égal à 2 kg, La capacité de notre prototype peut aller jusqu'à 12kg de produit à sécher.

III.3.2.1 Conception la chambre de séchage :

Le caisson de dessiccation est une unité de longueur (0.60m), de largeur (0.50m) et de Hauteur (0.80m). Les parois extérieures sont en bois.

Plan étalé de la chambre de séchage réalisée est démontré en figure [3.10].

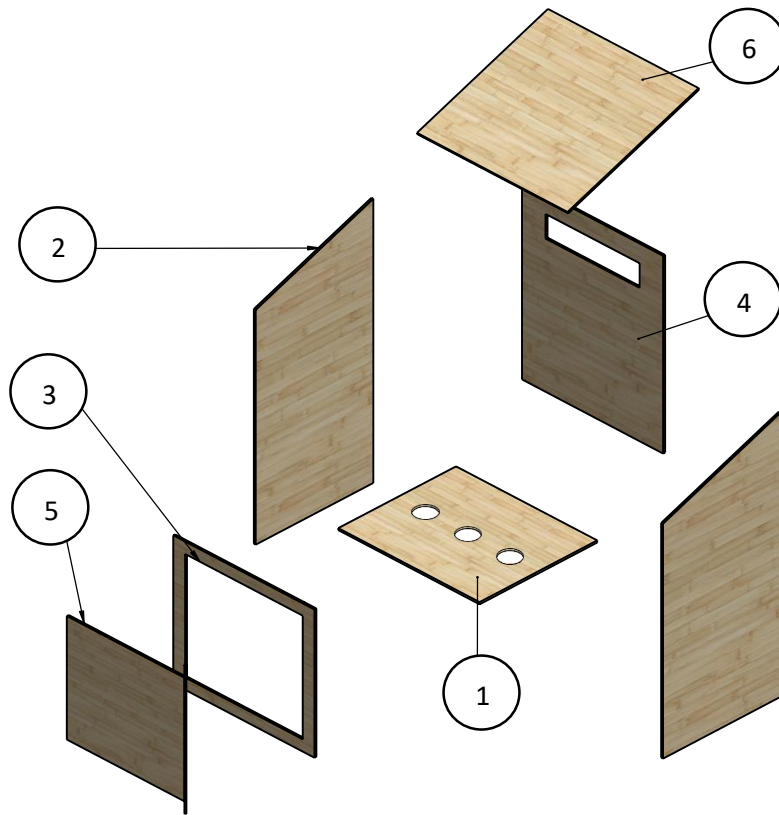


Figure (III.10): vue éclatée de la chambre de séchage.

N°	Nom	Quantité
1	Base	01
2	Laterale	02
3	Avant	01
4	Cadre arriere	01
5	Porte	01
6	Haut	01

Tableau [3.2] : Légende des composants de la figure [3.10]

III.3.2.2 Etapes de fabrication de la cambre :





Figure (III.11) : la chambre de séchage :

III.4 Mesure des températures :

Pour l'expérimentation de notre système, plusieurs thermocouples de type K ont été implantés sur l'ensemble du capteur-volume de séchage, la disposition des thermocouples est démontrées en figure [3.12].

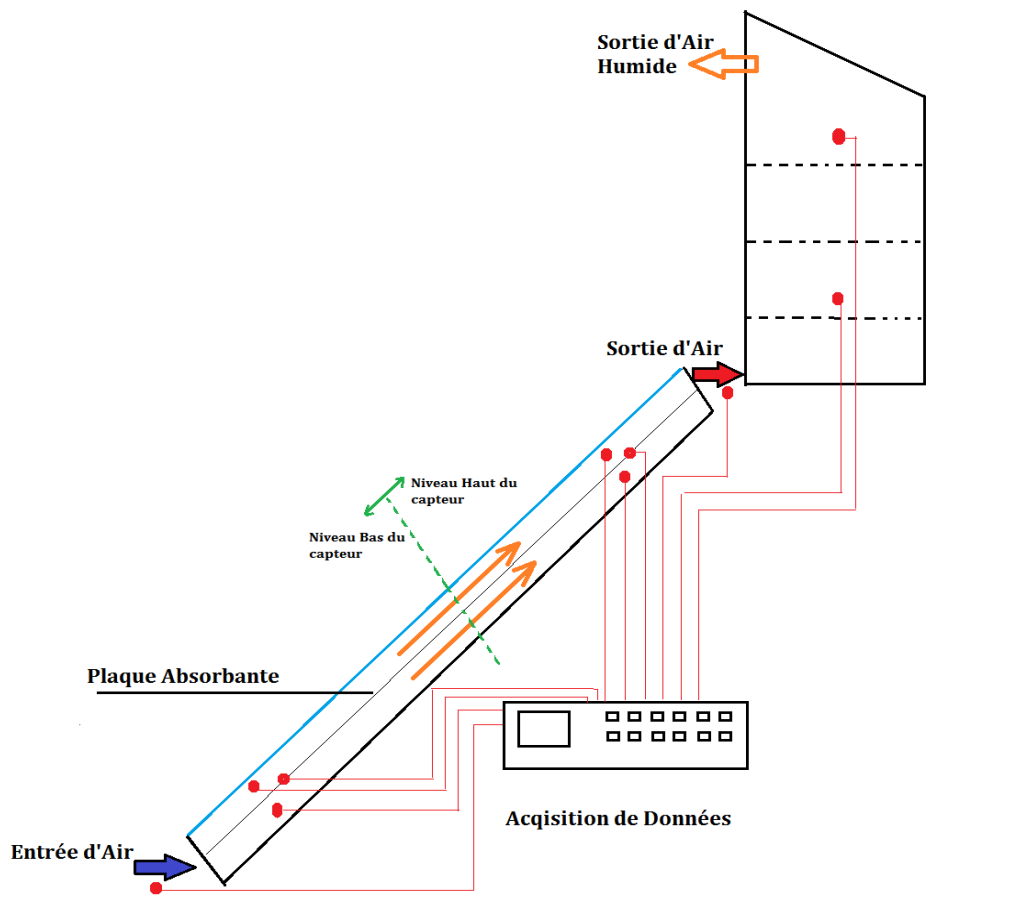


Figure (III.12) : Disposition des Thermocouples dans le Système.



