

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT PHYSIQUE  
Ph /ENG /12/2022



DOMAINE : Sciences de la matière  
FILIERE : Physique  
OPTION : Physique Énergétique et  
Energie renouvelable

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par : Tebbane Ahmed

Laraba Said

Intitulé

**Conception et réalisation d'un séchoir solaire  
par un système aérovoltaique pour séchage des  
produits alimentaires**

Soutenu le 11 / 06 /2022 devant le jury composé de :

Bouras Abdelkarim

Université M. B. Msila

Président

Taloub Djedid

Université M. B. Msila

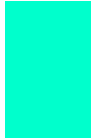
Rapporteur

Mahdi Khaled

Université M. B. Msila

Examineur

Année universitaire : 2021/2022



# Remerciements



Avant tous, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Ce travail a été réalisé sous la direction du Monsieur Taloub Djedid qui nous exprimons nos vifs remerciements pour avoir accepté, d'assurer la direction et l'encadrement de notre mémoire.

Nous remercions également Monsieur Bouras Abdelkarim, et Monsieur Mahdi Khaled qui nous ont faits l'honneur de participer au jury.

Nous tenons à exprimer tout notre gratitude à Monsieur Ali Djegham, pour le temps qu'il a consacré avec nous au montage de prototypes et de sa disponibilité appréciée.

Nous remercions tous ceux qui nous ont soutenu et aidé dans ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les enseignants de département de physique qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

En dernier lieu, nous remercions l'administration d'université Mohamed Boudiaf \_M'sila, qui à travers leur programme nous ont fourni des outils de qualité facilitant notre spécialisation.



---

## **Dédécace**

### **TEBBANE Ahmed**

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien, leurs prières tout au long de mes études.

A mes frères Younes et Aissa , et ma chère soeur , pour leurs encouragement permanents, et leur soutien moral.

A toute ma famille et mes chers amis.

Merci d'etre toujours la pour moi.

### **LARABA Saïd**

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,leur soutien, leurs prières tout au long de mes études.

A mes frères Issam et Saïf pour leurs encouragement permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille et mes chers amis.

Merci d'etre toujours la pour moi.

## Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés sur la conception et la fabrication d'un système aérovoltaique pour séchage des produits alimentaires et des plantes médicinales. Dans ces expériences, nous avons utilisé un séchoir solaire indirect, où dans ce dernier nous croyons la chaleur de la chambre de séchage par un panneau photovoltaïque hybride (thermoélectrique) atteint la température qu'il sorte du capteur hybride de 60.8-69.9 degrés Celsius combinai avec un effet de serre . L'objectif principal de ces expériences est d'utiliser l'énergie renouvelable gratuite (le soleil) pour étudier la cinétique de séchage et la teneur en eau. Les résultats obtenus dans cette étude étaient les suivants : pour sécher 150 gramme de la Menthe, la gamme de température désirée est de 41.1-49.9 °C durant 03 heures et pour 710 gramme de Tomate de 58.4-68.8 °C dans les circonstances 04 heures. Le but du procédé de séchage de ces produits est que l'utilisation large de ces produits et est séché, tout en préservant la valeur nutritionnelle du produit et de bonne qualité.

**Mots clés:** Capteur plan, énergie solaire, le panneau solaire PV, le panneau solaire PV/TH, cinétiques de séchage convectif, ensoleillement global, séchage des produits agroalimentaires.

## Abstract

In this memoir, we are interested in the design and manufacture of an aerovoltaic system for drying food products and medical plants. In these experiments we used an indirect solar dryer, where in the latter we believe the heat from the drying chamber by a hybrid photovoltaic (thermoelectric) panel reaches the temperature it comes out of the hybrid collector of 60.8-69.9 degrees Celsius combined with a greenhouse effect. The main objective of these experiments is to use free renewable energy (the sun) to study drying kinetics and water content. The results obtained in this study were as follows: to dry 150 grams of Mint, the desired temperature range is 41.1-49.9 °C for 3 hours and for 710 grams of Tomato 58.4-68.8 °C under 4 hour circumstances. . The purpose of the drying process of these products is that the wide use of these products and is dried, while preserving the nutritional value of the product and good quality.

**Key words:** Flat panel collector, solar energy, the solar panel PV, the solar panel PV/TH, convective drying kinetics, global radiation, drying of agrifood products.

## ملخص

في هذه الرسالة، كنا مهتمين بتصميم وتصنيع نظام هوائي لتجفيف المنتجات الغذائية والنباتات الطبية. في هذا الابتكار، استخدمنا مجففًا شمسيًا غير مباشر، حيث نعتقد في هذا الأخير أن الحرارة تنتقل إلى غرفة التجفيف بواسطة لوحة هجينة كهروضوئية (كهر وحرارية) تصل إلى درجة الحرارة التي تخرج من المجمع الهجين من 60.8 إلى 69.9 درجة مئوية جنبًا إلى جنب مع الاحتباس الحراري. الهدف الرئيسي من هذا الابتكار هو استخدام الطاقة المتجددة المجانية (الشمس) لدراسة حركية التجفيف والمحتوى المائي للمنتجات المراد تجفيفها. كانت النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة كما يلي: لتجفيف 150 جرام من النعناع، تتراوح درجة الحرارة المطلوبة من 41.1 إلى 49.9 درجة مئوية لمدة 3 ساعات و710 جرام من الطماطم من 58.4 إلى 68.8 درجة مئوية تحت ظروف 4 ساعات. والغرض من عملية تجفيف هذه المنتجات هو الاستخدام الواسع لهذه المنتجات وتجفيفها مع الحفاظ على القيمة الغذائية للمنتج وجودته الجيدة.

**الكلمات المفتاحية:** المجمع المسطح، الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية الكهروضوئية، الألواح الشمسية الكهروضوئية الهجين، حركيات التجفيف بالحمل الحراري، أشعة الشمس العالمية، تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية.

## Table des Matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Table des Matières.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Etude bibliographique (Gisement solaire) .....</b>	<b>4</b>
1.1. Introduction.....	4
1.2. Gisement solaire .....	5
1.2.1 Soleil .....	5
1.2.2. Caractéristiques du soleil .....	5
1.2.3. Mouvements du soleil .....	7
1.2.4. Le système terre-soleil .....	8
1.3. Energie solaire .....	9
1.3.1. Energie solaire Origine.....	9
1.3.2. Caractères particuliers.....	9
1.3.3. Captation.....	10
1.3.4 Constante solaire.....	10
1.3.5. Application de l'énergie solaire.....	11
1.3.5.1. Distillation.....	11
1.3.5.2. Froid et climatisation.....	13
1.3.5.3. Séchage solaire.....	14
1.4 Rayonnement solaire.....	14
1.4.1 Composante du rayonnement solaire.....	14
1.4.2. Rayonnement direct.....	15
1.4.3. Rayonnement diffus.....	15
1.4.4. Rayonnement réfléchi.....	15
1.4.5. Rayonnement global.....	15
1.4.5.6. Mesure du Rayonnement solaire sur terre.....	16
1.4. Gisement solaire en Algérie.....	17
1.5. Transfert de chaleur.....	19
1.6.1. Champ de température.....	19
1.6.2. Flux de chaleur.....	19
1.6.3. Les type de transfert de chaleur.....	20
1.6.3.1. Conduction.....	20
1.6.3.2. Convection.....	20
1.6.3.3. Rayonnement.....	22
1.7. Séchage des solides.....	22
1.7.2. Modes de séchage.....	22
1.7.2.1. Séchage par conduction.....	23
1.7.2.2. Séchage par convection.....	23
1.7.2.3. Séchage par rayonnement.....	23
1.7.3. Vitesse de séchage.....	23

1.7.4. Cinétique du séchage.....	23
Références.....	24
<b>Chapitre 2 Séchage et les Séchoirs solaires.....</b>	<b>27</b>
2.1. Introduction.....	27
2.2. Séchage.....	27
2.2.1. Définition .....	27
2.2.2. Historique .....	28
2.2.3. Intérêt du séchage .....	28
2.2.4. Principes de séchage .....	28
2.2.5. Différents méthodes du séchage .....	28
2.2.5.1. Séchage mécanique .....	28
2.2.5.2. Séchage chimique.....	29
2.2.5.3. Séchage thermique.....	29
2.2.5.4. Séchage par ébullition.....	29
2.2.5.5. Séchage par entrainement.....	30
2.3. Séchoirs solaires.....	30
2.3.1. Classification des systèmes du séchage solaire.....	30
2.3.2. Types de séchoirs solaires.....	31
2.3.2.1. Les séchoirs solaires directs.....	31
2.3.2.1.1 Principe de fonctionnement.....	31
2.3.2.1.2 Avantages et les inconvénients.....	32
2.3.2.2. Séchoirs naturels (traditionnel) .....	32
2.3.2.3. Séchoirs solaires indirects.....	33
2.3.2.3.1 Principe de fonctionnement.....	33
2.3.2.3.2 Avantages et les inconvénients.....	34
2.3.2.4. Différentes types de séchoir solaire. ....	34
2.3.2.5. Séchoirs mixtes.....	34
2.3.2.6. Séchoirs hybrides.....	35
2.3.2.6.1 Avantages et les inconvénients.....	35
2.4 Capteurs Solaire.....	35
2.4.1. Différents types de PVT.....	38
2.4.1.1. Panneaux solaires hybrides PV/TH à eau.....	38
2.4.1.2. Panneaux solaires hybrides PV/T à air.....	39
2.4.1.3. Capteurs PV/T de concentration.....	40
2.5. Travaux antérieurs concernant le séchage et les séchoirs solaires.....	40
Reference.....	42
<b>Chapitre 3 Description du séchoir solaire et paramètres de mesures.....</b>	<b>45</b>
3.1. Introduction.....	45
3.2 Site de l'installation.....	46
3.3 Instruments et paramètres mesures.....	51
3.3.1 Introduction.....	51
Références .....	56

---

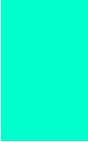
<b>Chapitre 4 Préparation et séchage des produits alimentaires-Résultats et discussions-...</b>	<b>57</b>
4.1. Introduction.....	57
4.2. Séchage de la menthe.....	57
4.2.1. Généralité sur la menthe.....	57
4.2.2. Utilisation de la menthes.....	58
4.2.3. Composition chimique de la menthe.....	58
4.2.4. Préparation du produit.....	59
4.2.5. Protocole de séchage (produit à sécher).....	59
4.3. Séchage de la tomate.....	61
4.3.1. Généralité sur la tomate.....	61
4.3.2. Utilisation de la tomate.....	61
4.3.3. La composition chimique de tomate.....	62
4.3.4 Préparation du produit.....	62
4.3.5. Protocole de séchage (produit à sécher).....	63
4.4 Conclusions.....	65
Référence.....	65
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>66</b>
Résumé	

## Liste des figures

Fig. 1.1 Structure du soleil .....	7
Fig. 1.2 Mouvement apparent du soleil .....	8
Fig. 1.3 Variation mensuelle de la constante solaire .....	11
Fig. 1.4 Distillateur à simple effet .....	12
Fig. 1.5 Distillateur à multiple effet .....	12
Fig. 1.6 Distillateur solaire à simple effet a vitre plane .....	13
Fig. 1.7 Héliographe de Campbell .....	14
Fig. 1.8 Pyranomètre d'Eppley .....	17
Fig. 1.9 Pyrhéliomètre .....	17
Fig. 1.10 Carte du monde de l'enseillent moyen annuel .....	18
Fig. 1.11 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu .....	19
Fig. 1.12 Principe de la convection thermique .....	20
Fig. 1.13 Action de fluide en mouvement dans la convection. ....	21
Fig. 1.14 Principe de rayonnement .....	22
Fig. 2.1 Différents systèmes du séchage solaire .....	31
Fig. 2.2 séchoirs solaires directs .....	32
Fig. 2.3 Séchoir solaire indirect .....	34
Fig. 2.4 Capteur plan.....	36
Fig. 2.5 Concentrateur cylindro-parabolique.....	37
Fig. 2.6 Concentrateur parabolique.....	37
Fig. 2.7 Système de centrale à tour.....	38
Fig. 2.8 Panneau solaire hybride PV/T à eau.....	39
Fig. 2.9 Capteur solaire hybride PV/T à concentration.....	40
Fig. 3.1 Séchoirs solaires prototypes.....	46
Fig. 3.2 Effet de serre.....	47
Fig. 3.3 Chambre de séchage.....	48
Fig. 3.4 Conduite d'aspiration (combinaison PV /T, effet de serre, et chambre de séchage)..	48
Fig. 3.5 Armoire de commande.....	49
Fig. 3.6 Panneau solaire hybride.....	49
Fig. 3.7 Support .....	50
Fig. 3.8 Vue en perspective du séchoir.....	50
Fig. 3.9 Station météorologique de type Davis.....	51
Fig. 3.10 Capteur d'humidité.....	52
Fig. 3.11 Capteur de température.....	53
Fig. 3.12 Régulateur de charge .....	54
Fig. 3.13 Batterie.....	54
Fig. 3.14 Onduleur.....	55
Fig. 3.15 Variateur.....	56
Fig. 3.16 Balance électronique.....	56
Fig. 4.1 Représentation de la menthe.....	58
Fig. 4.2 Préparation et séchage de produit (Menthe).....	59
Fig. 4.3 Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2022 (Menthe). ....	60
Fig. 4.4 Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2022 (Menthe). ....	60
Fig. 4.5 Représentation de la tomate.....	61
Fig. 4.6 Coupage des tomates.....	62

---

Fig. 4.7 a)Préparation et b) séchage de produit (Tomate).....	63
Fig. 4.8 Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 23/05/2022 (Tomate).....	64
Fig. 4.9 Variation de l’humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 23/05/2022 (Tomate).....	64



## Liste des tableaux

Tableau 1.1. Les Compositions du soleil. ....	6
Tableau 1.2. Caractéristiques principales du soleil .....	6
Tableau 1.3. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques .....	18
Tableau 2.1 Quelques exemples des méthodes de séchage .....	29
Tableau 2.2 Quelque travail sur le séchage thermique de pomme de terre.....	41
Tableau 4.1 Composition chimique de la menthe .....	58
Tableau 4.2 Composition chimique de tomate.....	62

---

## *Introduction générale*

---

L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles

Le rayonnement solaire est une source d'énergie propre et est disponible presque universellement et le plus souvent parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, la source de presque toutes les sources d'énergie utilisées dans le monde. Ce qui résume les concepts généraux de l'énergie solaire et du soleil.

Le séchage solaire est une opération de transformation de certains produits. Il est utilisé à la fois dans le monde rural, dans le monde industriel à travers l'industrie, l'agroalimentaire, etc. Avec des outils et des matériaux localement disponibles, les séchoirs solaires sont faciles à construire, et peuvent fonctionner par convection naturelle ou forcée. Evidemment, l'ensoleillement, l'humidité, le vent et la température affecteront les performances du séchoir. A nos jours, le séchage d'un ensemble de produits tels que le bois ou les produits agricoles comme les dattes, les tomates, la menthe, etc. de natures hygroscopiques, connaît une évolution importante. Un produit est dit hygroscopique lorsqu'il est susceptible de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction des caractéristiques de l'air. Le séchage permet de limiter ces phénomènes et confère aux produits une certaine durabilité et qualité. L'utilisation de séchoirs solaires aide à maintenir une utilisation optimale pour les produits agricoles.

Le séchage est l'une des méthodes anciennes largement utilisées pour conserver les aliments contenant une grande quantité d'eau. Il a été utilisé depuis l'Antiquité et il y a des milliers d'années pour conserver certains types de fruits, de légumes, de céréales, de viande,

de poisson et de lait. Le séchage arrête l'activité des micro-organismes, des bactéries, de la fermentation et des enzymes. Cela arrête la détérioration et améliore la durée de conservation. Les aliments sont concentrés, faciles à stocker et légers.

Le séchage solaire est un mode intermédiaire entre le séchage artificiel et le séchage naturel. On peut atteindre avec ce mode de séchage une humidité finale plus basse que le séchage à l'air libre, mais relativement plus haute que le séchage artificiel. Les paramètres de séchage sont plus contrôlés que le séchage à l'air libre, mais restent moins précis que le séchage artificiel.

Dans le séchoir solaire indirect les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités de produits à sécher. L'air neuf est admis dans la chambre de séchage après passage dans le panneau photovoltaïque hybride à air qui le réchauffent en fonction du débit utilisé. Ce type de séchoir est souvent plus compliqué et plus coûteux à construire que le séchoir direct. Il peut être réalisé à des échelles diverses, et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire ou dont le niveau de température doit être contrôlé, tel que les produits à vocation agricole comme les fruits et les légumes dont l'aspect, la couleur et la qualité nutritive et gustative doivent être mieux préservés. Comme principe de fonctionnement, ce type de séchoir se compose généralement de deux parties: un collecteur qui converti le rayonnement solaire en chaleur et électricité, et une chambre de séchage qui contient le produit à sécher. L'air pénètre dans le collecteur qui s'échauffe ; sa température augmente et, par effet de convection, l'air chauffé monte à la chambre de séchage pour sécher le produit. La durée du séchage reste très variable selon les conditions météorologiques et la ventilation du séchoir.

Une étude expérimentale du séchage solaire à travers un panneau photovoltaïque hybride pour des produits agroalimentaires et des plantes médicinales, et ensuite effectuer quelques tests sur ces produits.

La présente mémoire se répartit en quatre chapitres. Le premier est consacré à la recherche bibliographique et aux concepts généraux de l'énergie solaire, des applications, du transfert thermique et solaire

Le deuxième chapitre fournit des informations générales sur le séchage et les séchoirs solaires et sur leur fonctionnement. Ensuite, préparation des produits agricoles à sécher décrit le troisième chapitre.

---

Le chapitre quatre comprend certains des résultats du séchage des produits agricoles Comme la Tomate, et la Menthe.

Enfin nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale sur les résultats obtenus au cours de cette étude et par l'énoncé des perspectives à venir.

---

# Chapitre

# 1

## *Etude bibliographique (Gisement solaire)*

---

### 1.1. Introduction

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux ont autant de ressources naturelles capables de produire de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme.

Leur faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Il existe divers types d'énergies renouvelables qui sont des sources d'énergie inépuisables comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre.

Le gisement solaire est un ensemble de données qui décrivent l'évolution du rayonnement solaire disponible sur un site donné et pendant une période donnée son évolution peut être faite à partir des données globales de rayonnement solaire. L'étude du gisement est le point de départ de toute investigation. L'étude est tout à fait essentielle dans le domaine de l'énergie solaire afin de simuler le fonctionnement probable du système énergétique, de s'assurer de son intérêt et de sa faisabilité.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord mettre le point sur quelques notions astronomiques sur le rayonnement solaire (soleil, nature, intensité...etc.), les différents phénomènes physiques de ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, les différentes composantes du rayonnement solaire.

## 1.2. Gisement solaire

Le gisement solaire est une énergie, gratuit, il brille pour tout le monde. L'énergie solaire et le moteur de toutes les grandes sources naturelles. Et le solaire est une science qui propose radiométrique et météorologique de l'atmosphère. En effet, l'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique [1].

### 1.2.1. Soleil

Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies conventionnelles d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont la conséquence de la photosynthèse ; que pour les énergies non conventionnelles dites renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, et l'énergie géothermique. L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de  $14 \times 10^5$  km de diamètre, sa masse est de l'ordre de  $2 \times 10^{30}$  kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments [2].

Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à  $4 \times 10^{26}$  w. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de  $1,7 \times 10^{17}$  w. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [3].

### 1.2.2. Caractéristiques du soleil

Les composants du soleil sont regroupés dans le tableau (1.1) et ses caractéristiques principales sont regroupées dans le tableau (1.2) [4].

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales (Figure 1.1) [3].

- ✓ L'intérieur, contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire, cette région s'étend sur une épaisseur de  $25 \times 10^4$  km. Cette couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.

**Tableau 1.1.** Les Compositions du soleil. [4].

Composition du soleil	
Hydrogène	73,46 %
Hélium	24,85 %
Oxygène	0,77 %
Carbone	0,29 %
Fer	0,16 %
Néon	0,12 %
Azote	0,09 %
Silicium	0,07 %
Magnésium	0,05 %

**Tableau 1.2.** Caractéristiques principales du soleil [4].

Diamètre ( <i>km</i> )	$14 \times 10^5$
Masse ( <i>kg</i> )	$2 \times 10^{30}$
Surface ( <i>km</i> <sup>2</sup> )	$6.09 \times 10^{12}$
Volume ( <i>km</i> <sup>3</sup> )	$1.41 \times 10^{18}$
Masse volumique moyenne ( <i>kg/m</i> <sup>3</sup> )	1408
Vitesse ( <i>km/s</i> )	217
Distance du centre de la voie lactée ( <i>km</i> )	$2.5 \times 10^{17}$

- ✓ La photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km, elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient, c'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500 °.
- ✓ La chromosphère et la couronne solaire, sont des régions à faible densité où la matière est très diluée, elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température y est très élevée (un million de degrés).

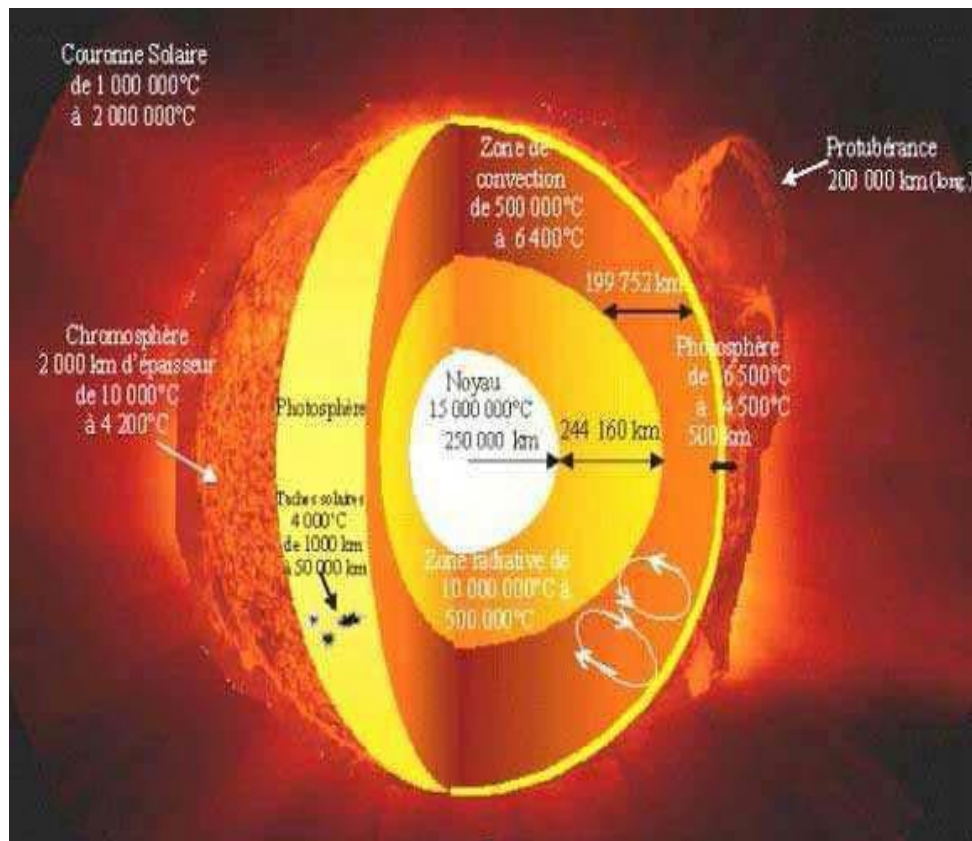


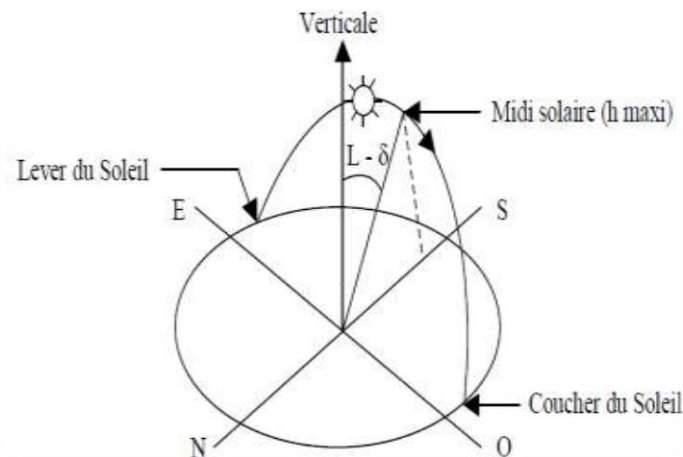
Fig. 1.1 Structure du soleil [4].

### 1.2.3. Mouvements du soleil

Le mouvement que parait faire le soleil en une journée vu par un observateur situé sur terre est appelé ‘‘Le mouvement apparent du soleil’’. En dehors des régions polaires, de l’Equateur et des tropiques [1].

- ❖ Le matin ; le soleil est à l’Est, bas sur l’horizon, c’est le « lever du soleil ».
  - ❖ A midi ; le soleil est positionné au Sud ou au Nord, et il est au plus haut de son trajet apparent.
  - ❖ Le soir ; le soleil apparait à l’Ouest, bas sur l’horizon, c’est le « coucher du soleil »
- Le mouvement apparent du soleil observé par un homme fixe en un point de latitude  $L$  au Nord de l’Equateur est schématisé sur la figure (1.2). L’angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu au midi solaire est égal à  $(L - \delta)$ .  $L$  La longitude ( $^\circ$ ) et  $\delta$  La déclinaison (degré).

La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre dans l’hémisphère Nord.



**Fig. 1.2** Mouvement apparent du soleil

#### 1.2.4. Le système terre-soleil

Dans l'univers tout est en mouvement. On peut décomposer le mouvement de la terre en deux mouvements [5].

##### ✓ **Mouvement de rotation**

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures.

La rotation de la terre s'effectue avec une période de :  $T_r = 23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h}$ .

La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est ;  $V_r \approx 0,465\text{km/s}$ .

Elle est variable en fonction de latitude  $\varphi$  telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r(\cos(\varphi)) \quad (1.1)$$

##### ✓ **Mouvement de translation**

La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en une période  $T_t = 365\text{jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25\text{ jours}$ . Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique ou le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne  $V_t \approx 29,77\text{km/s}$  [vitesse maximale en hiver  $30,27\text{ km/s}$  et minimale en été  $29,77\text{ km/s}$ ]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique direct et provoque le cycle des saisons [5].

Le plan équatorial, perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre, fait avec le plan de l'écliptique un angle constant appelé obliquité et noté  $\delta$  qui est égal à 23.45 [5].

### 1.3. Energie solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments [6], c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium ; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 Km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde 0.5  $\mu$ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780 K [7].

#### 1.3.1. Energie solaire Origine

Les conditions résidentes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X [1].

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à 3.7.10<sup>26</sup> j/s.

#### 1.3.2. Caractères particuliers

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes [8] :

- ❖ Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1(kW/m<sup>2</sup>) à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- ❖ La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1 kW/m<sup>2</sup>) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.

- ❖ Elle est abondante, notre planète reçoit plus de 104 fois l'énergie que l'humanité consomme.
- ❖ Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- ❖ L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- ❖ Elle est propre.

### 1.3.3. Captation

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

#### ✓ **Energie 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.

#### ✓ **Energie 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 thermoélectriques trois types principaux de centrales sont utilisées [9] :

- ❖ 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°).

#### ✓ **Energie 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 [8].

### 1.3.4 Constante solaire

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [10].

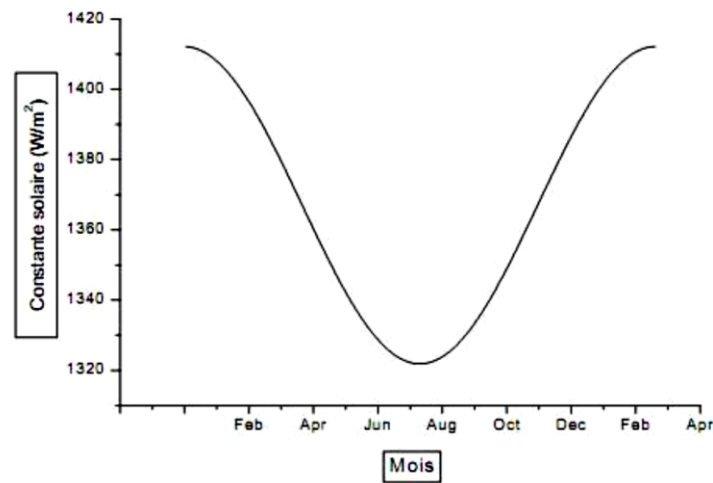
La variation de la constante solaire suit la relation suivante [11] :

$$C = I_0[1 + 0,033 \cos(0,984 j)] \quad (1,2)$$

$C$ : la constante solaire.

$I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$  est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

$n$ : le numéro du jour de l'année.



**Fig. 1.3** Variation mensuelle de la constante solaire

### 1.3.5. Application de l'énergie solaire

Depuis Antiquité, l'homme a directement bénéficié de l'énergie du rayonnement solaire dans de nombreuses applications telles que le séchage des cultures agricoles et le chauffage des maisons. Il l'a également utilisé dans d'autres domaines mentionnés dans les livres de la science historique, Archimède par exemple a brûlé la Flotte de guerre romaine en l'an 212 avant JC en concentrant le rayonnement solaire sur les navires des ennemis par des centaines de boucliers métalliques [12].

À l'époque babylonienne, les femmes des prêtres utilisent des vaisseaux d'or polis comme des miroirs pour concentrer le rayonnement solaire afin d'obtenir du feu. Des scientifiques tels que Churchill, Suez, Lavoisier, Mochot, Eriksson, Harding et d'autres utilisaient l'énergie solaire pour faire fondre les matériaux, cuire les aliments, produire de la vapeur d'eau, distiller de l'eau et chauffer l'air.

Au début du siècle actuel, la première usine d'irrigation à énergie solaire fonctionnait cinq heures par jour était à Maadi, près du Caire. Depuis longtemps, l'homme a essayé de tirer parti de l'énergie solaire et de l'exploiter, Mais c'était de façons peu nombreuses et limitées, et avec le grand développement de la technologie et du progrès scientifique, des nouveaux horizons scientifiques se sont ouverts dans le domaine de l'exploitation de l'énergie solaire [12].

#### 1.3.5.1. Distillation

La disponibilité de l'eau potable est aujourd'hui une préoccupation majeure de l'humanité. La terre est recouverte d'eau à 71%, mais 98% de ce volume a une concentration en sel trop élevée. Cette eau n'est donc pas potable. Elle ne peut pas non plus obtenir de l'eau

potable [13]. être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie. La distillation permet de débarrasser l'eau impure non potable (eaux saumâtres tirées du sous-sol, eau de mer) de ses impuretés pour

Les distillateurs classiques utilisent les sources d'énergies thermiques habituelles, qui contribuent au réchauffement climatique.

#### ✓ Distillation pour le dessalement de l'eau saumâtre

On distingue les distillateurs à simple effet et les distillateurs à multiple effet [13].