III.5 Fonctionnement du système :

L'air rentre dans le capteur du côté inférieur ou il subit un chauffage le long de son trajet vers la sortie située en haut de ce dernier, la circulation de l'air est effectuée soit naturellement par thermosiphon due à la réduction de sa masse volumique causée par le chauffage, soit par aspiration forcée créée par les trois extracteurs situées dans la partie supérieure à l'entrée de la chambre de séchage.

Il est à préciser que le rôle de la plaque absorbante, peinte en noir mat, est d'absorber la chaleur, après chauffage, descend transmise rayons IR. Ces derniers seront emprisonnés entre la vitre et la plaque absorbante, ceci est l'effet de serre.

Les obstacles fixés sur les deux surfaces de la plaque absorbante ont été proposés dans ce prototype afin de freiner l'air en lui permettant de s'échauffer davantage.

L'air chaud à la sortie du capteur (partie supérieure) est ensuite acheminé par un collecteur pour être diffusé de la partie inférieure vers la partie supérieure de la chambre de séchage en passant par les produits à sécher.





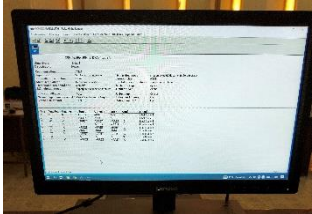


Figure (III.13) : Séchoir solaire indirect actif ou forcé.

CHAPITRE IV

Résultats et Interprétation

IV.1 APPAREILLAGE :

Appareil	Modèle	Information	Figure
Thermocouples	Type K (Chromel-Alumel) (incertitude : $\pm 2\%$)	Les mesures sont prises dans plusieurs endroits : <ul style="list-style-type: none"> - Entrée/sortie du capteur. - Plaque absorbante - Entrée/ sortie du caisson de dessiccation. 	
Caisson	FLUKE HYDRA Série 2	Unité d'acquisition de données de mesure de températures ainsi que le rayonnement solaire global (via les 20 entrées).	
Pyranomètre	CM6B	Appareil robuste et facile à utiliser pour mesurer l'intensité du rayonnement global reçu sur le plan du capteur par unité de surface W/m^2	
Extracteur	EBM-PAPST8312L, P= 1W	Fixé à la base du caisson pour distribuer l'air asséchant sur le produit, de débit volumique max 0,00896 m^3/s)	
Ordinateur	Ordinateur d'une interface informatique RS-232	Il permet une installation et reconfiguration rapide et pratique. Toute combinaison de mesure de température et rayonnement solaire sont enregistrées automatiquement.	


Balance électrique	CAS	Balance pour pesage du produit.	
---------------------------	-----	---------------------------------	---

Tableau [IV.1] : APPAREILLAGES DE MESURES

IV.2 Protocole expérimentale :

Le séchoir solaire réalisé a été testé en choisissant quelques produits alimentaires à faire sécher, parmi ces produits les tomates, les oignons, les pêches et les abricots.

La tomate a été achetée fraîche du marché local et choisie d'une façon homogène pièce par pièce en utilisant trois critères qui sont la dimension (taille moyenne), le degré de maturation (ni crue ni trop mur), et la morphologie externe (surface saine sans fissure). Une fois lavée manuellement avec de l'eau fraîche pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations ; elle est découpée en rondelles de 1 cm d'épaisseur puis étaler sur les claies de la chambre de séchage (2000g pour chaque claie).

La perte de poids du produit au niveau de la claie est suivie du début de l'expérience jusqu'à la fin c'est à dire de 8h jusqu'à 17h pendant deux jours ; en pesant le produit à l'aide d'une balance électrique.

Le séchoir est installé une heure avant le début de l'expérience pour achever la phase transitoire. L'opération de séchage est considérée achevée lorsqu'on arrive à l'humidité relative d'équilibre du produit qui est dans notre cas de 11%) [19]. Les mesures de température sont relevées toutes les 10 minutes ; d'où on tracera le profil de température de séchage du produit en fonction du temps.

Les expériences de séchage ont été exécutées à 50 et 60°C avec des épaisseurs d'échantillons d'environ 1 cm pendant la période allant du 18 au 19 juin 2023.

IV.3 EXPERIMENTATIONS :

IV.3.1 Lieu de déroulement des tests :

Les tests sont déroulés au sein du département de mécanique de l'université de Blida 1. Le site est caractérisé par un climat méditerranéen et dont les coordonnées géographiques sont :

- ✓ La latitude= 36.501° N
- ✓ La longitude = 2.877 °E
- ✓ L'altitude de lieu =260 m par rapport au niveau de la mer.

IV.4.2 Période de tests :

Les journées suivantes ont été choisies pour effectuer nos tests sur le séchoir solaire :

- Le 05 juin 2023
- Le 12 juin 2023
- Le 14 juin 2023
- 18 et 19 juin 2023

Les conditions climatiques du site pour les journées choisies diffèrent et leur influence sur les performances du séchoir seront étudiés.

IV.4 RESULTATS ET INTERPRETATION :

IV.4.1 Distribution des températures le long de la plaque absorbante :

La journée du 05/06/2023 était une journée nuageuse avec pluie légère, température entre (16° et 22°), le passage d'air d'admission (coté inférieur du capteur) était dégagé pour les deux passes.

Le test effectué durant la journée du 05 juin 2023 porte sur le suivi de l'évolution de la température dans les deux niveaux (passes) d'écoulement d'air. Pour cela des thermocouples ont été placés sur toute la longueur, leur disposition peut être observée en figure (3.12).

Dans ce qui suit, l'évolution de l'éclairement solaire pour la journée choisie ainsi que l'évolution des températures d'air (en dessus et en dessous de la plaque absorbante) ainsi que celle de la plaque absorbante (côté haut et bas) seront présentés.

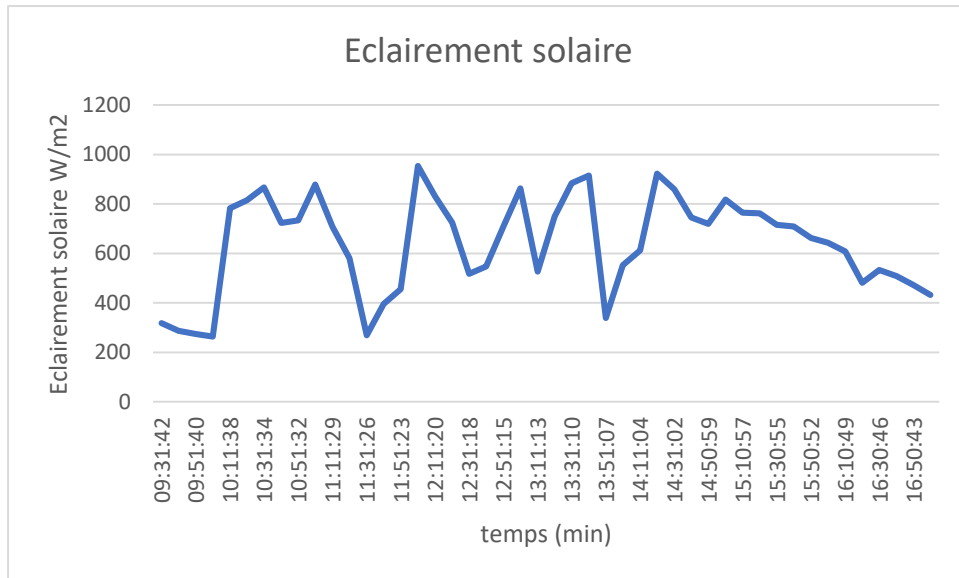


Figure (IV.1) : Variation de l'éclairement solaire journalier (05/06/2023)

La figure (IV.1) représente la variation de l'éclairement solaire pendant la journée du 05 Juin 2023, il est noté que l'éclairement solaire atteint son maximum aux alentours de midi avec un pic de 1046 W/m².

Les chutes d'éclairement remarqués sur la figure (IV.1) sont dues aux passages nuageux notés pendant la journée.

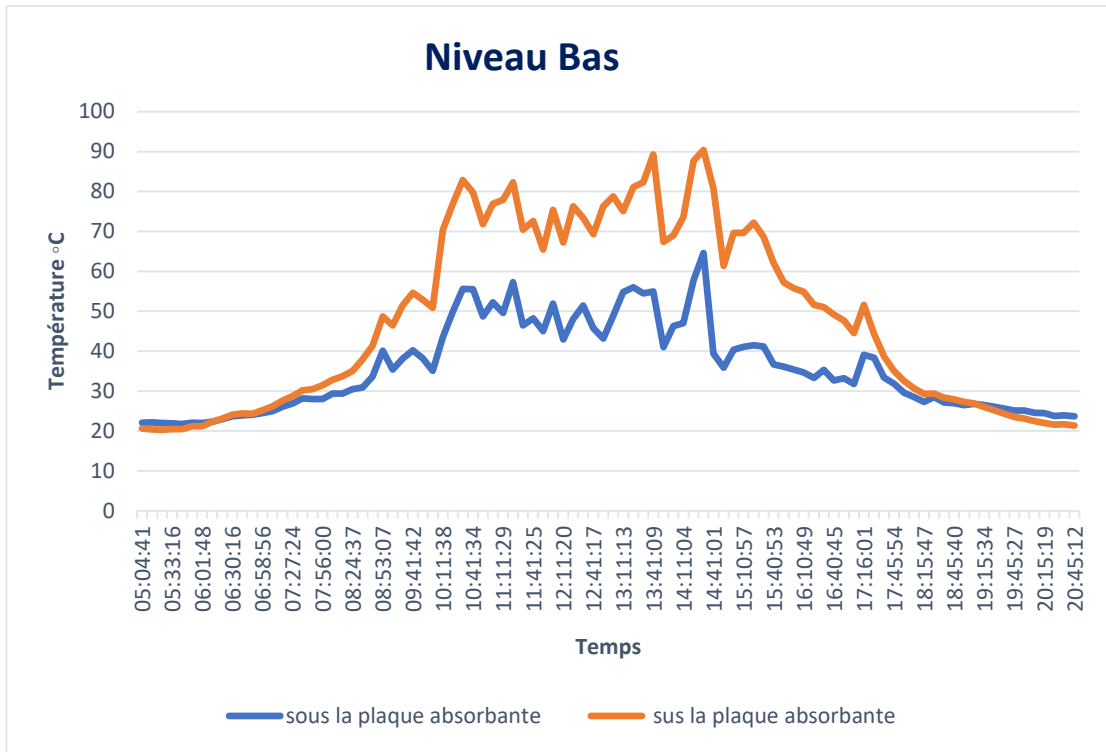


Figure (IV.2) : Variation de la température de l’air au niveau Bas du capteur (sur/sous la plaque absorbante).