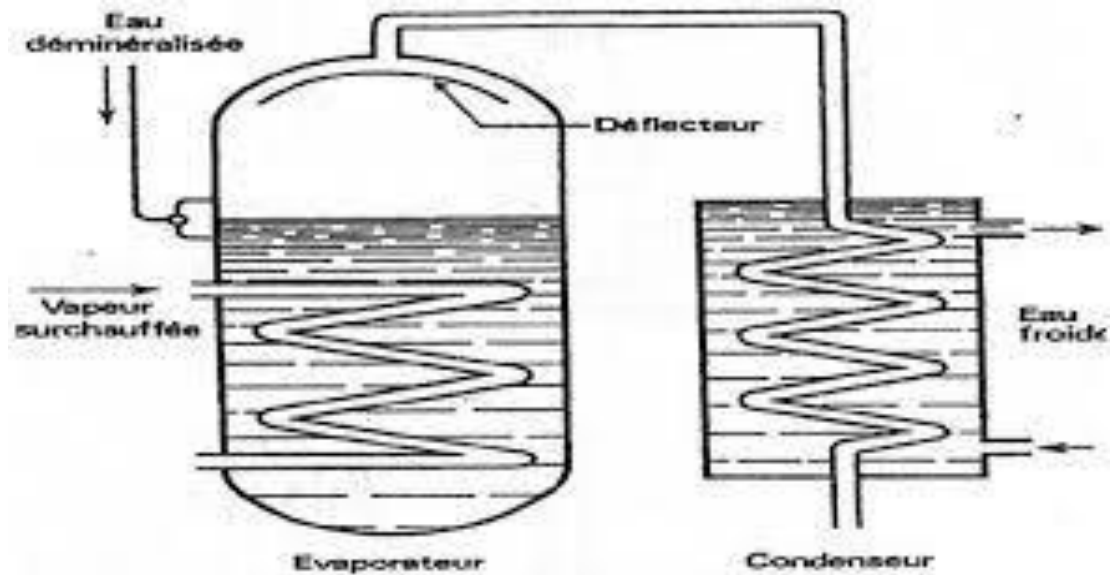


Fig. 1.4 Distillateur à simple effet

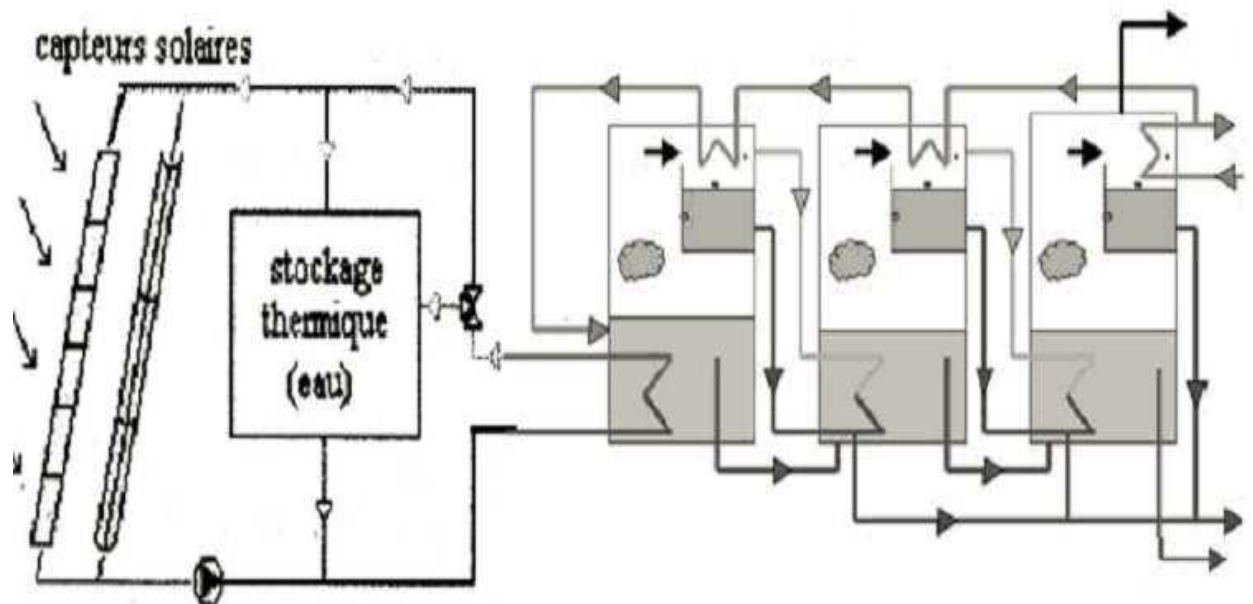


Fig. 1.5 Distillateur à multiple effet

#### b. Distillateurs d'eau classiques

Les distillateurs solaires peuvent être à simple ou à multiple effet. Le couvercle vitré peut être plan ou sphérique [13].

Un distillateur à simple effet est représenté ci-dessous. Le couvercle vitre sert de Condenseur.

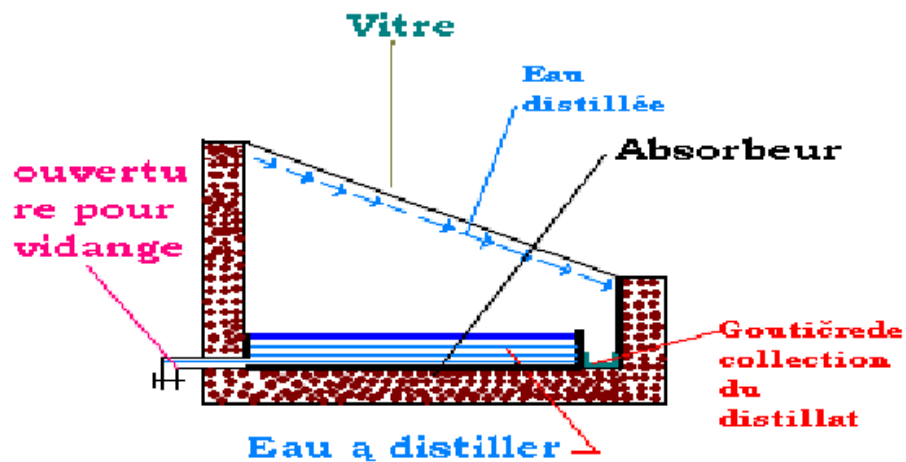


Fig. 1.6 Distillateur solaire à simple effet à vitre plane

### 1.3.5.2. Froid et climatisation

Produire du froid avec l'énergie solaire qui réchauffe la Terre. Grâce au soleil, d'énormes quantités d'énergies atteignent la surface de la Terre après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres. Avec une puissance moyenne d'environ 1.000 W/m<sup>2</sup>, cette énergie solaire est 10.000 fois supérieure à la demande énergétique globale de la population et ce pour les 5 milliards d'années à venir. Cette source inépuisable à l'échelle humaine est toutefois inégalement répartie à l'échelle de la planète avec un maximum à l'équateur [14].

L'énergie solaire fait l'objet de toutes les attentions dans un contexte de hausse du coût des énergies fossiles et de lutte contre le changement climatique. Outre son abondance et sa gratuité, l'énergie solaire présente de nombreux avantages. Contrairement aux autres énergies de sources renouvelables, le solaire est exploitable sur l'ensemble de la surface du globe mais l'équipement de production doit être installé à proximité du lieu de consommation afin de minimiser les pertes. Ajoutons qu'il est totalement modulable puisque la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.

La chaleur diffusée par le rayonnement solaire peut également être utilisée pour de nombreuses applications et à différents niveaux de température. À basse et moyenne température, l'énergie solaire est utilisée dans le bâtiment pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS), chauffer les locaux et l'eau des piscines. Ces utilisations sont regroupées sous l'appellation « solaire thermique ».

D'autres utilisations en revanche font encore l'objet de recherche & développement. C'est le cas notamment de la climatisation solaire ou comment produire du froid grâce au soleil.

### **1.3.5.3. Séchage solaire**

Le séchage est un procédé d'extraction d'eau d'un solide, d'un semi-solide ou d'un liquide par évaporation. Cette opération nécessite une source de chaleur. Plusieurs techniques sont possibles pour sécher et conserver les récoltes : le séchage sur champ au soleil, les cabines de déshydratation, l'ensilage pour les fourrages et le séchage en grange [15].

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau, on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures, bactéries) responsables du pourrissement.

C'est aussi une étape nécessaire dans la congélation de certains produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet d'améliorer la conservation des produits, de faciliter leur transport, de réduire les risques de pertes de produits après récolte et surtout d'élargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année [16].

Le séchage implique deux types de transferts : le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert.

## **1.4 Rayonnement solaire**

Le soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

### **1.4.1 Composante du rayonnement solaire**

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du soleil et l'atmosphère de la terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons. Le spectre alors observable depuis la surface de la terre est donc un spectre de raies d'absorptions.

Ainsi, à la surface de la terre le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

Le rayonnement ultra-violet émis par le soleil est classé en 3 types d'ultra-violet les UV-A ayant une longueur d'onde de 380 (cette valeur peut varier légèrement selon la source)

à 315 nanomètres ( $1\text{nm}=1 \times 10^{-9}$  mètre), les UV-B dont la longueur d'onde est comprise entre 315 et 280 nm ainsi que les UV-C qui ont une longueur d'onde allant de 280 à 200 nm. Cependant seuls les UV-A et une petite partie des UV-B parviennent jusqu'à la surface de la terre car en traversant l'atmosphère la totalité des UV-C et la majeure partie des UV-B sont absorbées, soit réfléchies. Ainsi le rayonnement solaire que nous recevons comprend seulement 5% d'ultra-violet, ces 5% étant composés à 95% d'UVA et à 5% d'UV-B [17].

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " $\Delta E$ ". L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  (en hertz), dont la longueur d'onde  $\lambda$  (en mètre) est égale à la célérité divisée par  $\nu$ , est exprimée par la relation  $\Delta E = h\nu = hc / \lambda$ .  $h$  : étant la constante de Planck c'est-à-dire  $6,63 * 10^{-34} \text{ J/s}^{-1}$ .

Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge. L'énergie que transmet le soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à  $1350 \text{ W/m}^2$  (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante.

Ainsi, l'énergie que nous transmet le soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions  $900$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

#### **1.4.2. Rayonnement direct**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

#### **1.4.3. Rayonnement diffus**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

#### **1.4.4. Rayonnement réfléchi**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo.

#### **1.4.5. Rayonnement global**

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

### 1.4.5.6. Mesure du Rayonnement solaire sur terre

Le principe classique des mesures d'éclairements est l'effet thermoélectrique : un corps noir reçoit le rayonnement solaire, l'augmentation de sa température est mesurée par une série de couples thermoélectriques ; on enregistre donc une force électromotrice. Une mesure précise est toujours délicate d'autant plus que l'appareil est situé à l'extérieur [18].

#### a. Héliographe

L'héliographe mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct a dépassé un certain seuil. Tant que l'on peut observer des ombres sur le sol ( $E > 120W/m^2$ ), les météorologistes parlent de radiation directe à laquelle est sensible l'héliographe. La somme de ces périodes représente la durée d'insolation journalière permettant de définir la fraction d'insolation. Dans l'héliographe de Campbell-Stokes, une sphère de verre concentre le rayonnement direct en un point qui brûle un papier spécial. En se déplaçant, le point brûlé décrit le mouvement apparent du soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation. L'héliographe de Jordan utilise du papier photographique. On utilise maintenant des héliograpes automatiques constitués de cellules photovoltaïques disposées sur une bande cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de la trajectoire apparente du soleil. Un dispositif électronique totalise les intervalles de temps d'ensoleillement ; il faut veiller à ce que chaque héliographe ait le même seuil, c'est-à-dire l'éclairement direct minimal enregistré [18].

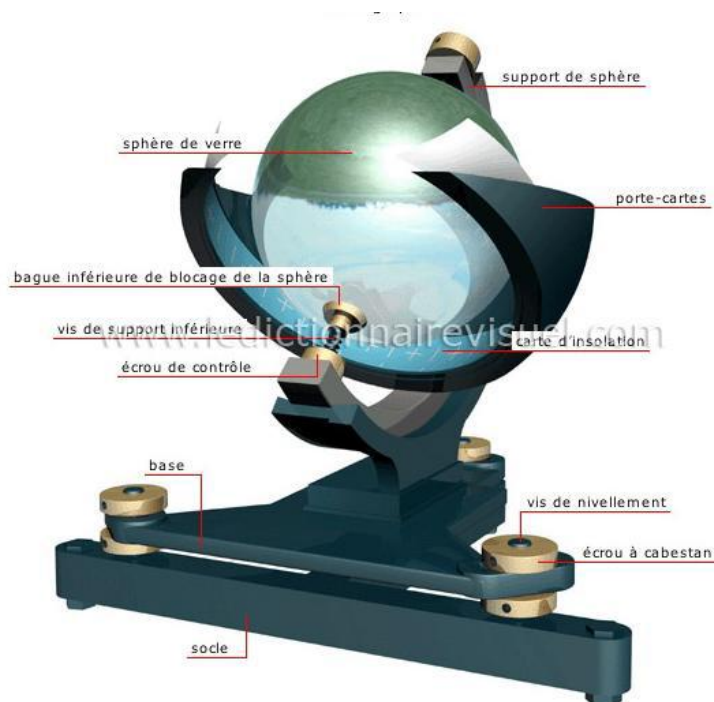


Fig. 1.7 Héliographe de Campbell [19].

## b. Pyranomètre

Les pyranomètres mesurent le rayonnement global (direct + diffus) de tout l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde 0,3 à 3  $\mu\text{m}$ . Le pyranomètre d'Eppley est une thermopile adaptée à cet usage. La surface réceptrice comporte deux anneaux concentriques en argent ; l'anneau extérieur recouvert de blanc. La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des anneaux mais isolés électriquement, peut être enregistrée à raison d'une lecture par heure sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV (en fait  $10 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ ) [18].



**Fig. 1.8** Pyranomètre d'Eppley [20]

## c. Pyrhéliomètre

Les pyrhéliomètres mesurent le rayonnement direct. Ils comportent une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatiques. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à  $5.7^\circ$  (le diamètre apparent du soleil et de  $0.5^\circ$ ). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil [18].



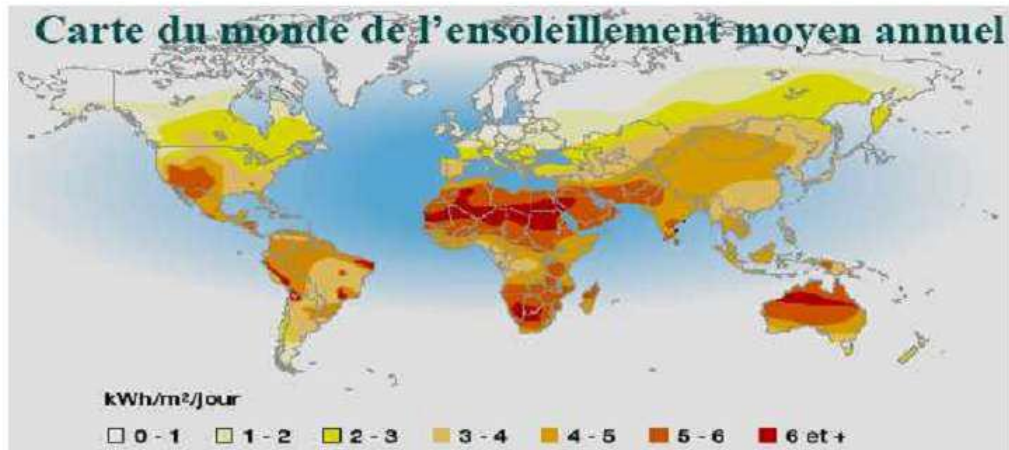
**Fig. 1.9** Pyrhéliomètre [20].

## 1.4. 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 [21].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la Figure (1.10) :



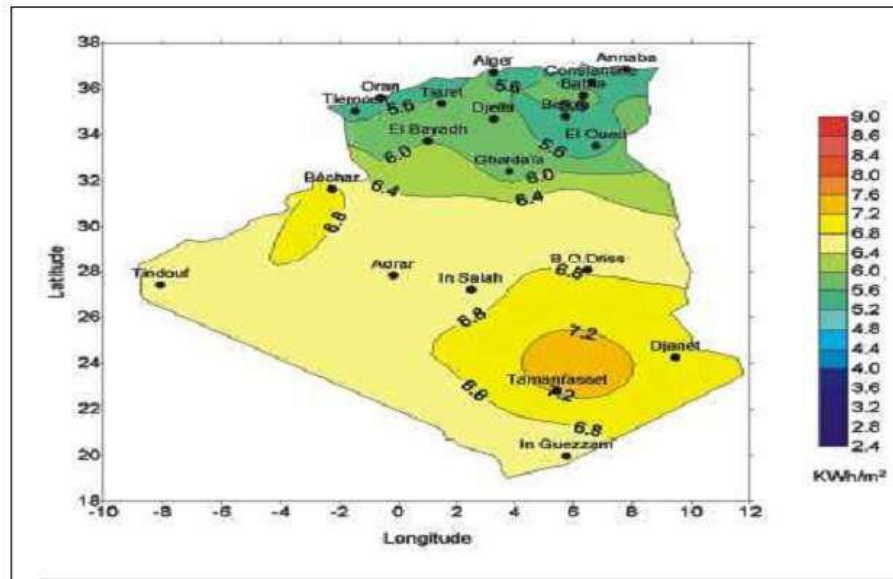
**Fig. 1.10** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [28]

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 HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (I.2) selon l'ensoleillement reçu annuellement [22] :

**Tableau 1.3.** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne recue (kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 16h/j.