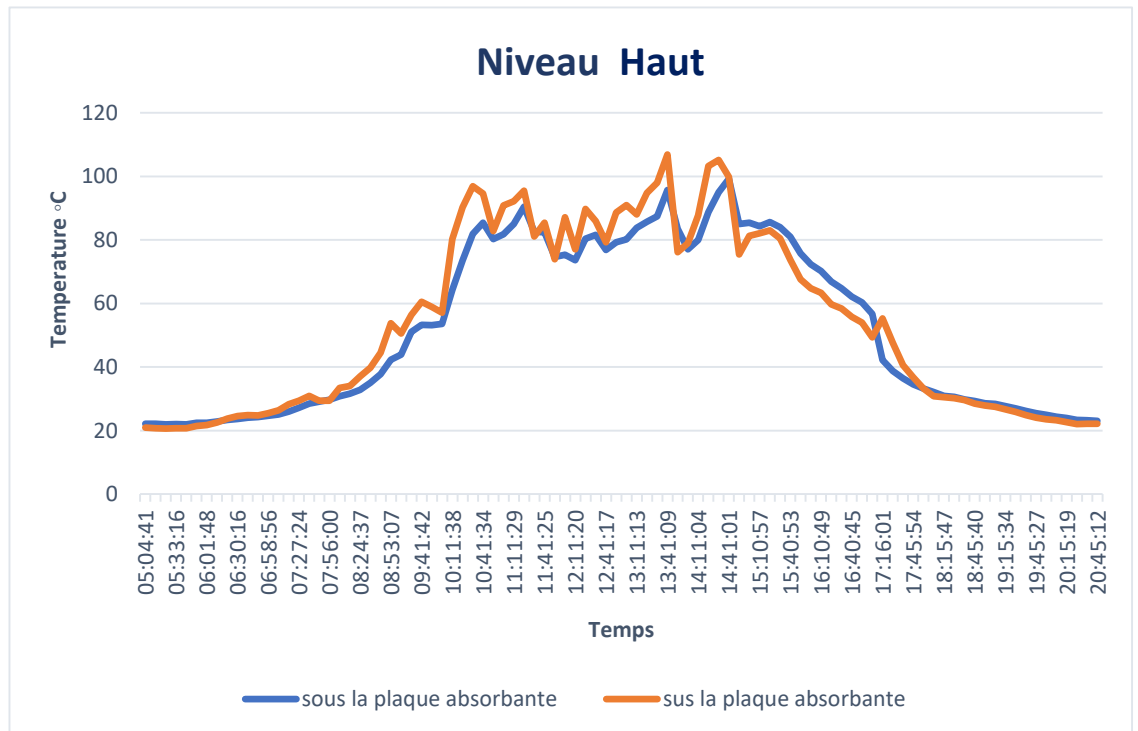


Figure (IV.3) : Variation de la température de l’air au niveau haut du capteur (sous/sur la plaque absorbante).

Les figures (IV.2) et (IV.3) présentent la variation de la température de l'air chauffant en partie inférieure et supérieure du capteur respectivement. Les températures de l'air au premier passage (entre l'absorbeur et la vitre) ainsi que ceux du deuxième passage (entre l'isolant inférieur et l'absorbeur) sont présentés dans les mêmes figures.

On note que les températures de l'air sont à leurs maximum aux alentours de midi atteignant les 90 °C, tandis qu'elles débutent leur chute à compter de 15h00, ceci correspond à la chute d'éclairement solaire (voir figure IV.1).

Aussi, on note que la température de l'air est beaucoup plus importante dans la partie supérieure du capteur (15°C d'écart), ceci est logique vu que l'air subit un chauffage permanent et arrive à la partie supérieure du capteur avec une température beaucoup plus importante que celle à l'entrée.

Il est remarqué également que la température du niveau supérieur est plus importante que celle du niveau inférieur, ceci est dû à l'exposition directe de la face supérieure aux éclairements solaires incidents sur la surface du capteur. Aussi, il est à noter que la sensibilité du niveau supérieur aux éclairements solaires est beaucoup plus importante que celle du niveau inférieur, on remarque dans cet axe que la moindre variation d'éclairement cause une importante baisse/augmentation de la température du niveau.

Aussi, et durant toute la journée, le niveau inférieur présente un certain amortissement de température, ceci est expliqué par l'inertie causée par le chauffage de la plaque absorbante. Cette inertie nous permettra de limiter l'énergie fournie au système (chauffage électrique).

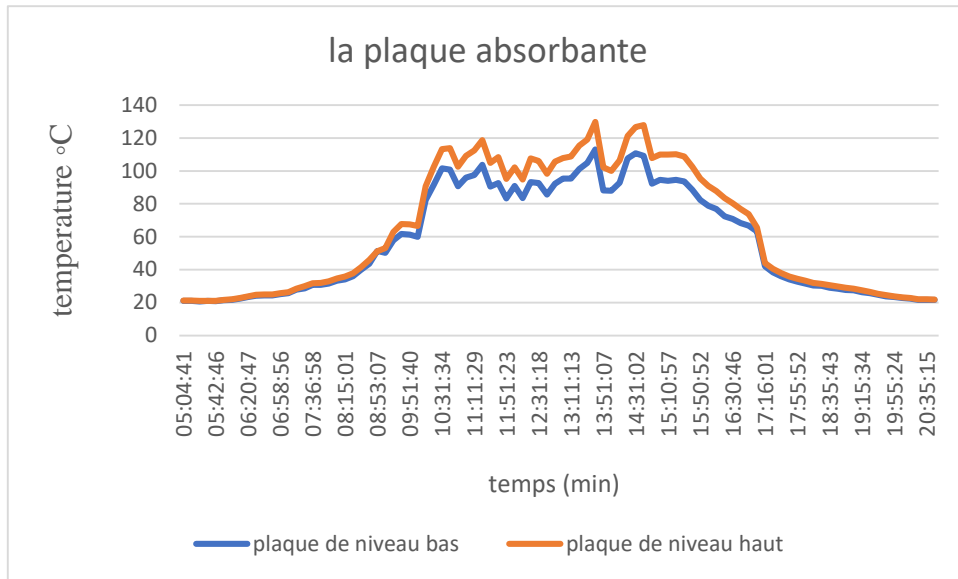


Figure (IV.4) : Variation de la température de la plaque absorbante en deux niveaux (Haut et Bas).

La figure (IV.4) représente l'évolution de la température de la plaque absorbante en deux niveaux du capteur, niveau bas et niveau haut. Il est clairement noté que le côté haut de la plaque chauffe plus que le côté bas, ce comportement est expliqué par la température de l'air du passage qui est plus importante en partie supérieure du capteur.

La température maximale de la plaque absorbante était de 129°C et est atteinte aux environs de 13h40min.

IV.4.2 Influence des ouvertures de passage sur les performances du capteur solaire :

a. Cas de deux passages :

La journée du 12/06/2023 était ensoleillée avec un court passage nuageux, caractérisé par une température ambiante entre 18 et 27° C, les deux passages d'air (entrée du capteur) étant ouverts pour permettre à la totalité d'air de s'introduire.

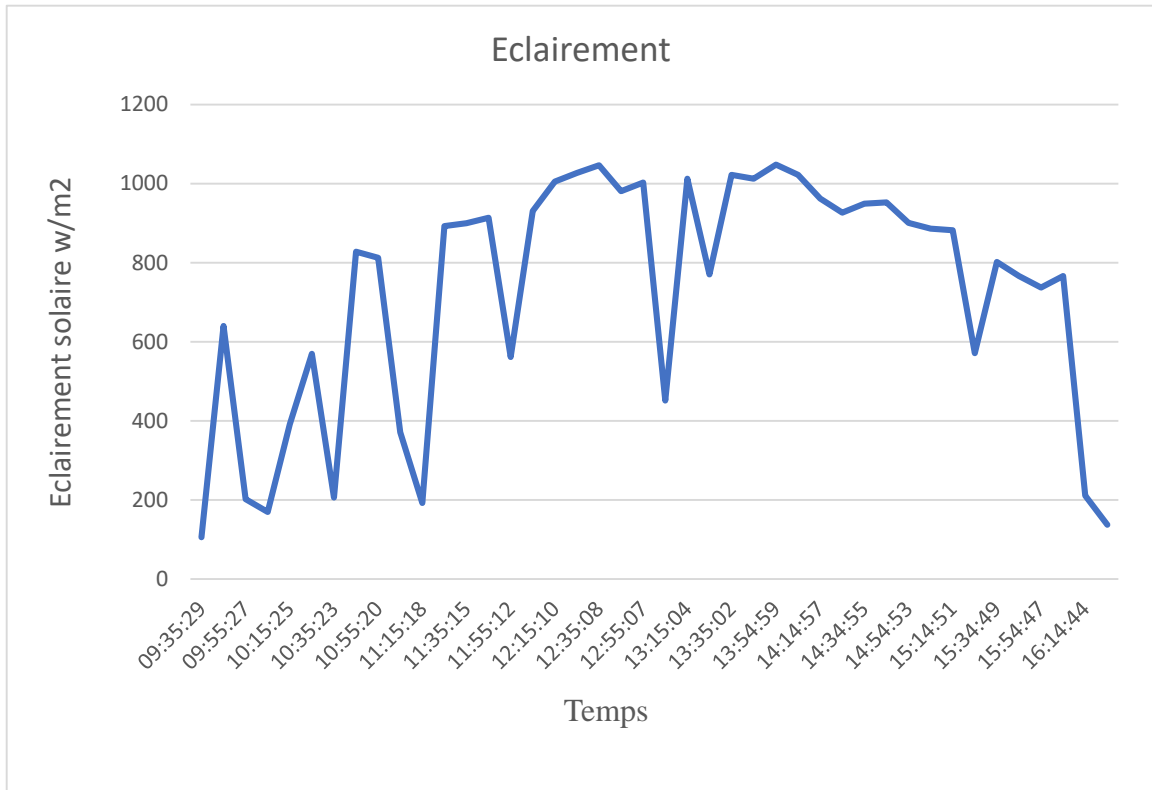


Figure (IV.5) : Variation de l'éclairement solaire journalier

L'évolution de l'éclairement globale pour la journée considérée présente une forme en cloche, on constate que la courbe expérimentale présente une irrégularité dans sa progression journalière, ceci est dû aux passages nuageux qui ont pu interrompre le déroulement des expériences. Le maximum d'éclairement solaire enregistré pour cette journée était de 1048 W/m^2 et ce aux environs de midi.

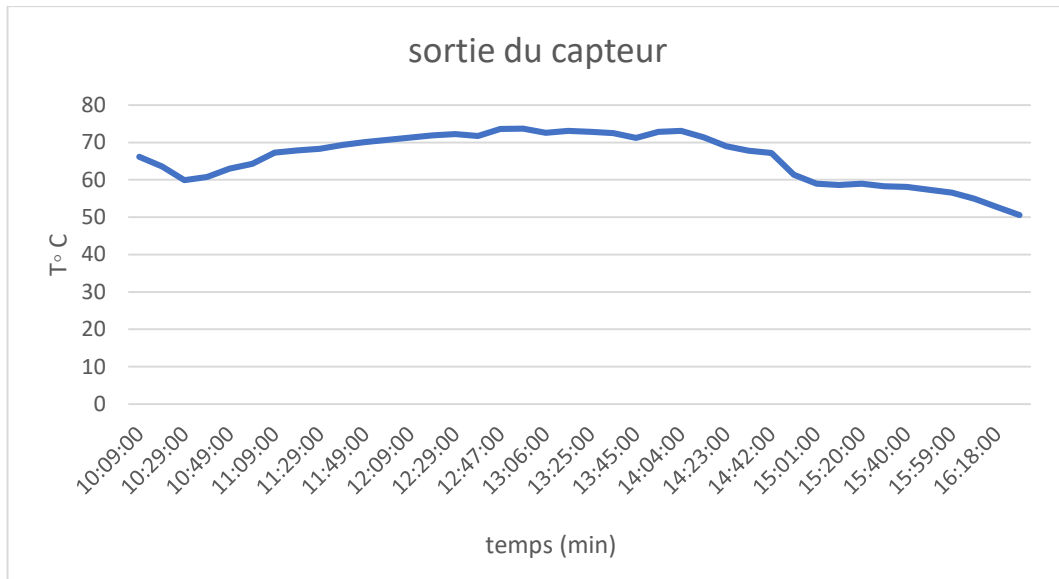


Figure (IV.6) : Variation de la température de l'air à la sortie du capteur.