**Fig. 1.11** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [28]

## 1.5. Transfert de chaleur

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a un échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteur thermique ou même électrique, centrales électriques au fuel à gaz, etc....électronique) domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid, le flux de chaleur dont la densité locale est notée  $\vec{\tau}$  est une grandeur vectorielle ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance ( $W/m^2$ ) [2].

### 1.6.1. Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température :  $T = f(x, y, z, t)$ , la valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température, nous distinguerons deux cas : champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire. Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire [23].

### 1.6.2. Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire

de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [24]. Elle est exprimée en ( $w.m^{-2}$ ) :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (1.3)$$

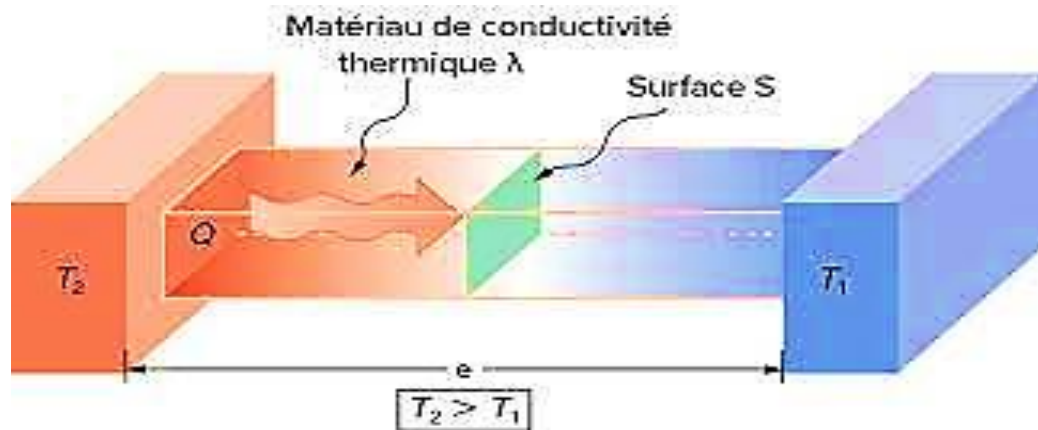
### 1.6.3. Les type de transfert de chaleur

Il existe trois modes de transfert de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection.

#### 1.6.3.1. Conduction

La conduction thermique est un transfert thermique ayant lieu au cœur d'un matériau c'est-à-dire à l'échelle microscopique elle résulte de l'élévation ou de la baisse de la température dans certaine région d'un corps. Ceci provoque une différence de température dans l'intégrité du corps ainsi la région la plus froide du corps s'échauffe au contact de la région la plus chaude.

Ce transfert thermique a lieu sans transfert de matière mais avec transfert d'énergie. En effet, on peut considérer la conduction thermique au sein d'un solide comme la transmission de proche en proche de l'énergie microscopique de vibration du réseau cristallin car le fait que le corps soit chaud se traduit par une agitation microscopique des atomes cristallins [23].

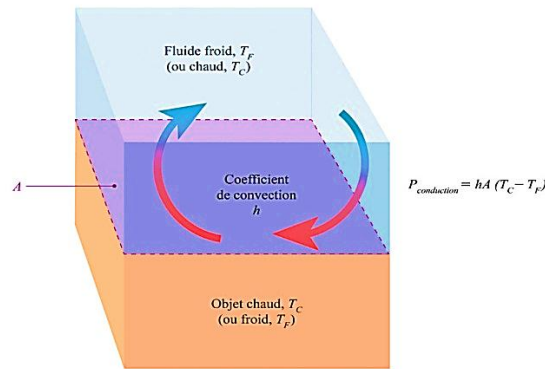


**Fig. 1.12** Principe de la conduction thermique

#### 1.6.3.2. Convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et de mouvement de milieu, elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transport de l'énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz. Le transport d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacent. L'énergie ainsi

transmise sert à augmenter la température est l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte simultanément, le fluide et l'énergie. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement [24].



**Fig. 1.13** Action de fluide en mouvement dans la convection.

#### ✓ Convection forcée

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoquée par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques ; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides.

La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative [23].

#### ✓ Convection naturelle

C'est celle dans laquelle le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, celles -mêmes dues à des différences de température existant dans le fluide. La convection naturelle dans laquelle le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules fluide. La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide et qui crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide.

On retrouve dans plusieurs applications industrielles ce mode de transfert de chaleur, Par exemple, dans les échangeurs de chaleur où deux fluides en mouvement, séparés par une paroi solide s'échange de l'énergie [23].

### ✓ Convection mixte

Il existe une cause externe au mouvement du fluide mais insuffisante pour que la poussée d'Archimède puisse être négligée (frontière entre la convection libre et la convection forcée) c'est le cas des transferts de chaleur dans un habitacle d'automobile : L'air est soufflé dans l'habitacle par un ventilateur, mais la poussée d'Archimède n'est pas négligeable, surtout lorsqu'on se place loin des entrées d'air [24].

#### 1.6.3.3. Rayonnement

Le rayonnement est un transfert thermique ne nécessite pas de milieu matériel par opposition aux deux autres. En effet, ce type de transfert thermique résulte de l'émission des rayons électromagnétiques transporte l'énergie. Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit [24].

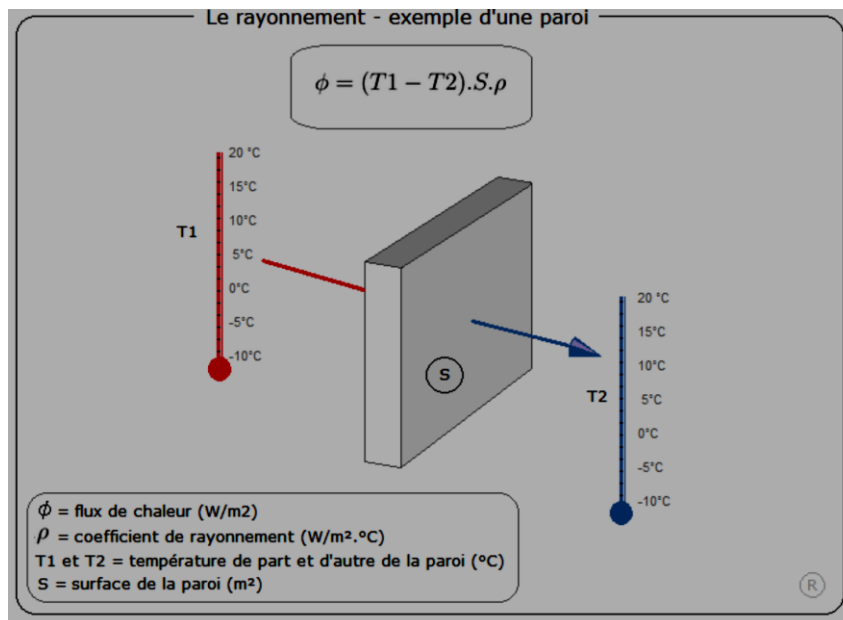


Fig. 1.14 Principe de rayonnement

### 1.7. Séchage des solides

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

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

#### 1.7.2. Modes de séchage

Il existe un grand nombre de méthodes de séchage différentes. Les plus courantes sont le séchage au soleil (rayonnement), le séchage à l'air chaud (convection), le séchage par

contact (conduction). Selon la nature des produits à traiter, qu'il s'agisse de denrées alimentaires ou de matériel industriel, ces méthodes s'avèrent plus ou moins adaptées.

#### **1.7.2.1. Séchage par conduction**

Cette méthode de séchage consiste à sécher un produit en le mettant en contact avec des parois chauffées. La plupart du temps, le séchage se fait dans des tambours rotatifs pour une meilleure homogénéité. Cette technologie est surtout utilisée dans les procédés de séchage de l'industrie lourde.

Cependant, le contact direct du produit avec les parois chaudes peut entraîner la dénaturation du produit séché, et l'homogénéité du processus n'est pas garantie.

#### **1.7.2.2. Séchage par convection**

Le séchage à l'air chaud est la méthode de séchage la plus courante à l'heure actuelle. Elle est simple et efficace pour les produits industriels et alimentaires solides et constitue une solution peu coûteuse.

Toutefois, ce processus peut déshydrater complètement la surface du produit, ce qui entraîne des fissures ou un résultat hétérogène. Il peut également s'agir d'un processus lent, en fonction du produit et de la température de séchage admissible.

#### **1.7.2.3. Séchage par rayonnement**

Le séchage par exposition au soleil est la solution la plus ancienne et la plus économique. Elle est bien adaptée au séchage des fruits et légumes traditionnels dans les régions reculées, comme les abricots et les tomates, bien qu'elle ne préserve pas toutes les propriétés et les vitamines du produit.

Mais cette méthode nécessite beaucoup d'espace et de temps, et offre peu de contrôle du processus.

### **1.7.3. Vitesse de séchage**

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporé de solide séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou toute simplement la limite du quotient de la différence de teneur  $\Delta m$  par l'intervalle de temps  $\Delta t$ , c'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert.

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 [26].

#### **1.7.4. Cinétique du séchage**

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface

d'évaporation du matériau (kg d'eau / m<sup>2</sup>.s) en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...).

Elles caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération de séchage en fonction du temps. Les courbes de cinétique de séchage varient suivant le produit à sécher et contiennent de une à trois principales périodes de la cinétique de séchage, tout dépend du produit [26].

On obtient la courbe de séchage expérimentale en suivant la variation de l'humidité absolue du produit par des pesées successives au cours du séchage jusqu'à atteindre l'humidité absolue d'équilibre du produit. Pour chaque produit il existe une valeur d'humidité optimale d'équilibre pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses propriétés organoleptiques et nutritionnelles.

On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de  $\phi_{eq} = 11\%$  [27].

## Reference

- [1] Kechida Essaghir., Etude expérimentale et théorique du gisement solaire pour la région de M'sila, Mémoire Master 2, Université de M'sila, 2018/2019.
- [2] Chassériaux Jean-Michel., Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod, 1984.
- [3] Bernard, R., Menguy, G., & Schwartz, M, Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications Technique et documentation, (p. 243), 2ème édition, 1980.
- [4] Saadi S Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique, Université freres mentouri Constantine, 2010.
- [5] Benbouza Naima Etude du rayonnement solaire dans la region de Batna, Université de Batna, 2008.
- [6] Belhadj M ., Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome, Mémoire de magister, Université de Bechar, 2008.
- [7] Patel Mukund R., Wind and solar power systems, Ph. D, Pe U. S merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC, 1999.
- [8] Bonal J., Rossetti P, Les énergies alternatives, Omniscience, 2007.
- [9] Edwards D. K., Capteurs solaires, Edition SCM, paris. 1979.

- 
- [10] Sotehi O., Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire, thèse de magistère, Université de Constantine, 2009.
- [11] Duffie J. A., Beckman W. A., Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons, 1980.
- [12] Mohamed El Baily, L'énergie solaire et les utilisations les plus importantes, 2008.
- [13] Siaka Toure, Les Applications du Solaire Thermique Basse Temperature, Laboratoire d'Energie Solaire, Université Felix Houphouet-Boigny Abidjan Cocody Cote d'Ivoire, 25-27 juin 2015 Ouagadougou.
- [14] Benahmed Lamia, Ben Mostefa Fatima Zahra, Intégration d'un système de rafraichissement solaire au bâtiment. Faisabilité technico-économique, mémoire Master 2, Université Abou Bbaker Belkaid Tlemcen, 2012-2013.
- [15] Dadda, B., Kherrou, S., et Serir, L, Réalisation d'un séchoir solaire indirect, Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable, Uraer, B.P. 88, Garet Etaam, Ghardaïa, Algérie.
- [16] Boukadoum, Le séchage solaire des produits agricoles, Attachée de Recherche, Projet Séchage solaire, Equipe Systèmes Solaires à Basses temperatures, Division Energie Solaire Thermique et Géothermie.
- [17] Benabda Amina, Contribution à l'étude d'une alimentation à base de panneaux photovoltaïques avec stockage, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2018.
- [18] Alain Ricaud, Gisement solaire, Sept-2009, éditeur : Alain Ricaud, publiés par Cythelia sarl.
- [19] «<http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/terre/meteorologie/symboles-meteorologiques-internationaux/meteores.php> », (consulté le 28/02/2022,).
- [20] Berrichon Jean-Damien., Installation et mise en service d'un instrument de mesure du rayonnement solaire diffus, Master 1 de Physique et Ingénierie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion.
- [21] Capderoux M., Atlas solaire de l'Algerie, Modelestheoriques et experimentaux, tome1, Volume (1.2), Office des publications Universitaires, Alger, 1987.
- [22] Mefti A., bouroubi M, Y., Mimouni H., Evaluation du potentiel énergétique solaire Bulletin des Energies Renouvelables, No. 2, p 12, décembre. 2002.
- [23] Michel H., Introduction aux phénomènes de transfert, Université de Technologie Compiègne, France, 1994-1998.
- [24] Jannot Y., Cours : transferts thermiques, école des Mines Nancy, 2012.
- [25] Dagenet Michel., Les séchoirs solaires, Théorie et pratique. 1985.

- 
- [26] Nadir N., Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire, Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.
  - [27] Doymaz I., Air-drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food Engineering*, vol. 8, No. 2, 2007.
  - [28] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

# Chapitre

## 2

### *Séchage et les Séchoirs solaires*

---

#### **2.1. Introduction**

Le séchage, et surtout le séchage au soleil, est l'une des plus anciennes techniques de conservation des produits alimentaires utilisées par l'homme et consiste à exposer le produit aux rayons du soleil et à l'air libre.

Plusieurs produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à ce handicap : culture sous serre, congélation, conservation par séchage.

Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits. Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle sans l'aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air.

La méthode traditionnelle du séchage souffre de maints problèmes, parmi ces derniers, le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, l'incertitude du temps, le coût de la main d'œuvre élevé, la nécessité de zones vastes, l'infection par des insectes et autres corps.

L'objectif de sécher un produit 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).

#### **2.2. Séchage**

##### **2.2.1. Définition**

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

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes [1].

### **2.2.2. Historique**

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

Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [2].

### **2.2.3. Intérêt du séchage**

Le séchage a pour intérêt

- ❖ D'alléger le produit.
- ❖ De permettre (ou de faciliter) surtout sa conservation par diminution de 'l'activité de l'eau'. Mais en revanche.
- ❖ Il modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient.
- ❖ Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération [3].

### **2.2.4. Principes de séchage**

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement [4].

### **2.2.5. Différents méthodes du séchage**

#### **2.2.5.1. Séchage mécanique**

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,...). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement [5].

**Tableau 2.1** Quelques exemples des méthodes de séchage

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

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

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

#### 2.2.5.2. Séchage chimique

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

#### 2.2.5.3. Séchage thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

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

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

#### 2.2.5.4. Séchage par ébullition

L'ébullition d'un liquide se produit lorsque sa température est telle que la pression de vapeur  $P$  de l'eau de ce liquide est égale à la pression totale ambiante  $P_t$  :  $P = P_t$   
L'ébullition proprement dite (formation de bulles de vapeur d'eau) est plus difficile à observer dans les solides ou les corps pâteux que dans les liquides. L'allure à laquelle s'évapore l'eau est déterminée par l'allure d'apport de la chaleur latente d'évaporation. Cet apport est effectué [6]:

- ❖ Par conduction, à partir d'une surface chauffée au contact du produit.
- ❖ Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou demicro-ondes ou par un chauffage diélectrique.
- ❖ Par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant.

#### **2.2.5.5. Séchage par entraînement**

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que [6] :

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

Un exemple typique du début de séchage d'un produit très hydraté, Les concentrations de l'air en eau sont exprimées en pressions partielles d'eau (en Pascal). Le séchage est dit 'isenthalpique' si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud. L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour l'eau enlevée : entrant sec et chaud dans le séchoir, il en ressort humide et moins chaud. Le séchage par entraînement est plus important par rapport au séchage par ébullition.