De la figure (IV.6) on remarque que l'air à la sortie du capteur est déjà à une température de 63°C, ceci est expliqué par le fait que l'acquisition des données a connu un retard pour cette journée et est débuté vers 10h09min du matin.

La variation de la température de l'air à la sortie correspond à l'intensité de l'éclairement solaire incident sur le capteur et atteint son maximum de 73°C aux environs de 14h00.

b. Cas d'un seul passage :

La journée du 14/06/2023 a été choisie pour ces tests, cette journée était caractérisée par un ciel clair et ensoleillé, la température ambiante variée entre 19 et 29°C, Les trous inférieurs d'un seul niveau du capteur cotée supérieure de la plaque absorbante d'écoulement d'air étaient ouvertes.

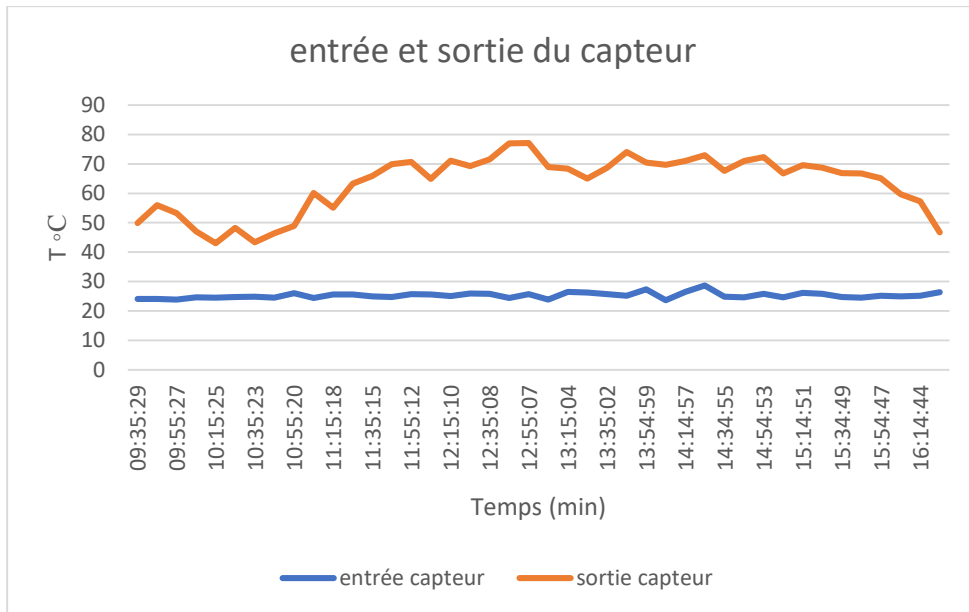


Figure (IV.7) : Variation de la température de l'air à la sortie du capteur.

La figure (IV.7) nous décrit la variation de la température de l'air à la sortie en fonction du temps pour la journée du 14 Juin, la température maximale enregistrée était de 77°C en voisinage de 12h55min.

Comparant à la température d'air maximale atteinte dans le premier cas (deux passages actifs), la fermeture d'un passage favorise l'augmentation de la température à la sortie du capteur, cela peut se traduire par la quantité d'air à chauffée qui est réduite dans le cas d'un seul passage.

Il existe un inconvénient du deuxième cas (un seul passage actif) c'est la perte d'un certain volume d'air (débit), donc une énergie thermique réduite à la sortie du capteur.

IV.4.3 Séchage des Aliments :

a. Les Tomates les Abricots :

Le 18 et 19 Juin 2023, il a été procédé à l'étalage des tomates sur les claies pour le début de la procédure de séchage. Les deux journées était ensoleillée, la température ambiante moyenne était de l'ordre de 26°C et la vitesse du vent était au environ de 2.5m/s (Météo).

Les figures (IV.8) et (IV.9) nous présentent la variation des températures des deux niveaux du volume de séchage (niveau inférieur et supérieur, voir figure (IV.8) et (IV.9) pour les deux journées d'étude, à savoir, le 18 et le 19 Juin 2023, respectivement.