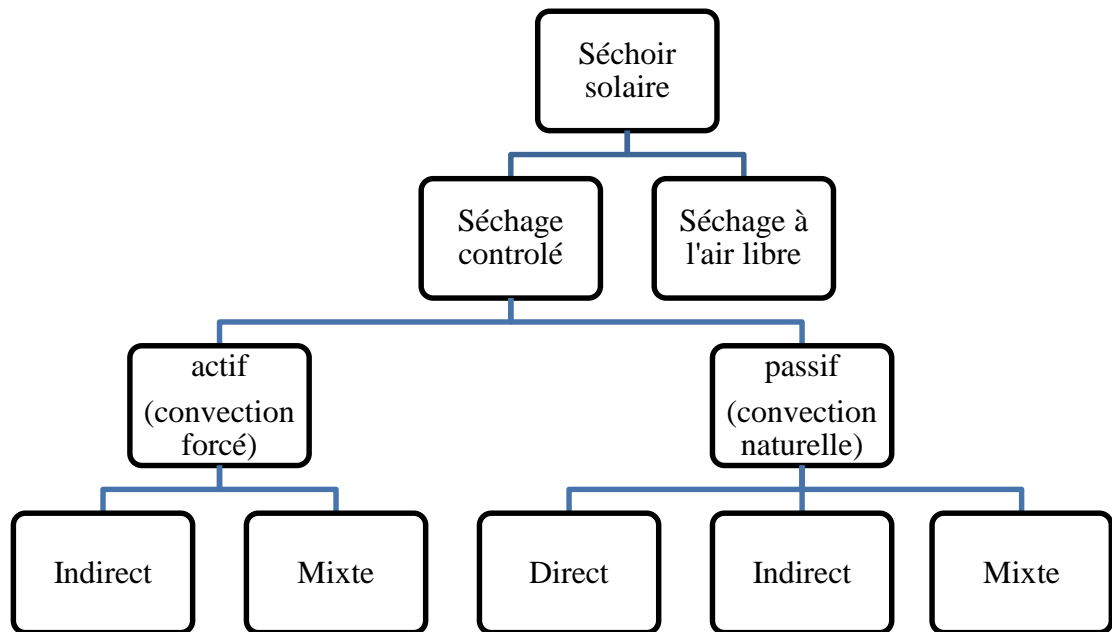
Généralement l'intérêt se limite à ce premier mode de séchage.

### **2.3. Séchoirs solaires**

C'est un dispositif qui permet le séchage de produits à conserver. Il existe plusieurs types de séchoirs :

#### **2.3.1. Classification des systèmes du séchage solaire**

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de fonctionnement en plusieurs catégories présentées dans la figure (2.1).



**Fig. 2.1** Différents systèmes du séchage solaire

### 2.3.2. Types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories [7] :

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

#### 2.3.2.1. Les séchoirs solaires directs

Par définition, les rayons du soleil frappent directement dans ces séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

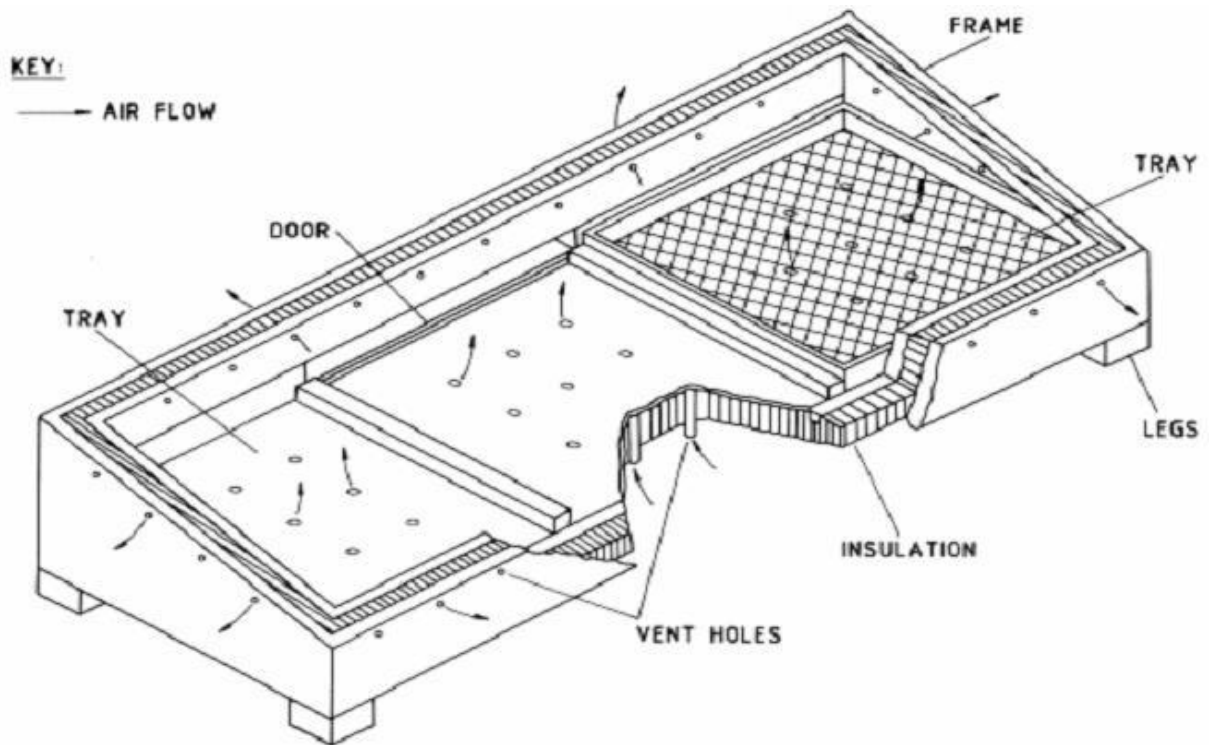
Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet cheminée) ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles.

##### 2.3.2.1.1 Principe de fonctionnement

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert

généralement de toit mais en peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles) [8].



**Fig. 2.2** séchoirs solaires directs

#### 2.3.2.1.2 Avantages et les inconvénients

##### ✓ **Avantages**

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

##### ✓ **Inconvénient**

- ❖ Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration [7].
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- ❖ Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments [8].

#### 2.3.2.2. Séchoirs naturels (traditional)

Le séchage naturel est un séchoir direct et effectué en plein air représente le moyen le plus ancien et le plus simple. Ils utilisent directement le soleil et l'air, dont l'action n'est ni particulièrement favorisée, ni contrôlée. Le produit est réparti sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé à même le sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant. Ces séchoirs sont très bon marché, mais supposent une intervention humaine

régulière et soutenue : protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent pour éviter la surchauffe dès la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre au problème de la conservation temporaire du produit en attendant la vente ou la consommation. IL présente cependant des inconvénients [10]:

- ❖ Pertes de produits mal sèches ou gâchés.
- ❖ Lors de remuage, destruction de vitamines A et C par l'exposition directe au soleil.
- ❖ Dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussière). Ainsi, le séchage du poisson sur le sable peut entraîner des pertes allant jusqu'à 50 % du fait du développement de larves.
- ❖ Une longue durée de séchage.
- ❖ L'impossibilité d'obtenir un degré d'humidité précis.
- ❖ L'attaque par les champignons et les insectes (cas du bois).

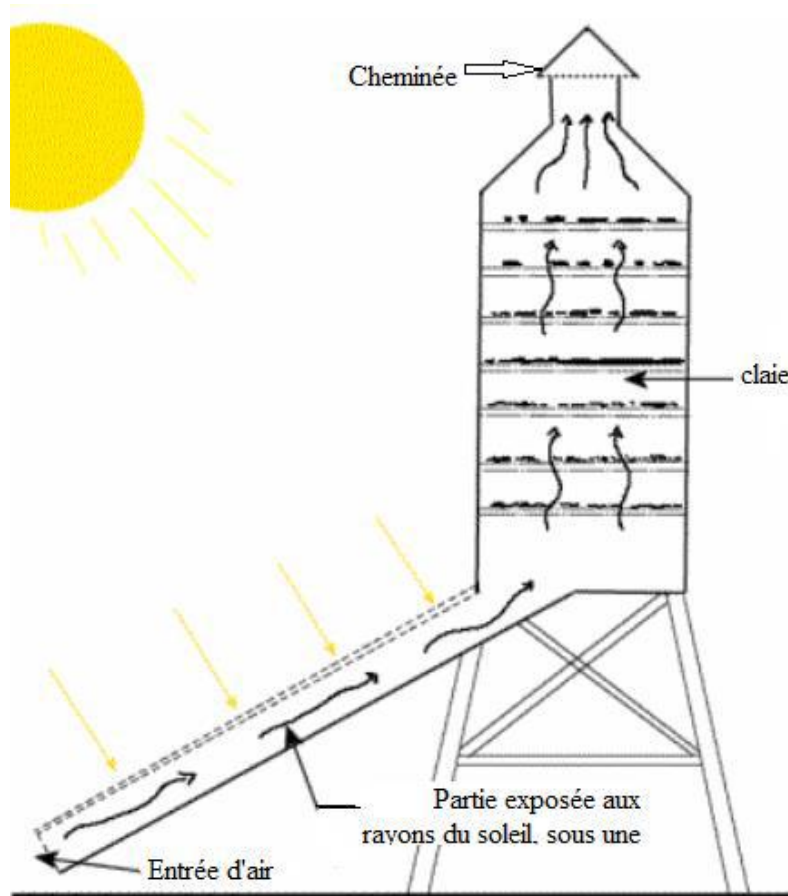
Toutes ces raisons ont conduit les professionnels à s'orienter vers le séchage artificiel.

### **2.3.2.3. Séchoirs solaires indirects**

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur qui le réchauffent en fonction du débit utilise [7].

#### **2.3.2.3.1 Principe de fonctionnement**

Le séchoir solaire indirect se compose de parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée (figure 2.3). L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.



**Fig. 2.3** Séchoir solaire indirect

### 2.3.2.3.2 Avantages et les inconvénients

#### ✓ Avantages

- ❖ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- ❖ Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit [9].
- ❖ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [10].

#### ✓ Inconvénients

- ❖ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir [10].
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

### 2.3.2.4. Différentes types de séchoir solaire

#### 2.3.2.5. Séchoirs mixtes

Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs. Les transferts de chaleur et de vapeur d'eau y sont complexes et assez mal connus [11].

### 2.3.2.6. Séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert souvent, dans ce cas, de préchauffage de l'air.

Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent dépendre des conditions climatiques [11].

Les méthodes de séchage les plus utilisées dans l'industrie sont les suivantes :

- ❖ Le séchage par air chaud ou séchage 'traditionnel'.
- ❖ Le séchage à la vapeur surchauffée.
- ❖ Le séchage par pompe à chaleur.
- ❖ Le séchage par chambre chaude.
- ❖ Le séchage sous vide.

Les deux derniers procédés de séchage sont utilisés en particulier pour le séchage du bois.

#### 2.3.2.6.1 Avantages et les inconvénients

##### ✓ **Avantage**

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

##### ✓ **Inconvénient**

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

### 2.4 Capteurs Solaire

#### ✓ **Capteurs Plans**

Le rayonnement solaire peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs plans utilisant conjointement l'absorbeur, surface sélective et l'effet de serre crée par le vitrage. Ces capteurs ont l'avantage d'utiliser aussi bien les rayons directs du soleil que les rayons diffusés, c'est à dire que même par temps couvert, le liquide caloporteur de capteur parvient à s'échauffer. L'autre avantage est qu'il n'est pas nécessaire d'orienter le capteur suivant le soleil [12].



Fig. 2.4 Capteur plan

### ✓ Capteurs à Concentrations

Quand les températures plus élevées sont exigées, des capteurs solaires à concentration sont utilisés. Ils utilisent l'énergie solaire arrivant sur une grande surface réfléchissante, et réfléchie sur une plus petite surface avant qu'elle ne soit convertie en chaleur qui entraînerait de températures plus élevées.

La plupart des collecteurs à concentration peuvent seulement concentrer le rayonnement solaire parallèle venant directement à partir du disque du soleil (rayonnement direct), donc ils doivent suivre le mouvement apparent du soleil. On constate de manière évidente que leur utilisation restera très limitée (entre 1500 et 1700 heures d'ensoleillement par an en moyenne) [13].

Les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire sont :

### ✓ Concentrateurs cylindro-paraboliques

Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur.

Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple axe ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400(C°) [14].



**Fig. 2.5** Concentrateur cylindro-parabolique

✓ **Concentrateurs paraboliques**

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée.

Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500(C°)) sur le récepteur [15].



**Fig. 2.6** Concentrateur parabolique

### ✓ **Système de centrale à tour (héliostat)**

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaire à double axe qui dirige l'énergie du soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour. Ces capteurs possèdent un ensemble de grands miroirs qui suit le mouvement du soleil. Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur le récepteur en haut de la grande tour.

Un ordinateur garde les miroirs alignés afin que les rayons du soleil, qui sont réfléchis, visent toujours le récepteur, où la température peut dépasser 1000 (C°) [16].



**Fig. 2.7** Système de centrale à tour

### **2.4.1. Différents types de PVT**

Il existe différents types de systèmes d'énergie solaire hybrides qui dépendent d'un processus distinct.

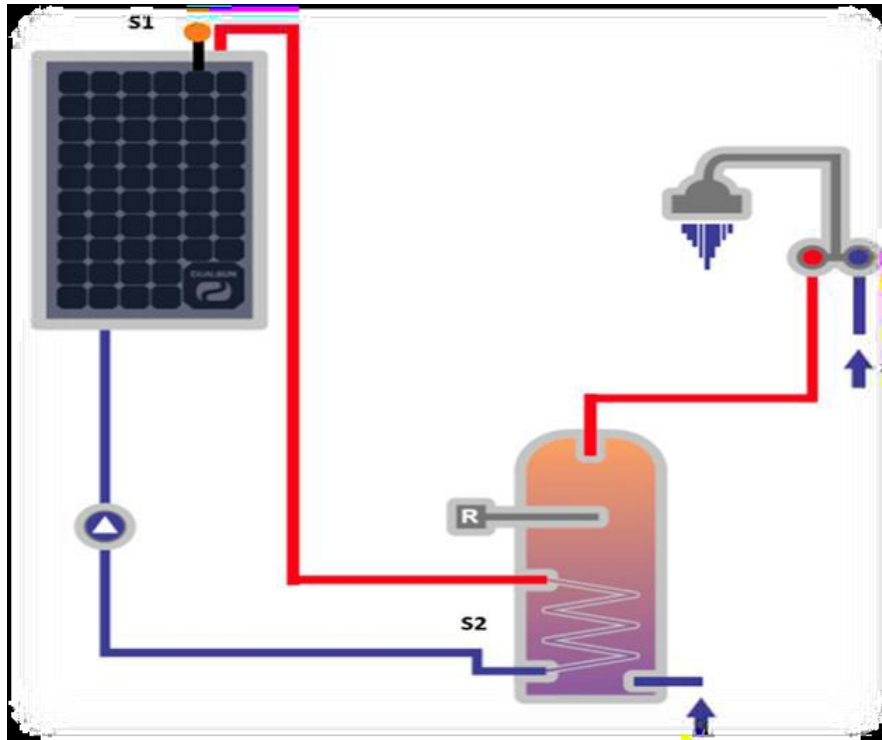
#### **2.4.1.1. Panneaux solaires hybrides PV/TH à eau**

Dont les capteurs solaires sont dotés d'un échangeur thermique à eau. L'eau chaude est alors utilisée pour l'eau chaude sanitaire [17].

### ✓ **Principe de fonctionnement**

Les capteurs disant hybrides à eau sont des capteurs photovoltaïques pourvus d'un échangeur de chaleur à eau permettant à la fois de refroidir le panneau et de produire de l'eau, chaude. Cette eau chaude peut être destinée à la production d'eau chaude sanitaire (schéma ci-contre) voire de chauffage. Cette solution a l'avantage de combiner production d'électricité et de chaleur sur un seul et même panneau. Le refroidissement des panneaux grâce au circuit d'eau permet une légère augmentation de leur rendement par rapport à une installation intégrée « classique ».