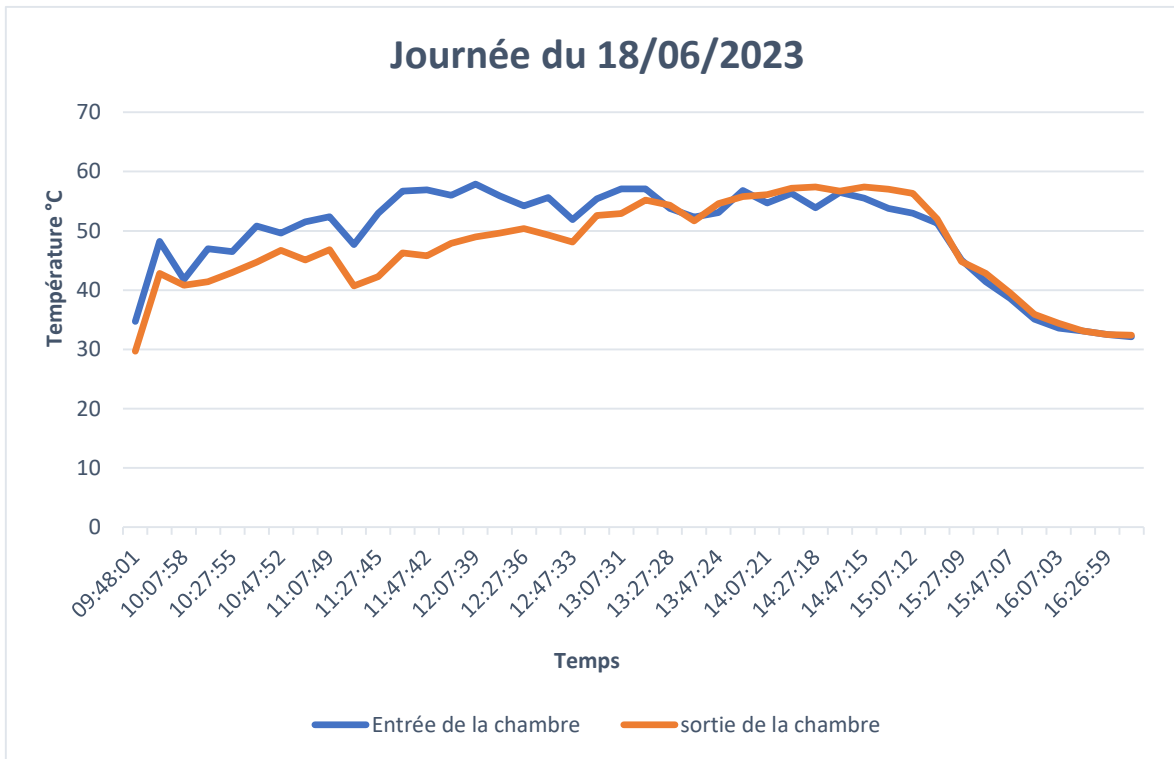


Figure (IV.8) : Variation de la température du niveau inférieur et supérieur de la chambre.

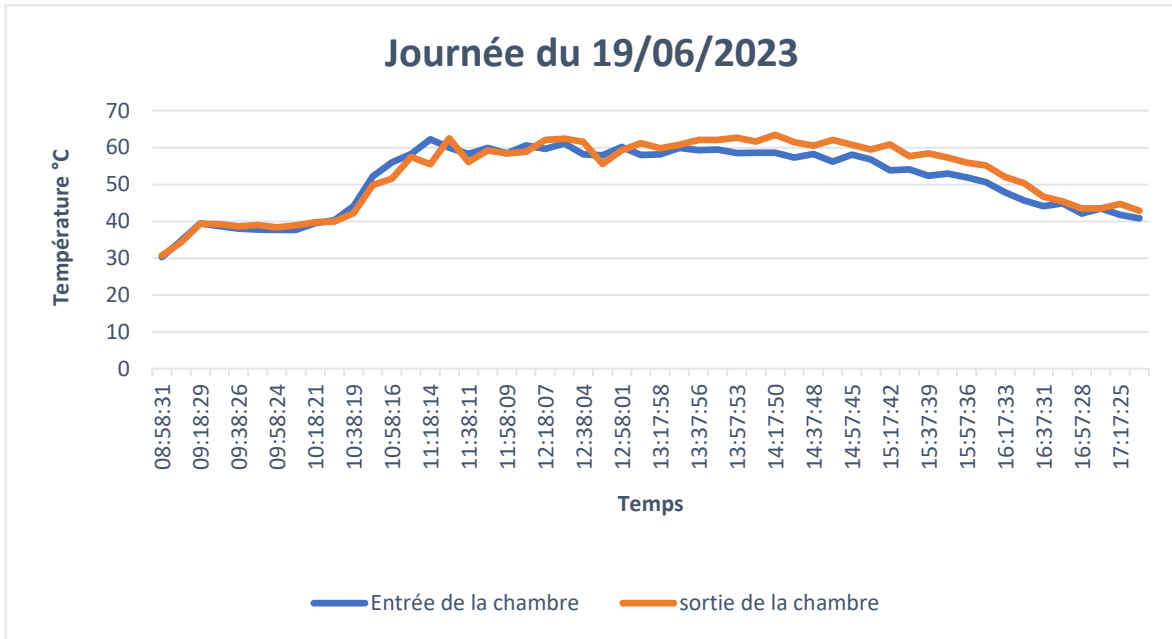


Figure (IV.9) : Variation de la température du niveau inférieur et supérieur de la chambre

On peut noter des deux figures (IV.8) et (IV.9) que la température du niveau inférieur de la chambre de séchage est plus importante que celle du niveau supérieur du au échanges de chaleur réalisés lors du passage de l'air chaud par les aliments à sécher, ces derniers absorbe une certaine quantité de chaleur pour réaliser l'évaporation de l'eau contenu à l'intérieur.

Un autre comportement inverse est noté en figure (IV.9) où la température de l'air à la sortie est légèrement supérieure à celle de l'entrée, ce comportement peut être traduit par un passage nuageux qui a causé un refroidissement temporaire de l'air à l'entrée de la chambre de séchage, ou bien une diminution de l'énergie solaire incidente causons un refroidissement progressif de la plaque absorbante, donc une diminution de la température de sortie.



Figure (IV.10) : les tomates fraîches

Figure (IV.11) : les tomates séchées



Figure (IV.12) : les abricots frais

Figure (IV.13) : les abricot sèche

b. Les Oignons et les pêches

Dans cette partie, aucune mesure de température n'a été prise. Des rondelles d'oignon et de pêches ont été préparées pour subir un séchage à l'intérieur du volume de séchage, les résultats sont aboutis au bout de 4 jours, les figures (4.14) et (4.13) nous montrent l'évolution du séchage de ces deux aliments pendant le temps.

Il est conseillé qu'à la fin de l'expérience le produit doit être stocké dans des boîtes en plastique hermétiques et placé dans un réfrigérateur pour éviter toute réhydratation pendant la nuit et gardera ses états pour la continuité de l'opération le lendemain.

À la fin de l'opération de séchage, les échantillons secs sont laissés se refroidir à la température ambiante puis scellés dans des boîtes en plastique.