Pour augmenter la puissance électrique et optimiser la rentabilité, des panneaux photovoltaïques classiques de même apparence sont généralement mis en complément aux panneaux hybrides [18].



**Fig. 2.8** Panneau solaire hybride PV/T à eau

#### 2.4.1.2. Panneaux solaires hybrides PV/T à air

Ces Panneaux récupèrent l'air chaud des panneaux solaires pour chauffer la maison il s'agit des panneaux aérovoltaiques.

##### ✓ Principe de fonctionnement

Les systèmes photovoltaïques sont des collecteurs photovoltaïques, dont la face arrière est ventilée pour la récupération et la diffusion de l'air chaud dans la maison et / ou entrée d'air dans un ballon thermodynamique. La ventilation du panneau permet une ventilation accrue efficacité par rapport à une installation tout-en-un "classique".

Les panneaux solaires aérovoltaiques combinent deux technologies [18].

- ❖ La technologie photovoltaïque pour produire de l'électricité
- ❖ La technologie thermique pour produire de la chaleur.

C'est également ce que l'on appelle des panneaux solaires hybrides PV/T à air. L'aérovoltaique est un mixte de panneaux solaires photovoltaïque qui produisent de l'électricité et de panneaux solaires thermique pour chauffer l'habitation (panneaux solaires2 en 1) Lorsqu'un panneau photovoltaïque est éclairé par le soleil, il chauffe. En moyenne, un panneau solaire produit 3 fois plus de chaleur au niveau de sa face arrière que d'électricité, et ce quelle que soit la saison.

L'avantage du panneau aérovoltaique, c'est qu'il récupère cette chaleur. La création de chaleur est en plus amplifiée grâce à un sas placé sous les capteurs solaires. L'air chaud

est récupéré par un module de ventilation et est ensuite diffusé dans l'habitation grâce à un système de VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée).

#### 2.4.1.3. Capteurs PV/T de concentration

Afin d'améliorer la performance du capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T, beaucoup d'effort a été consacré sur la recherche et le développement de la technologie du système hybride photovoltaïque thermique PV/T. L'augmentation de l'éclairement solaire influe positivement sur le rendement de la cellule photovoltaïque, L'une des modifications de conception est d'augmenter la performance du capteur, en ajoutant un système de concentration sur les côtés du capteur, les réflecteurs sont de forme rectangulaire ou cylindro parabolique [19].



**Fig. 2.9** Capteur solaire hybride PV/T à concentration

### 2.5. Travaux antérieurs concernant le séchage et les séchoirs solaires

Houhou Hatem [20] a déterminé les courbes de perte d'humidité relative, de la vitesse du séchage et de la température du produit pour le piment vert et la pomme de terre au cours de l'opération de séchage. Dans cette étude expérimentale effectuée au moyen d'un séchoir solaire de type indirect, qui fonctionne en mode de convection forcée. Dans ce travail il s'est intéressé à l'influence des quatre paramètres (la masse initiale, la disposition, la forme de découpage du produit et le changement de débit d'air sur la vitesse de séchage.

Dilip [20] a développé un nouveau type de séchoir à convection naturelle avec une unité de stockage thermique pour assurer l'air chaud pendant la période non ensoleillée. Ce type se compose d'un réchauffeur d'air plat, relié avec réflecteur de forme polygonale pour refléter le maximum du rayonnement solaire incident. Ce système est destiné pour le séchage de

l'oignon, avec une capacité de 90 kg. Cette opération est effectuée pendant un jour du mois d'octobre.

Khalil, Al-Juamily et al. [21] est basée sur l'efficacité thermique d'un séchoir solaire indirect à convection forcée, qui se compose de trois parties : collecteur solaire, chambre de séchage et un ventilateur. Ce type de séchoir est destiné à sécher certains produits tels que le raisin, abricot, et haricots. Des expériences ont été faites en fonction de trois débits différents respectivement 0.076, 0.063 et 0.046 m<sup>3</sup>/s. Le procédé expérimental indique que la température de l'air à la sortie du capteur, est le facteur le plus important et montre que lorsque le débit augmente la température diminue.

Boubeghal et al. [22] Les effets de différents paramètres (diamètre, la masse et la température) sur la cinétique de séchage de produite (pomme de terre).

#### ❖ Effet du diamètre du produit

Le diamètre du produit varie de 6 cm jusqu'à 10 cm, avec une masse de 8 kg et une température de l'air d'entrée de 60 °C. Elle montre que l'augmentation du diamètre du produit provoque l'augmentation de sa teneur en eau. Cela est dû à la diffusion de l'eau du produit.

#### ❖ Effet de la masse du produit

La masse du produit déposée sur chaque claie varie entre 4 kg et 12 kg. On voit que la température du produit de 4 kg est plus élevée qu'à 12 kg pour un temps fixé et une claie désigné. L'évolution de la température de l'air d'entrée dans l'enceinte de séchage permet à ce dernier d'obtenir plus d'humidité, ce qui diminue sa température, et cela s'explique que la température du produit de la première claie est plus élevée que celle de la dixième claie.

#### ❖ Effet de la température de l'air chauffé à l'entrée de l'enceinte de séchage

La température de l'air d'entrée varie de 50 à 70 °C avec un diamètre du produit de 6 cm et une masse de 8 kg. La teneur en eau pour une température de l'air d'entrée de 50 °C est inférieure à celle de l'air à 70 °C. Ceci explique que l'augmentation de la température de l'air d'entrée, qui permet de diminuer le temps de séchage.

**Tableau 2.2** Quelque travail sur le séchage thermique de pomme de terre.

Chercheur	Paramètre étudié	Type de séchoir	Temps de séchage
E. kavak akpinar 2005	Température de l'air 60,70 et 80c° Vitesse d'air 1 et 1.5 m/s	Etuve univ turkey	600 à 720 min
L. Hassini et al 2007	Température de l'air 40,55 et 80c° Vitesse d'air 1 et 1.5 m/s Humidité relative 5,15 et 25%	Boucle de séchage Univ Tunisie	500 min

d. Fahloul et al 2009	Température 55. 65. 75 c° Pression 20. 40. 60 cm Hg Découpe rondelle 3.5 mm	Etuve Sous Vide Univ batna	100 à 250 min
s. Chouicha 2013	Vitesse d'air 0.51 m/s Humidité 5.22 à 5.25 masse d'eau/masse séché	Séchoir solaire Indirect Univ Ouargla	165 min
O. Badaoui 2013	Température 65 c° Epaisseur 0.3 cm	Séchoir solaire Indirect UCED Tipaza	200 min

EL khadraoui et al. [23] un nouveau séchoir solaire en mode mixte de type serre, a été mis au point pour le séchage de piment rouge. Le séchoir est constitué d'un capteur solaire à air plan et une serre mono-chapelle. Ce type de séchoir à été conçu et réalisé dans le centre de recherche et des technologies de l'Energie (CRTEN) de Borj Cedria (nord de la Tunisie) : Latitude 36°43'N et Longitude 10°25'E. L'efficacité du séchage solaire, est déterminée par une étude comparative entre le séchage dans le séchoir solaire, et à l'air libre. Le présent système de séchage solaire entraine une diminution de la durée de séchage de piment d'environ 7h. Le temps de retour de l'investissement (1.02 an) est très court comparé à la durée de vie du séchoir estimé approximativement à 20 ans ; d'où l'intérêt d'utilisation de ce genre de séchoir.

### Reference

- [1] Boughali Slimane., Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agroalimentaires, thèse de doctorat, universite Hadj Lakhdar Batna, 2010.
- [2] Bensedik A., Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée. Mémoire de magister. Université Abou-BekrBelkaid-Tlemcen. 2011.
- [3] Technique de l'ingenieur-génie des procédés séchage par André charreau et Roland cavaillé,j 2480-2 ;2480-22.
- [4] Chalal N., Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Mémoire de magister. Université Mentouri-Constantine, 2007.
- [5] Boukadoum née Boulemtafes Amel, Le séchage solaire des produits agricoles, Attachée de Recherche, Projet Séchage solaire, Equipe Systèmes Solaires à Basses temperatures , Division Energie Solaire Thermique et Géothermie, No. 21, 2011.
- [6] Dagenet Michel., Les séchoirs solaires : théorie et pratique. 1985.
- [7] Madhlope A., Jones S. A., and Kalenga Saka J. D., A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration, Renewable Energy, Vol. 27, 2001, pp. 27–37.

- 
- [8] Lahsasni M., Kouhila M., Mahrouz A., Idlimam and Jamali A., Thin layer convective solar drying an mathematical modeling of prickly pear peel, *Energy*, Vol. 29, 2004, pp. 211-244.
- [9] Bala B. K., Mondol M. R. A., Biswas B. K., Daschowdury B. L and Janjai S., Solar drying of pineapple using solar tunnel drier, *Renewable Energy*, Vol. 28, 2003, pp. 183-90.
- [10] Simatc I. N., Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryers, *Renewable Energy*, Vol. 28, 2003, pp. 435 – 453.
- [11] Pangavhanc D. R., Sawhcy R. L and Sarsavadia P. N., Design, development and performance testing of new natural convection, *Energy*, Vol. 27, 2002, pp. 579-590.
- [12] Zeghib Ilhem., Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique. 2005.
- [13] Audibert M., la concentration du rayonnement solaire. International centre for theoretical physics, 3 séminaire sur l'énergie solaire , 6-17 Septembre 1982.
- [14] Jacques Pereebois., Energie solaires, perspectives économiques, Edition du centre National de la recherche scientifique ,1975 .
- [15] Paul De Neye., Energie solaire thermique, Guide des Energies Renouvelables, mai 2003.
- [16] Alain Ferriere et Gilles Flamant., Captation, Transformation et conversion de l'énergie Solaire par la technologie à concentration. Thème7, Solaire thermique 2002.
- [17] Ramdani H., Etude d'un Capteur Solaire Photovoltaïque/Thermique à Base de Nano-fluide. Université 8 Mai 1945 Guelma. 2016.
- [18] Khelifa A., Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT. Thèse de doctorat de science en physique, université de Batna. 2017.
- [19] Paradis P. L., Modélisation et mesures expérimentales sur un collecteur solaire hybride PV/T couplé à une pompe à chaleur au CO<sub>2</sub>. Doctoral dissertation, École de technologie supérieure Québec Canada. 2019.
- [20] Houhou H., Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits Agro-alimentaires. Mémoire de magister. Université Mohamed Khider – Biskra. 2012.
- [21] Boussalia Amar., Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Mémoire Magister, Université Mentouri – Constantine. 2010.
- [22] Boubeghal A., Benhammou M., Omari B., Amara S., Amer L., Mounzar H. et Ouejdi S., Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle. *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, Tlemcen*, 2007, pp. 315–320.

- 
- [23] Aymen ELkhadraoui., Sami Kooli., Abdelhamid Farhat., Etude expérimentale de la performance d'un séchoir solaire de type serre : séchage de piment. 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage (SMSTS'2015).

---

# Chapitre

## 3

### *Description du séchoir solaire et paramètres de mesures*

---

#### 3.1 Introduction

Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplés. Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas forcément sa vaporisation – pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. – et qu'on appellera d'une façon générale « déshydratation ». [1]

Les éléments constituant le séchoir solaire (le panneau solaire, le couvert en bois, ventilateur, l'air intérieur) et d'autre part entre ces éléments et les variables liées aux conditions climatiques externes (rayonnement solaire, température ambiante, vitesse du vent, humidité, etc. D'autres facteurs spécifiques au microclimat de la région doivent être pris en considération (la direction et amplitude de variation des vents, les phénomènes tel que le brouillard, la brume, humidité, etc.). Nous avons procédé à une série d'expérimentations où les températures, les humidités relatives à l'extérieur et à l'intérieur du séchoir, les températures des éléments du séchoir et les différentes composantes du rayonnement sont mesurées.

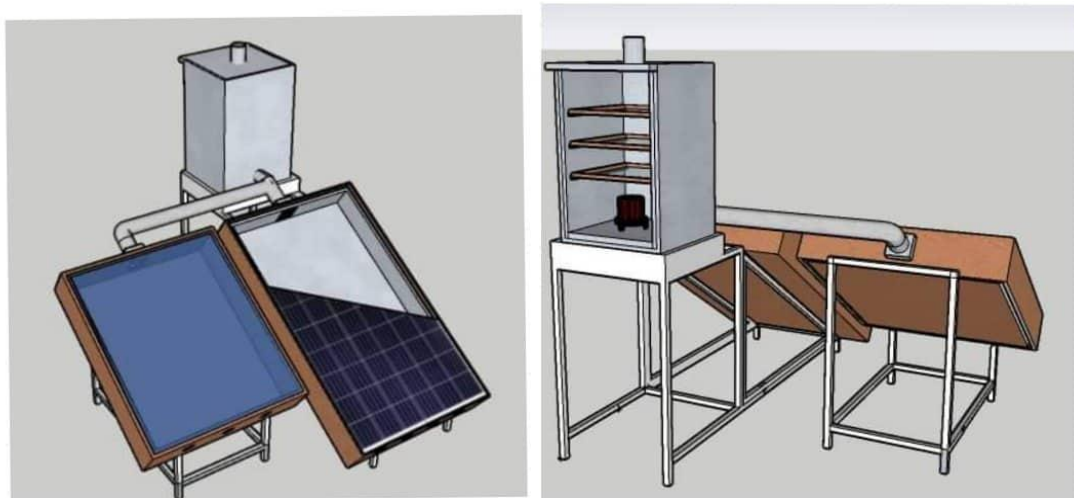
Les mesures sont prises pour différents produits agroalimentaires pour permettre d'analyser et de caractériser l'évolution des variables d'états, et des flux radiatifs, et par conséquent déterminer le bilan énergétique et thermique du séchoir solaire.

### 3.2 Site de l'installation

L'installation, réalisée avec la contribution dans le laboratoire d'Energie et l'Energie Renouvelable de département de la physique de la faculté des sciences de M'sila, a fait l'objet des essais expérimentaux et de mesures est localisée sur la terrasse du laboratoire, située sur le littoral atlantique (latitude  $35^{\circ}42'20''N$ , longitude  $4^{\circ}32'30''E$ ) à une altitude de 477 m où règne un climat de type méditerranéen.

Le dispositif expérimental mis en œuvre au cours de notre étude est composé d'un séchoir solaire indirect convectif partiellement solaire constitué des éléments principales; chambre de séchage, panneau photovoltaïque hybride et effet de serre. Ce séchoir utilise trois entités: le séchoir solaire, les instruments de mesures et le système d'acquisition des données.

Le séchoir qu'on se propose d'étudier est de type indirect. La couverture du séchoir est constituée d'un panneau photovoltaïque dans la face supérieure et des bois dans les quatre latérales et au-dessous de PV de profondeur 23 cm. La figure 3.1 ci-dessous schématise une vue en perspective de séchoir utilisé.



**Fig. 3.1** Séchoirs solaires prototypes

Le séchoir contient les éléments suivants :

✓ **Unité de production d'air chaud**

L'unité de production d'air chaud constituée d'un l'effet de serre, de surface  $1,64\text{ m}^2$ , incliné de  $35^{\circ}$  (latitude de la ville de M'sila) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. Le couvert de panneau solaire hybride est en bois est peint en noir. L'isolation thermique, d'épaisseur 20 mm, est en polystyrène.



**Fig. 3.2** Effet de serre

✓ **Chambre de séchage**

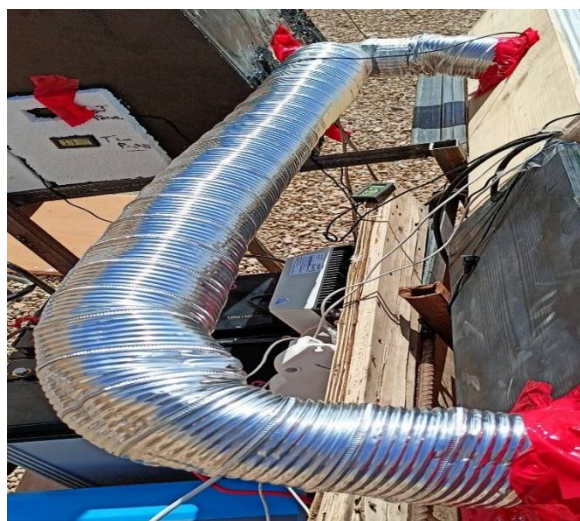
La chambre de séchage est une pièce de de hauteur utile 69 cm, de profondeur 42 cm et de largeur 43,5 cm. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polyuréthane de 20 mm d'épaisseur. A l'intérieur de cette cuillère, on dispose d'un chariot mobile sur des rails et contenant trois claies (étagères) sur lesquelles on étale le produit à sécher. Un ventilateur qui distribue l'air à l'intérieur de la chambre de séchage pour accélérer le processus de séchage.



**Fig. 3.3** Chambre de séchage

✓ **Conduite d'aspiration aéraulique**

Cette conduite est constituée d'un tunnel de section dans le sens de sa hauteur. Ce conduit assure le transport de l'air chaud vers la chambre de séchage.



**Fig. 3.4** Conduite d'aspiration (combinaison PV /T, effet de serre, et chambre de séchage)

### ✓ Armoire de commande

Qui régit un système électrique comprenant un ventilateur c'est un élément qui permet de créer un écoulement forcé transformé l'air chaud de PV/T vers la chambre de séchage.



**Fig. 3.5** Armoire de commande

### ✓ Unité de production d'énergie

C'est un panneau solaire hybride ce dispositif électrothermique est placé juste à côté d'effet de serre, de surface  $1,64 \text{ m}^2$ , incliné de  $35^\circ$  (latitude de la ville de M'sila) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. En aval du ventilateur et au niveau de l'ouverture par où entre l'air caloporteur dans le conduit de séchage. Cette unité assure l'énergie électrique aux accessoires et un chauffage d'appoint en cas d'insuffisance d'effet de serre.



**Fig. 3.6** Panneau solaire hybride

### ✓ Le support

Le support est un élément qui porte le dispositif. Il est procédé en cornières soudés à l'arc électrique pour diminuer le poids et faciliter la mobilité et le stockage. C'est la partie qui recueille toutes les pièces de l'appareil, sa hauteur est d'un mètre, 52centimètres de longueur et 61 de large.



**Fig. 3.7** Support



**Fig. 3.8** Vue en perspective du séchoir

### 3.3 Instruments et paramètres mesures

#### 3.3.1 Introduction

L'installation du séchoir est composée d'un ensemble d'instruments permettant de mettre en place un dispositif expérimental capable de suivre et d'analyser, en temps réel, l'évolution des variables énergétiques et thermiques : les variables énergétiques concernant les différents flux solaires, et celles thermiques concernant les températures des éléments du séchoir, la température ambiante, l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir, la vitesse et la direction du vent, etc.

##### ✓ Station météo

La station météo complète de type Davis instruments est l'appareil utilisé dans cette étude, dont la liaison entre les capteurs extérieurs (ISS) et la console se fait par ondes radio sur la fréquence 868.0 – 868.6 MHz avec une portée de 300 mètres au maximum. La console est équipée d'un large écran LCD rétro-éclairé, elle peut être fixée contre un mur ou posée sur une table ou une étagère. La console permet de visualiser les conditions météo en temps réel, les extrêmes (maxi et mini), les graphiques correspondant aux différentes variables. Il est également possible de régler des alarmes et de connecter la console sur un ordinateur (avec l'interface WeatherLink non fournie).



**Fig. 3.9** Station météorologique de type Davis.

L'ISS est très robuste et peut être installée sur un mât (tube) ou sur un poteau en bois. Une double sonde pour mesurer la température et l'humidité extérieure est placée

dans un abri anti radiations (solaires) normalisé. Le pluviomètre est équipé d'un système à 2 augets basculants pour mesurer les précipitations. L'anémomètre - girouette peut être désolidarisé de l'ISS pour être installé sur un toit par exemple grâce à son câble de 12 mètres [3].

Cette station permet de mesurer :

- ❖ La température intérieure - Résolution 0,1°C.
- ❖ La température extérieure - Résolution 0,1°C.
- ❖ L'humidité intérieure – Résolution : 1%.
- ❖ L'humidité extérieure – Résolution : 1%.
- ❖ La pression atmosphérique - Résolution : 0,1 h Pa.
- ❖ L'indice de chaleur - Résolution 1°C.
- ❖ La vitesse du vent de 3 à 241 km/h - Résolution 1 km/h.
- ❖ La direction du vent - Résolution 1°.

Un kit classique pour la station, permet d'exploiter très finement les données collectées par les stations météo Vantage Pro2. Ce kit comprend un enregistreur de données (datalogger) qui fonctionne en mode connecté à un PC, et un logiciel d'exploitation Weather-Link. Il est possible de consulter en temps réel les données climatiques ou en mode non connecté [2].

#### ✓ Capteur d'humidité

L'humidité exprime la présence d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau dans l'air ambiant. Quand on parle de mesure d'humidité, on fait allusion au taux d'humidité exprime en % qui correspond à l'humidité relative. Le taux d'humidité est étroitement lié à d'autres grandeurs physiques, telles que la température et la pression.



**Fig. 3.10** Capteur d'humidité

### ✓ Capteur de température

Les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Il est constitué de deux métaux différents, liés l'un à l'autre à une de leur extrémité, produisant ainsi un courant dont la tension varie selon la température. Le changement de tension est mesuré et interprété par un régulateur électronique, la mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck (c'est un effet thermoélectrique). Leur principal défaut est leur imprécision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une incertitude inférieure à  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3].



**Fig. 3.11** Capteur de température

### ✓ Régulateur de charge

Le régulateur de charge/décharge est associé à un générateur photovoltaïque, il a pour rôle, entre autres, de contrôler la charge de la batterie et de limiter sa décharge. Sa fonction est primordiale car elle a un impact direct sur la durée de vie de la batterie.

Fonctionnement : Régulation PWM (Pulse Width Modulation)

Le régulateur est inséré entre le champ photovoltaïque et la batterie. Il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (diode).

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique s'effectuent à une certaine fréquence, ce qui permet de réguler le courant de charge en fonction de l'état de charge avec précision.

Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de limitation du régulateur, l'interrupteur est fermé. La batterie se charge alors avec le courant correspondant à l'ensoleillement. On est en phase "Bulk".

Lorsque la tension batterie atteint un seuil de régulation prédéterminé, l'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe pour maintenir un courant moyen injecté dans la batterie. La batterie est chargée, on est en phase "Floating".



**Fig. 3.12** Régulateur de charge

### ✓ Batterie

Une batterie d'accumulateurs appelé plus communément batterie, est un assemblage d'accumulateurs électrochimiques.

Un accumulateur électrochimique est un "générateur réversible", il peut stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation.

Cette réaction est activée au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte, lorsqu'une charge est branchée à ses bornes.

L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible et donc rechargeable, contrairement à une pile.

Cette capacité nominale ( $C_n$ ) est généralement donnée pour un régime de décharge en 10h ( $C/10$ ). Pour une batterie de démarrage on parlera plutôt d'un régime de décharge en 5h ( $C/5$ ) et pour une batterie à décharge lente (solaire) le régime de décharge sera donné à courant constant sur 100h ( $C/100$ ).



**Fig. 3.13** Batterie

### ✓ Onduleur

Un onduleur solaire pour site isolé à pour fonction principale de convertir une tension continue comme celle d'une batterie en tension alternative semblable.

En pratique, l'onduleur est composé d'un ensemble de composants actifs (interrupteurs électroniques) et de composants passifs (transformateur).

L'onduleur doit tolérer une large plage de tension en entrée (-10% à +30%) à cause des variations de tension nominale de la batterie selon les différentes conditions de fonctionnement.



**Fig. 3.14** Onduleur

### ✓ Variateur

Un variateur électronique de vitesse (en anglais, *variable frequency drive* ou *VFD*) est un dispositif destiné à régler la vitesse et le couple d'un moteur électrique à courant alternatif en faisant varier respectivement la fréquence et le courant, délivrées à la sortie de celui-ci, on l'utilise pour contrôler la vitesse des ventilateur.



**Fig. 3.15** Variateur

✓ **Balance électronique**

La balance électronique est un instrument de mesure parfait pour déterminer le poids des produits agroalimentaires grâce à sa résolution de 1 g et à sa précision de  $\pm 0,1$  % du fond d'échelle.



**Fig. 3.16** Balance électronique

**Références**

- [1] <http://www.msila-dz.org-geoportail.php>
- [2] Haddad Zakaria, Contribution à l'étude de nouvelles technologies, thèse de doctorat, université des frères Mentouri Constantine 1, 2020
- [3] Étalonnage absolu d'un thermocouple « l'effet Seebeck » : Etude expérimentale, ISSN : 2028-9324 Vol. 9, No. 1, Nov. 2014.

---

# Chapitre

## 4

### *Préparation et séchage des produits alimentaires -Résultats et discussions-*

---

#### **4.1. Introduction**

Cette partie est dédiée à une approche expérimentale du séchage sous étuve à différentes températures pour des matrices végétales, La menthe, et la tomate. Les cinétiques de séchage obtenues seront traitées par une modélisation primaire et empirique.

#### **4.2. Séchage de la menthe**

##### **4.2.1. Généralité sur la menthe**

La menthe appartient à la famille des Lamiacées comme de nombreuses autres plantes aromatiques telles que le thym, le basilic ou encore la lavande. Elle comprend environ 3000 espèces, Les menthes forment un genre (*Mentha*) et ce genre comprend environ 70 espèces dont certaines sont très connues telle que la menthe pouliot qui éloigne les fourmis [1].

La menthe est une plante vivace appartenant à la famille des labiées. La menthe est présente dans plusieurs régions qui sont considérées comme ses pays d'origine. Ainsi, la liste comprend l'Afrique du Nord, l'Asie et l'Europe mais elle s'est répandue à travers le monde entier.



**Fig. 4.1** Représentation de la menthe

#### 4.2.2. Utilisation de la menthe

La production mondiale de menthe est modeste, comparativement aux spéculations agricoles alimentaires, mais sa valorisation en termes d'exploitation des huiles essentielles extraites est l'une des plus importantes parmi les produits agricoles. Plusieurs industries sont dépendantes des produits extraits à partir de la menthe [2].

La menthe poivrée est cependant l'espèce la plus utilisée en phytothérapie. La menthe est une plante efficace pour lutter contre les flatulences ou l'intestin irritable. Utilisée par voie cutanée, elle permet de réduire les douleurs musculaires, les maux de tête et de lutter contre les petites démangeaisons (piqûres de moustique, eczéma, etc.).

#### 4.2.3. Composition chimique de la menthe

Pour 100 g menthe :

**Tableau 4.1** Composition chimique de la menthe [3].

Composants	Quantité
Eau	82.8 (g)
Protéines	3.54 (g)
Lipides	0.84 (g)
Acides gras saturés	0.22 (g)
Glucides	5.3 (g)
Sucre	5.3 (g)
Fibres	7.4 (g)

#### 4.2.4. Préparation du produit

La menthe a été prélevées dans les fermes locales et nous avons choisi les branches minces et longues, puis les avons lavées manuellement avec de l'eau pure pour éliminer les impuretés et les résidus d'autres contaminants. Enfin, étaler sur l'étagère d'une manière qui laisse les feuilles intactes les unes sur les autres.

#### 4.2.5. Protocole de séchage (produit à sécher)

Après la préparation du produit (menthe) et l'étaler sur la grille du séchoir, la perte de poids est insérée au niveau plateau suivi d'un départ jusqu'à la fin de l'expérience. Le produit est pesé avant et après l'opération de séchage en utilisant la balance électrique (taux d'erreur de  $\pm 5$  g). Le processus de séchage est terminé lorsqu'il atteint l'humidité relative dans l'équilibre du produit. Après un temps nécessaire, nous avons obtenu du menthe séchée avec une teneur en eau à base sèche de 150 g en eau /91 g après séchage. Noun avons sécher naturellement la Menthe, on a eu une teneur en eau à base sèche naturelle de 60 g en eau /28 g après séchage avec une couleur noir.



**Fig. 4.2 a)** Préparation et **b)** séchage de produit (Menthe)

Le processus de séchage a été réalisé dans la région de pôle universitaire de M'sila avec une faible humidité et une chaleur élevée. On a décrit la température et de l'humidité de l'appareil pendant le processus de séchage de la menthe.

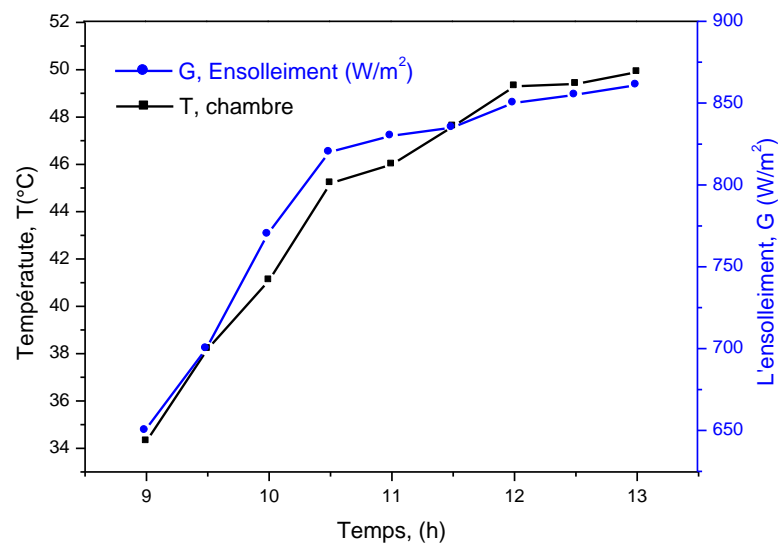
La figure. 4.3 présente la variation de la température de chambre de séchage selon ensoleillement et le temps, le 24/05/2022, où la température ambiante de 32.3°C, d'humidité 20% (matin), et vitesse de vent 11 Km/h.

On observe une augmentation dans la température de la chambre de séchage atteint 49.9 degrés à 13h :00mn. Lorsque l'ensoleillement est maximal. Alors la température de la chambre de séchage augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement, ce qui implique une diminution de la masse également de 150 grammes à 91 grammes en 4

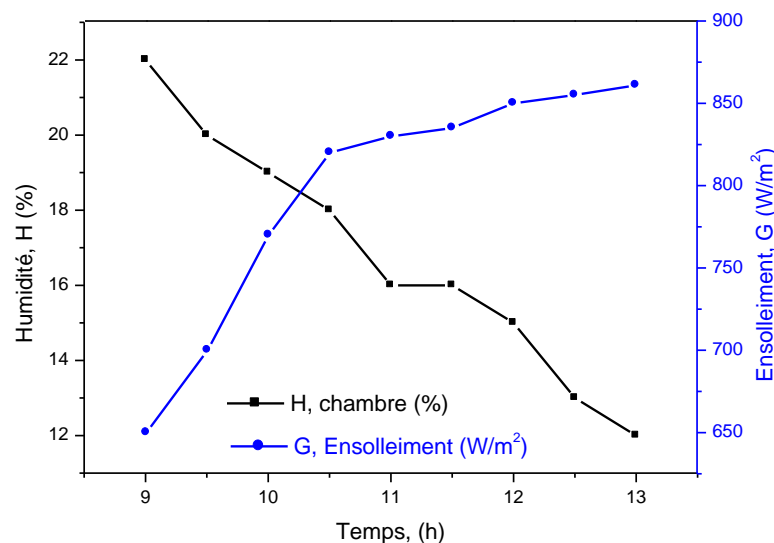
heures. La figure. 4.4 présente la variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2022 du produit de la menthe. On remarque qu'il y a deux phases :

-la première phase, l'humidité de produit est maximale au début de séchage, pour un ensoleillement faible (l'effet de l'humidité externe), l'humidité atteint 22% à 9h pour un ensoleillement de  $650 \text{ W/m}^2$  le matin.

-La deuxième phase une décroissance relative entre teneur en eau et l'ensoleillement, lorsque une diminution de quantité de teneur en eau de 18 % à 10h :30mn jusqu'à la valeur 12% à 13h. C'est-à-dire une diminution de la masse de la Menthe séchée.