Figure (4.14) : Les oignons frais



figure (4.15) : les oignons séchés



Figure (4.16) : Les pêches frais



Figure (4.17) : les pêches séchées

IV.5 Cout de revient :

Dans notre fabrication du système, on a choisi les matériaux selon l'échelle du marché algérienne.

Matériaux	Quantité	Prix unitaire (Da)
Tôle galvanisée d'épaisseur 1mm	4 plaque	4500
Polystyrène	1 plaque d'épaisseur 3cm 1 plaque d'épaisseur 4cm	350 450
Plaque en bois d'épaisseur 3mm	3 plaque	3500
Plaque en verre ordinaire	1 plaque d'épaisseur 5mm	3600
Cornière	2 tube	2000
Peinte noire mat	1 boite	450
Peinte noir simple	1 boite	350
Ruban adhésif d'aluminium(grande format)	1 ruban	3000
Les roues	4 roue	400
Pate à joint	1 tube	1000
Chatterton	1 ruban	200
Les extracteur (EBM PAPST P=1W)	3 extracteur	1300
Les rivet	1 boite	600
Les visses	1 boite	500
Close room	1 pièce	400
Filets galvanisée	3 mètre	450
Cout de séchoir	52000.00 da	

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, la réalisation et l'expérimentation d'un séchoir solaire pour le séchage agro-alimentaire sont des étapes cruciales pour promouvoir des pratiques durables de conservation des produits agricoles. Les séchoirs solaires offrent des avantages significatifs en termes d'économie d'énergie, de préservation de la qualité des produits et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils représentent une solution prometteuse pour relever les défis de la sécurité alimentaire, de la préservation des ressources naturelles et de la lutte contre le changement climatique.

Le travail présenté porte sur la conception et la réalisation d'un séchoir solaire pour le séchage des produits agro-alimentaires. Les résultats obtenus vont contribuer au développement du séchage à l'aide de systèmes de conversion solaires qui sont plus performant, plus économique et respectueux de l'environnement. Le séchoir réalisée est de conception simple et est fabriquée à partir de matériaux locaux. La technique utilisée n'est pas sophistiquée et est peu coûteuses.

Afin d'évaluer les performances du séchage, des tests expérimentaux ont été effectués et de mesures prélevées en fonction de divers paramètres tel que la température et l'éclairement.

Les résultats des tests ont montré que le paramètre dont l'influence est dominante est la température. La croissance de la température entraîne une augmentation de la vitesse de séchage. Il a été aussi constaté que lors des opérations de séchage effectuées sur les produits alimentaires (oignons, tomates et abricot), la vitesse de séchage du produit exposé sur les trois claies de séchoir diffère. En effet, le produit exposé sur la première claie sèche plus vite que ceux exposés sur les deux autres claies. Ceci s'explique par le fait que lors de sa circulation, l'air en montant, s'humidifie de plus en plus ce qui engendre la diminution de temps de séchage.

On remarque clairement dans le capteur que la température du niveau supérieur de l'absorbeur est plus important que celle du niveau inférieur, Aussi, il est à noter que la sensibilité du niveau supérieur aux éclairements solaires est beaucoup plus importante que celle du niveau inférieur, dans cet axe que la moindre variation d'éclairement cause une importante baisse/augmentation de la température du niveau. Aussi, et durant toute la journée, le niveau inférieur présente un certain amortissement de température, ceci est

Conclusion générale

expliqué par l'inertie causée par le chauffage de la plaque absorbante. Cette inertie nous permettra de limiter l'énergie fournie au système d'appoint (chauffage électrique).

Références bibliographiques

- [1] ([Lang, 2006] éditeur Kenneth Lang. Sun, Earth and Sky, 2nd, Revised Edition. Springer-Verlag New York, 2006.)
- [2] Ministère de l'énergie et des mines. www.mem.algeria.org
- [3] <https://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-vral/docs/pdf/etudes/mission-parlementaire-eds/01-partie1.pdf>
- [4] N.Nadir, Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla (2009)
- [5] Thirry Cabirol, Albert Pelissou, Daniel Roux. "Le Chauffage de l'eau solaire", VEdisud.cop,1980
- [6] André Joffre. "Energie solaire thermique dans le bâtiment chauffe-eau solaires ".revue techniques de l'ingénieur BE 9164
- [7] N, Bellel. Etude des transferts thermiques le long d'un tubecylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).
- [8] Garg, H. P. Solar Energy Fundamentals and Applications: First Revised Edition, New Delhi, and Tata McGraw-Hill. (2000 ,1997).
- [9] Aboltins, Aivars, et al. "Investigations of air solar collector efficiency." Proceedings of the 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development Engineering for Rural Development. Vol. 1. 2009.
- [10] AISSAOUI. W & SOUIADIA.H. " Etude expérimentale d'un capteur solaire plan à air" UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA (2019)
- [11] Saf. A & Reddam.S. Technologies de séchage.Etude de cas: séchage de deux matrices végétales par étuve (2018).
- [12] « Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires » Mémoire magistère ; Warda.Belachi université Kasdi Merbah Ouargla Algérie (2009)
- [13] A. Madhlope, S.A. Jones, and J.D. Kalenga Saka, 2001. A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration. Renewable Energy, 27, 27-3
- [14] M.A. Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya, 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. Renewable and Sustainable Energy Reviews 6,367-393.
- [15] Jean-jacques Bimbenet. 2002. Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod, Paris.
- [16] Melle DEBIANI Kahina, Dimensionnement et Réalisation d'une Serre Solaire Destinée pour le Séchage des Déchets Alimentaires, mémoire 2013.

Références bibliographiques

- [17] Slimane BOUGHALI « ETUDE ET OPTIMISATION DU SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES DANS LES ZONES ARIDES ET DESERTIQUES », thèse doctorat, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA, 2010.
- [18] HOUHOU HATEM « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certain produits agro-alimentaire », mémoire magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [19] O. V. Ekechukwn, B. Norton, 1999. Review of solar energy systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40, 615-655