**Fig. 4.3** Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2022 (Menthe).



**Fig. 4.4** Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2022 (Menthe).

### 4.3. Séchage de la tomate

#### 4.3.1. Généralité sur la tomate

La tomate est une plante annuelle buissonnante, poilue et qui renferme des tiges plutôt grimpantes, elle est aromatique lorsqu'on la froisse, cette plante potagère herbacée à une taille qui varie de 40cm jusqu'à 5 mètres selon les variétés et le mode de culture.

La tomate est un aliment très peu énergétique mais qui présente une bonne densité nutritionnelle avec 94% d'eau et 6% de matière sèche, Cette dernière renferme de nombreux constituants majeurs tels que le sucre 50%, acides organiques, fibres, caroténoïdes et autres métabolites secondaires, ce fruit est également une bonne source d'oligoéléments et de minéraux, elle apporte beaucoup de potassium, et de vitamine C. Sa composition en antioxydants et lycopène permet d'éviter l'oxydation et diminuer le risque de maladie cardiovasculaire et le cancer [6].



**Fig. 4.5** Représentation de la tomate

#### 4.3.2. Utilisation de la tomate

- ❖ la tomate est un aliment diététique, très riche en eau (93 à 95 %) et très pauvre en calories (18 à 20 kcal pour 100 grammes), riche en éléments minéraux et en vitamines (A, C et E) [6].
- ❖ Le marc de tomate, sous-produit de la transformation industrielle des tomates, est parfois utilisé comme aliment du bétail.
- ❖ Le purin de tomate, obtenu par macération de feuilles et tiges dans l'eau, serait efficace au jardin pour prévenir ou éloigner certains insectes parasites, notamment les pucerons.

- ❖ Selon Une pratique traditionnelle une feuille de tomate froissée frottée sur la peau contribuerait à calmer la douleur en cas de piqûre d'insecte.
- ❖ Le jus de tomate constitue un bon remède contre l'odeur pestilentielle du putois (ou mouffette). Toutefois, pour être vraiment efficace, le jus doit sécher sur le poil de l'animal (le chien), puis être rincé.
- ❖ La tomate aurait un usage traditionnel de phytothérapie notamment grâce à sa teneur en pigments caroténoïdes antioxydants.

#### 4.3.3. La composition chimique de tomate

Pour 100 g tomate [6] :

**Tableau 4.2** Composition chimique de tomate

Composants	Quantité
Valeur calorifique	20 kcal
Eau	93 g
Protide	1 g
Fibre	1,2 g
Glucide	4 g
Calcium	11 mg
Potassium	280 mg

#### 4.3.4 Préparation du produit

La tomate a été achetée du marché local et nous avons choisi tomates fraîches puis les avons lavées manuellement avec de l'eau pure pour éliminer les impuretés et les résidus d'autres contaminants. Enfin, couper et étaler sur l'étagère d'une manière qui laisse les tranches intactes les unes sur les autres.



**Fig. 4.6** Coupage des tomates

#### 4.3.5. Protocole de séchage (produit à sécher)

Après la préparation du produit (la tomate) et l'étaler sur la grille du séchoir, la perte de poids est insérée au niveau plateau suivi d'un départ jusqu'à la fin de l'expérience.

Le produit est pesé avant et après l'opération de séchage en utilisant la balance électrique (taux d'erreur de  $\pm 5$  g). Le processus de séchage est terminé lorsqu'il atteint l'humidité relative dans l'équilibre du produit. La température ambiante, les mesures de réception et la température sont mesurées à l'extérieur de la chambre de séchage et la vitesse du vent toutes les 30 minutes. À la fin du processus de séchage, les échantillons sont autorisés à refroidir à température ambiante normale, puis placés dans des sacs en plastique. Après un temps nécessaire, nous avons obtenu du tomate séchée avec une teneur en eau à base sèche de 710 g en eau /139 g après séchage.



**Fig. 4.7 a) Préparation et b) séchage de produit (Tomate).**

Le processus d'étude, qui se suit est une étude de la température et de l'humidité de la chambre de séchage pendant le processus de séchage de la tomate.

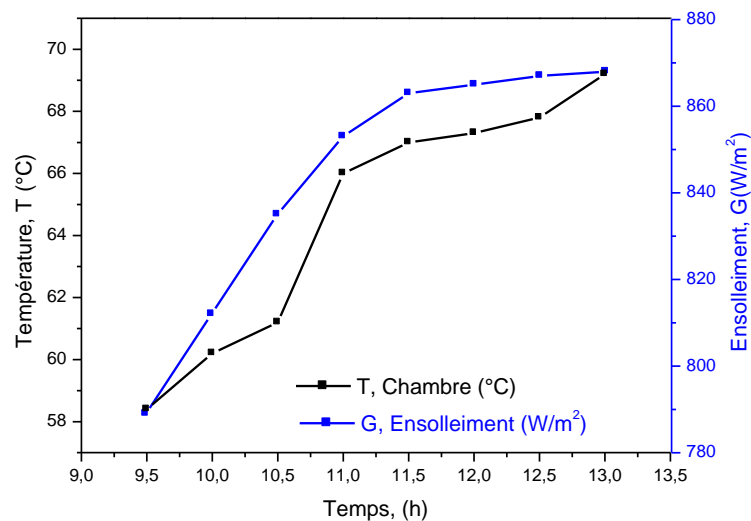
La figure. 4.8 présente la variation de la température de chambre de séchage selon ensoleillement et le temps, le 23/05/2022, la température ambiante de 35°C, d'humidité 22% (matin), et vitesse de vent 11 Km/h.

On observe une augmentation dans la température de la chambre de séchage atteint 69.2 degrés à 13h :00mn. Lorsque l'ensoleillement est maximal. Alors la température de la chambre de séchage augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement, ce qui implique une diminution de la masse également de 710 grammes à 139 grammes en 4

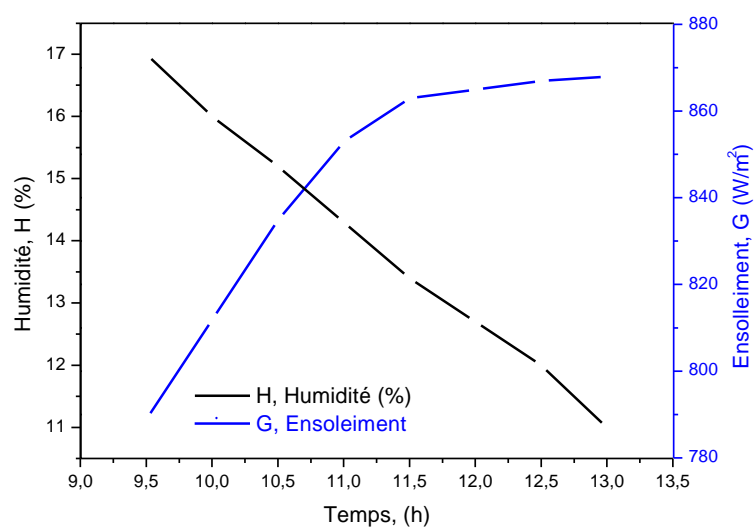
heures. La figure. 4.9 présente la variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 23/05/2022 du produit de la tomate. On remarque qu'il y a deux phases :

-la première phase, l'humidité est maximale au début de séchage, et pour un ensoleillement faible (matin), l'humidité est 18% de 9h :30 mn pour un ensoleillement de  $789 \text{ W/m}^2$ , qui est (l'air ambiante) un peu chaud.

-La deuxième phase une décroissance relative entre teneur en eau et l'ensoleillement, lorsque une diminution de quantité de teneur en eau de 15 % à 10h :30 mn jusqu'à la valeur 11% à 13h :00 mn . C'est-à-dire une diminution de la masse de la tomate séchée [7,8].



**Fig. 4.8** Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 23/05/2022 (Tomate).



**Fig. 4.9** Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 23/05/2022 (Tomate).

#### 4.4 Conclusions

Après la réalisation et fabrication d'un déshydrateur hybride, et on a passé à la phase de séchage de quelques produits agroalimentaires expérimentalement pour déterminer la variation de la température, et de l'humidité de l'air dans la chambre de séchage et leur influence sur le la vitesse de séchage, et la variation de la température de produit séché.

Notre déshydrateur fonctionne indirectement montre que le temps de séchage prend beaucoup moins de temps que le séchage libre. A travers les courbes étudiées on conclue que le principe de base pour réaliser un produit séché est utilisable et correct est de connaître le taux d'eau et de travailler pour s'évaporer sous la température appropriée.

A travers les résultats précédents nous concluons que la cinétique de séchage de produit étudié dépendent aux paramètres suivants:

- Le type de produit à sécher
- La teneur en eau initial de produit.
- La zone de séchage.

#### Références

- [1] Medine.Ch.2015, la culture de la menthe
- [2] Gilly, 1989, les menthes cultivées
- [3] Benikhlef, A. "Comparaisant entre les huiles essentielles et leurs effets antibactériens sur Rosmarinus officinalis de la région de Bechar et Ouargla." Mémoire de Master en Agronomie option Amélioration de la Production Végétale. Université Abor Belkaid-Tlemcen. 16p (2014).
- [4] Derwich, Elhoussine, et al. Chemical composition and antibacterial activity of leavesessential oil of Laurus nobilis from Morocco. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2009, 3.4: 3818-3824.
- [5] Torgeson, Oscar W. "Kiln-drying schedules for 1-inch laurel, madrone, tanoak, and chinquapin." (1956).
- [6] Bénard, C. (2009). "Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en polyphénols chez la tomate."

- [7] Oussama Zaoui, Imane Sarrai, Djedid Taloub, Conception et fabrication d'un déshydrateur par un système aérovoltaique hybride (photovoltaïque-thermique, Mémoire Master 2, Université de M'sila, 2021.
- [8] Djegham, A., Taloub, D., Bouras, A, Experimental study of a dehydrator by a hybrid aerovoltaic system (photovoltaic- thermal), International conference on Mechanical Sciences ICMS'21 University Oum El Bouaghi 15th 16 November 2021.

---

## *Conclusion générale*

---

Ce mémoire avait comme objectif principal la conception et la réalisation d'un déshydrateur solaire indirect de performance électrique et thermique. A partir de cet objectif se découle les objectifs suivants :

- Mise en place d'un déshydrateur solaire indirect et d'un déshydrateur prototype répondant mieux aux hypothèses de séchage ;
- Mener des campagnes de mesures pour évaluer la conduite du séchoir ;
- Identifier les paramètres géométriques et climatiques influant la performance du séchoir ;

En utilisant les résultats expérimentaux pour les journées du 23 et 24 May 2022, nous avons arrivé à dégager quelques conclusions sont les suivants :

- Considérer le climat de la région autant qu'un élément déterminant le comportement du séchoir solaire ;
- Identifier les différentes composantes des flux solaires ;
- La surface sud inclinée du séchoir est la surface la plus réceptrice du rayonnement et de l'énergie quotidienne par unité de surface ;

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de suivre l'évolution thermique du séchoir. Les mesures ont été effectuées en été le mois de May 2022. Comparativement aux séchoirs existants dans le marché, le séchoir développé représente une très bonne performance. En effet, le séchoir permet d'avoir des températures à l'intérieur du séchoir qui dépasse celle de l'air ambiant de plus de 40 °C, l'humidité relative à l'intérieur du séchoir

descend au milieu des journées à des valeurs de moins par rapport à celle du milieu extérieur.

En ce qui concerne la validation de nos résultats expérimentaux, nous avons montré que nos résultats expérimentaux concordent très bien avec la réalité. Quant aux facteurs qui influencent sur le séchage, nous pouvons affirmer à la suite de nos travaux expérimentaux, que la durée de séchage dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer : la masse initiale du produit alimentaire à sécher, la température de séchage, la température de panneau solaire hybride, l'humidité et l'ensolleiment. En effet, pour une masse donnée du produit à sécher, les différents scénarios expérimentaux envisagée en jouant sur la masse initiale du produit, la température de séchage, le débit d'air asséchant et l'ensolleiment, ont permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres aérothermiques sur le processus de séchage.

Ces résultats permettent entre autres d'établir dans un travail ultérieur, la vitesse de séchage de toutes les variétés de produits agro-alimentaires rencontrées en Algérie.

En perspective, nous souhaitons prolonger nos travaux par :

- la détermination des cinétiques de séchage des plantes aromatiques et médicinales,
- l'étude de l'influence des autres paramètres du séchage sur la qualité du produit à sécher,
- l'étude d'un modèle économique pour estimer le coût du séchage solaire,
- Une attention particulière doit être portée à l'utilisation de séchoirs solaires hybrides dans les maisons en général,
- Augmentez la largeur, la longueur et la taille du séchoir solaire hybride pour augmenter la quantité de produit et utiliser des ventilateurs.

## Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés sur la conception et la fabrication d'un système aérovoltaique pour séchage des produits alimentaires et des plantes médicinales. Dans ces expériences, nous avons utilisé un séchoir solaire indirect, où dans ce dernier nous croyons la chaleur de la chambre de séchage par un panneau photovoltaïque hybride (thermoélectrique) atteint la température qu'il sorte du capteur hybride de 60.8-69.9 degrés Celsius combinai avec un effet de serre . L'objectif principal de ces expériences est d'utiliser l'énergie renouvelable gratuite (le soleil) pour étudier la cinétique de séchage et la teneur en eau. Les résultats obtenus dans cette étude étaient les suivants : pour sécher 150 gramme de la Menthe, la gamme de température désirée est de 41.1-49.9 °C durant 03 heures et pour 710 gramme de Tomate de 58.4-68.8 °C dans les circonstances 04 heures. Le but du procédé de séchage de ces produits est que l'utilisation large de ces produits et est séché, tout en préservant la valeur nutritionnelle du produit et de bonne qualité.

**Mots clés :** Capteur plan, énergie solaire, le panneau solaire PV, le panneau solaire PV/TH, cinétiques de séchage convectif, ensoleillement global, séchage des produits agroalimentaires.

## Abstract

In this memoir, we are interested in the design and manufacture of an aerovoltaic system for drying food products and medical plants. In these experiments, we used an indirect solar dryer, where in the latter we believe the heat from the drying chamber by a hybrid photovoltaic (thermoelectric) panel reaches the temperature it comes out of the hybrid collector of 60.8-69.9 degrees Celsius combined with a greenhouse effect. The main objective of these experiments is to use free renewable energy (the sun) to study drying kinetics and water content. The results obtained in this study were as follows: to dry 150 grams of Mint, the desired temperature range is 41.1-49.9 °C for 3 hours and for 710 grams of Tomato 58.4-68.8 °C under 4 hour circumstances. . The purpose of the drying process of these products is that the wide use of these products and is dried, while preserving the nutritional value of the product and good quality.

**Key words:** Flat panel collector, solar energy, the solar panel PV, the solar panel PV/TH, convective drying kinetics, global radiation, drying of agrifood products.

## ملخص

في هذه الرسالة، كنا مهتمين بتصميم وتصنيع نظام هوائي لتجفيف المنتجات الغذائية والنباتات الطبية. في هذا الابتكار، استخدمنا مجففًا شمسيًا غير مباشر، حيث نعتقد في هذا الأخير أن الحرارة تنتقل إلى غرفة التجفيف بواسطة لوحة هجينة كهروضوئية (كهر وحرارية) تصل إلى درجة الحرارة التي تخرج من المجمع الهجين من 60.8 إلى 69.9 درجة مئوية جنبًا إلى جنب مع الاحتباس الحراري. الهدف الرئيسي من هذا الابتكار هو استخدام الطاقة المتجددة المجانية (الشمس) لدراسة حركية التجفيف والمحتوى المائي للمنتجات المراد تجفيفها. كانت النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة كما يلي: لتجفيف 150 جرام من النعناع، تتراوح درجة الحرارة المطلوبة من 41.1 إلى 49.9 درجة مئوية لمدة 3 ساعات و 710 جرام من الطماطم من 58.4 إلى 68.8 درجة مئوية تحت ظروف 4 ساعات. والغرض من عملية تجفيف هذه المنتجات هو الاستخدام الواسع لهذه المنتجات وتجفيفها مع الحفاظ على القيمة الغذائية للمنتج وجودته الجيدة.

**الكلمات المفتاحية:** المجمع المسطح، الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية الكهروضوئية، الألواح الشمسية الكهروضوئية الهجين، حركيات التجفيف بالحمل الحراري، أشعة الشمس العالمية، تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية.