

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

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° : .....



DOMAINE : Sciences de la matière  
FILIERE : Physique  
OPTION : Physique Energétique  
et Energies Renouvelables

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Réalisé par:

**KHAZZAR Ali**

**OUNIS Amor**

**Intitulé**

**Contribution à l'étude expérimentale de séchage  
du poivron**

**Soutenu le 20/09 /2020 devant le jury composé de:**

Dr. HADDAD Zakaria

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Président

Dr. NAHOUI Azzedine

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Rapporteur

Dr. TOURKI Zohir

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2019/2020**

# REMERCIEMENTS

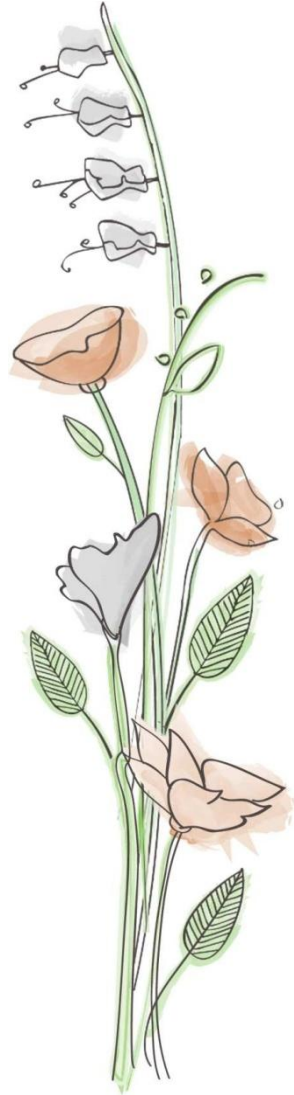
*Nos remerciements vont tout premièrement à « Allah  
» tout puissant  
pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous  
a donné pour  
terminer ce travail.*

*Nous remercions notre encadreur M<sup>r</sup>. NAHOUI  
AZZEDINE  
pour sa collaboration et pour son orientation  
avec nous.*

*Nous adressons nos remerciements à tous les  
orienteurs, tous ceux qui  
d'une façon ou d'une autre ont fait part de leur  
aide.*

*Nous exprimons nos remerciements  
aux membres du jury qui ont  
accepté de juger notre travail.*

*Merci*



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma chère mère et mon père*

*A mes frères et mes sœurs*

*A toute ma famille KHAZZR*

*A mon encadreur M<sup>r</sup>. NAHOUI Azzedine*

*et tous les personnes qui sons contribuer dans ce travail*

*A tous mes collègues et mes amis*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science  
pour le bien et la prospérité de l'humanité*

*KHAZZAR ALI*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma chère mère et mon père*

*A mes frères et mes sœurs*

*A toute ma famille OUNIS*

*A mon encadreur M<sup>r</sup>. NAHOUI Azzedine*

*et tous les personnes qui sons contribuer dans ce travail*

*A tous mes collègues et mes amis*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science  
pour le bien et la prospérité de l'humanité*

*OUNIS AMOR*

## Sommaire

**Sommaire**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des symboles**

**Introduction** ..... 1

### CHAPITRE I: Généralités sur le gisement solaire et l'énergie solaire

**I.1. GISEMENT SOLAIRE:** ..... 3

I.1.1. SOLEIL: ..... 3

I.1.2. CARACTERISTIQUES DU SOLEIL : ..... 3

I.1.3. PRESENTATION GENERALE : ..... 4

I.1.4. SYSTEME TERRE-SOLEIL : ..... 5

**I.2 ENERGIE SOLAIRE :** ..... 6

I.2.1. ENERGIE SOLAIRE ORIGINE: ..... 7

I.2.2. CARACTERES PARTICULIERS: ..... 7

I.2.3. CAPTATION: ..... 8

I.2.4.CONSTANTE SOLAIRE: ..... 8

**I.3. RAYONNEMENT SOLAIRE:** ..... 9

**I.4. DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENT SOLAIRE:** ..... 9

A) RAYONNEMENT DIFFUS : ..... 9

B) RAYONNEMENT DIRECT : ..... 10

**I.5. GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE:** ..... 11

### CHAPITRE II: Généralités sur le séchage et les séchoirs solaires

**II.1. SÉCHAGE :** ..... 13

II.1.1. DEFINITION: ..... 13

II.1.2. HISTORIQUE: ..... 13

II.1.3. HABITUDES DE SECHAGE EN ALGERIE : ..... 13

II.1.4. BUT DE SECHAGE: ..... 14

II.1.5. DOMAINE D'UTILISATION: ..... 14

II.1.6. PRINCIPE DE SECHAGE: ..... 15

II.1.7. DIFFERENTS METHODES DU SECHAGE: ..... 16

II.1.7.1. Séchage chimique:-----	16
II.1.7.2. Séchage thermique:-----	16
II.1.7.3. Séchage par ébullition-----	17
II.1.7.4. Séchage par entrainement:-----	18
II.1.8. CARACTERISTIQUES DE L' AIR DE SECHAGE:-----	18
II.1.8.1. Humidité :-----	18
II.1.8.2. Humidité absolue :-----	18
II.1.8.3. Humidité relative :-----	18
II.1.8.4. Temperature sèche :-----	18
II.1.8.5. Température humide du gaz :-----	19
II.1.9. CARACTERISTIQUES DES SOLIDES HUMIDES:-----	19
II.1.9.1. Humidité absolue :-----	19
II.1.9.2. Teneur en eau à base humide :-----	19
II.1.9.3) Taux d'humidité :-----	19
II.1.9.4. Taux d'humidité à l'équilibre :-----	19
II.1.10. ACTIVITE DE L'EAU :-----	20
II.1.10.1. Activité de l'eau dans un produit :-----	20
II.1.10.2. Transfert de masse d'un produit humide :-----	21
II.1.11. VITESSE DE SECHAGE :-----	21
II.1.11.1. Courbes De Sechage-----	22
II.1.11.2. Cinétique du séchage-----	22
II.1.11.3. Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide-----	23
<b>II.2. SÉCHOIRS SOLAIRES :-----</b>	<b>25</b>
II.2.1. CLASSIFICATION DES SYSTEMES DU SECHAGE SOLAIRE :-----	25
II.2.3. TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES:-----	25
II.2.3.1. Séchoirs solaires directs :-----	26
II.2.3.2. Séchoirs naturels (traditionnels) :-----	27
II.2.3.3. Séchoirs solaires indirects :-----	28
II.2.3.4. Différentes types de séchoirs solaires :-----	29
II.2.3.5. Séchoirs mixtes:-----	31
II.2.3.6. Séchoirs hybrides:-----	31
<b>II.3. CAPTEURS SOLAIRES :-----</b>	<b>31</b>
II.3.1. TYPES DE CAPTEURS SOLAIRES :-----	32
II.3.1.1. Capteurs solaires photovoltaïques :-----	32
II.3.1.2. Capteurs solaires thermiques :-----	32
II.3.2. CAPTEURS PLANS :-----	32

II.3.4. CAPTEURS PAR CONCENTRATION : ----- 34  
II.3.5. BILAN THERMIQUE DU CAPTEUR :----- 34  
II.3.6. RENDEMENT INSTANTANE D'UN CAPTEUR :----- 35

**CHAPITRE III : Produit sèche (le poivron)**

**III) PRODUIT A SECHER :----- 36**

III.1. POIVRON : ----- 36  
III.2. ORIGINE ET PRESENTATION GENERALE :----- 36  
    III. 2.1. Physionomie de la production : ----- 36  
    III. 2.2. Situation économique : ----- 36  
III.3. Plante :----- 36  
III.4. Récolte:----- 37  
III.5. Composition chimique de la poivron : ----- 38

**Conclusion ----- 40**  
**Références ----- 41**

Liste des figures

N° de figure	Désignation	Page
<b>Fig I.1</b>	Schéma de la structure du soleil.	05
<b>Fig I.2</b>	Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons	06
<b>Fig.I.3</b>	Flux de la lumière solaire	07
<b>Fig I.4</b>	Carte du monde de l'enseillent moyen annuel	11
<b>Fig I.5</b>	Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	12
<b>Fig II.1</b>	Femme algérienne faites le processus de séchage	15
<b>Fig II.2</b>	Schéma de principe d'un séchoir	16
<b>Fig II.3</b>	Représentation de l'activité de l'eau	21
<b>Fig II.4</b>	Représentation schématique d'un solide humide	22
<b>Fig II.7</b>	Périodes du séchage	24
<b>Fig II.8</b>	Différents systèmes du séchage solaire	26
<b>Fig II.9</b>	Séchoir solaire directs	27
<b>Fig II.10</b>	Séchage naturel au soleil	28
<b>Fig II.11</b>	Séchoir solaire indirect	29
<b>Fig II.12</b>	Panneaux photovoltaïque	33
<b>Fig II.13</b>	Représentation schématique d'un capteur plan à air	35
<b>Fig II.14</b>	Représentation schématique d'un capteur à concentration.	35
<b>Fig III.1</b>	Composition moyenne pour 100 g d'aliments crus	39

**Liste des tableaux**

<b>N° de tableau</b>	<b>Désignation</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b>	Caractéristiques principales du soleil	04
<b>Tableau I.2</b>	Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique	10
<b>Tableau I.3</b>	Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.	10
<b>Tableau I.4</b>	Albédo du sol	10
<b>Tableau I.5</b>	Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	12
<b>Tableau II.1</b>	Quelques exemples des méthodes de séchage	17
<b>Tableau II.2</b>	Différents types de séchoirs	30
<b>Tableau III.1</b>	Principaux producteurs mondiaux du poivron 2007	37

## Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
A	Énergie absorbée	W/m <sup>2</sup>
G*	Puissance solaire globale reçue par le capteur	W/m
h	Coefficient de convection	W/m <sup>2</sup> . C°
HR	Humidité relative de l'air	%
I	Énergie incidente	W/m <sup>2</sup>
K	Conductivité thermique	W/m.k
n	Rendement	%
PV	Pression de vapeur d'eau	Pa
q	Flux de chaleur	W
Q	Flux échange par convection	W
Q*	Énergie solaire absorbée par le capteur	W
Q <sub>u</sub>	Énergie utile emmagasinée dans le fluide caloporteur	W
Q <sub>a</sub>	Pertes thermiques	W
Q <sub>t</sub>	Énergie d'inertie thermique de l'installation	W
R	Énergie réfléchie	W/m <sup>2</sup>
S	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide	m <sup>2</sup>
t	Temps	S
T <sub>p</sub>	Température de l'absorbeur	C°

## Liste des symboles

$T_a$	Température ambiante	$C^\circ$
$T_v$	Température de vitre	$C^\circ$
$T$	Température absolue du corps	$C^\circ$
$T_p$	Température de la paroi solide	$C^\circ$
$T_f$	Température du fluide	$C^\circ$
$\alpha^*$	Facteur d'absorption	—
$\varepsilon$	Facteur d' emission	—
$\alpha^* / \varepsilon$	Sélectivité	—
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6.10^{-8}$	$W/m^2 \cdot K^4$
$\tau_c^*$	Coefficient de transmission	—
$\alpha_p^*$	Coefficient d'absorption solaire	—

# **Introduction**

## **Introduction**

L'énergie solaire est une source d'énergie importante disponible dans la nature, elle est propre, renouvelable, ne disparaît pas et est disponible partout, et tout le monde peut l'utiliser. Parmi ses utilisations on trouve le séchage des produits agricoles que l'homme utilisait depuis l'antiquité.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important surtout dans le sud. L'énergie de ce gisement est suffisante, particulièrement en été pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agroalimentaires.

Dans les pays développés, environ 12 à 25 % de la demande totale d'énergie primaire est consacrée au séchage à l'aide de l'opération de séchage, ces produits peuvent être conservés pendant plusieurs mois. En plus, un produit séché pèse environ 1/6 du produit alimentaire frais. Ils n'ont pas besoin d'équipement spécial pour le stockage et sont faciles à transporter.

Le peuple algérien se distingue par son adhésion aux aliments traditionnels, en particulier dans les régions centrales, où le piment est apprécié des consommateurs et est considéré comme l'une des principales épices et légumes des plats populaires algériens.

Ce travail de mémoire présente une étude théorique du séchage au soleil des poivrons, l'aspect appliqué de l'étude a été annulé pour les conditions de l'épidémie mondiale, Covid-19, qui a affecté la réalisation de la partie expérimentale.

Ce mémoire contient trois chapitres:

- Le chapitre I: Généralités sur le gisement solaire et l'énergie solaire
- Le chapitre II : Généralités Sur Le Séchage Et Les Séchoirs Solaires.
- Le chapitre III : Produit Séché (le poivron).

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le gisement solaire et l'énergie solaire**

## Généralités sur le gisement solaire et l'énergie solaire

### I.1. Introduction

La relation de l'homme à l'énergie est une relation ancienne, car l'homme a essayé depuis l'antiquité d'utiliser diverses formes d'énergie, dont la plus importante est l'énergie solaire. C'est une source d'énergie propre, disponible dans toutes les parties du monde et la plus courante de toutes les sources d'énergie renouvelables. Fondamentalement, toutes les formes des énergies du monde sont d'origine solaire, le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le bois ont été à l'origine produites par des processus photosynthétiques. Le soleil peut être classé comme une source d'énergie très importante. Dans ce chapitre nous avons présenté des concepts généraux sur le gisement et l'énergie solaire.

### I.2. Gisement solaire

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 [1].

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

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances.

L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

#### I.2.1. Soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 min à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [2].

### I.2.2. Caractéristiques du soleil

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 d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère .

### I.2.3. Présentation générale [03]

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse d u système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil.

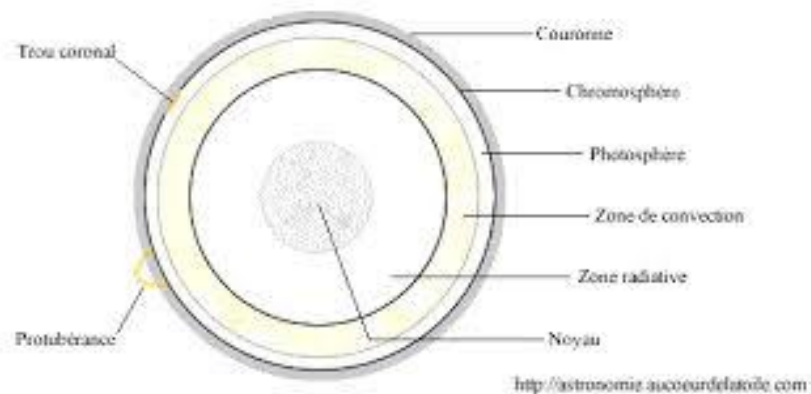
Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1 :

<b>Diamètre (km)</b>	<b>1392000</b>
<b>Masse (kg)</b>	<b><math>2.10^{30}</math></b>
<b>Surface (km<sup>2</sup>)</b>	<b><math>6,09.10^{12}</math></b>
<b>Volume (km<sup>3</sup>)</b>	<b><math>1,41.10^{18}</math></b>
<b>Masse volumique moyenne (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1408</b>
<b>Vitesse (km/s)</b>	<b>217</b>
<b>Distance du centre de la voie lactée (km)</b>	<b><math>2,5.10^{17}</math></b>

**Tableau. I.1.** Caractéristiques principales du soleil [3].

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.104 km, elle présente les caractéristiques suivantes [4] :
  - ▶ Une température de  $15.10^6$  °C.
  - ▶ Une densité est de  $1015 \text{ kg/m}^3$ .
  - ▶ Une pression de 109 ATM.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [4-5] :
  - ▶ Une épaisseur de 244160 km.
  - ▶ Une température variant de  $10 \times 10^6$  °C à  $50 \times 10^4$  °C.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [3] :
  - ▶ La température de surface décroît de 6400 (C°) à 4500 (C°).
  - ▶ Une épaisseur de 500 (km).
  - ▶ Une pression de 1/100 (ATM).
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [4] :
  - ▶ Une épaisseur 2000 (km).
  - ▶ Une température augmentant de 4200 (C°) à  $10^4$  (C°).
- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [3] :
  - ▶ Elle est sans limite précise.
  - ▶ La température augmente de  $10^6$  (C°) à  $2 \times 10^6$  (C°).



**Fig. I.1.** Schéma de la structure du soleil.

#### I.2.4. Système terre-soleil

Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, dont le diamètre atteint environ 1,4 million de km.

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149,6 millions de km, avec une variation de  $\pm 1,7\%$ .

La terre traverse le grand axe de l'ellipse le 2 janvier (la plus éloignée du soleil) et le 2 juillet (position la plus proche). Depuis la terre, le diamètre apparent du soleil est vu sous un angle de  $0,5^\circ$ .

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de  $23^\circ 27'$  par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle formé par l'axe terre soleil, avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison "d" vaut donc  $+ 23^\circ 27'$  au solstice d'été,  $- 23^\circ 27'$  au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Dans l'approximation d'une trajectoire circulaire, la déclinaison s'écrit, pour chaque jour de l'année :

$$\sin \delta = 0,4 \times \sin t \quad (\text{I.1})$$

$t$  : est la coordonnée angulaire de la terre en prenant l'équinoxe de printemps pour origine [3].

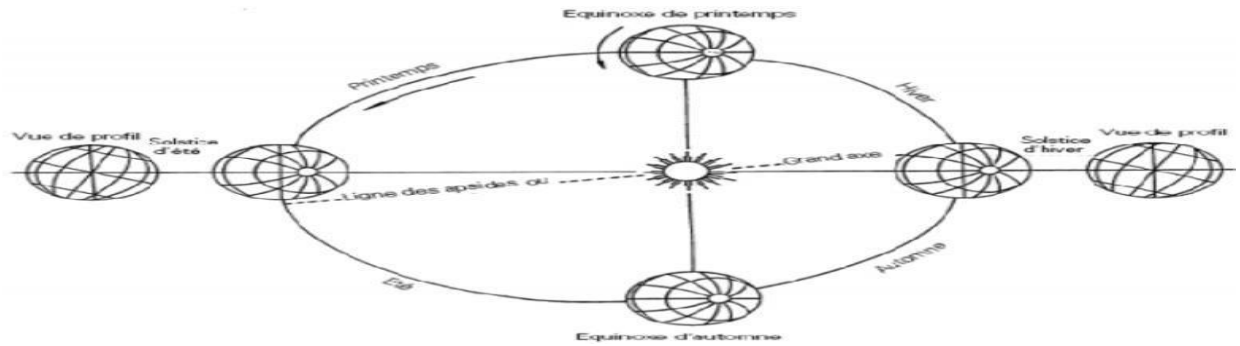


Fig. I.2. Plan de l'écliptique l'orbite terrestre et les saisons [3].

### I.3 Énergie solaire

Ce que l'on désigne par énergie solaire est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil, l'énergie solaire provient du rayonnement du soleil et les rayons sont constitués de photons, qui nous en arrivent comme vecteurs d'énergie. Ce terme d'énergie solaire s'emploie aujourd'hui pour désigner l'électricité solaire et l'énergie thermique obtenues à partir de l'exploitation du rayonnement du soleil sous ces deux formes photovoltaïque ou photo-thermique.

La distance séparant la terre du soleil est  $r=1,496.10^{11}$  m du soleil, si chaque mètre carré reçoit un flux de lumière  $\Phi_s = 1368$  (W/m<sup>2</sup>), alors une sphère de rayon  $R$  dont la surface  $S = 2,81 \times 10^{23}$  m<sup>2</sup> recevra une puissance  $P$  :

$$P = \Phi_s \times S \quad (I.2)$$

La puissance  $P$  du soleil est donc  $P = 3,84 \times 10^{26}$  W pour une surface perpendiculaire à la direction Terre-Soleil [4].

Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion suivant la latitude du lieu et les conditions météorologiques ; au niveau du sol la puissance restante est de l'ordre de 1 (kW.m<sup>-2</sup>) sous nos latitudes [4].

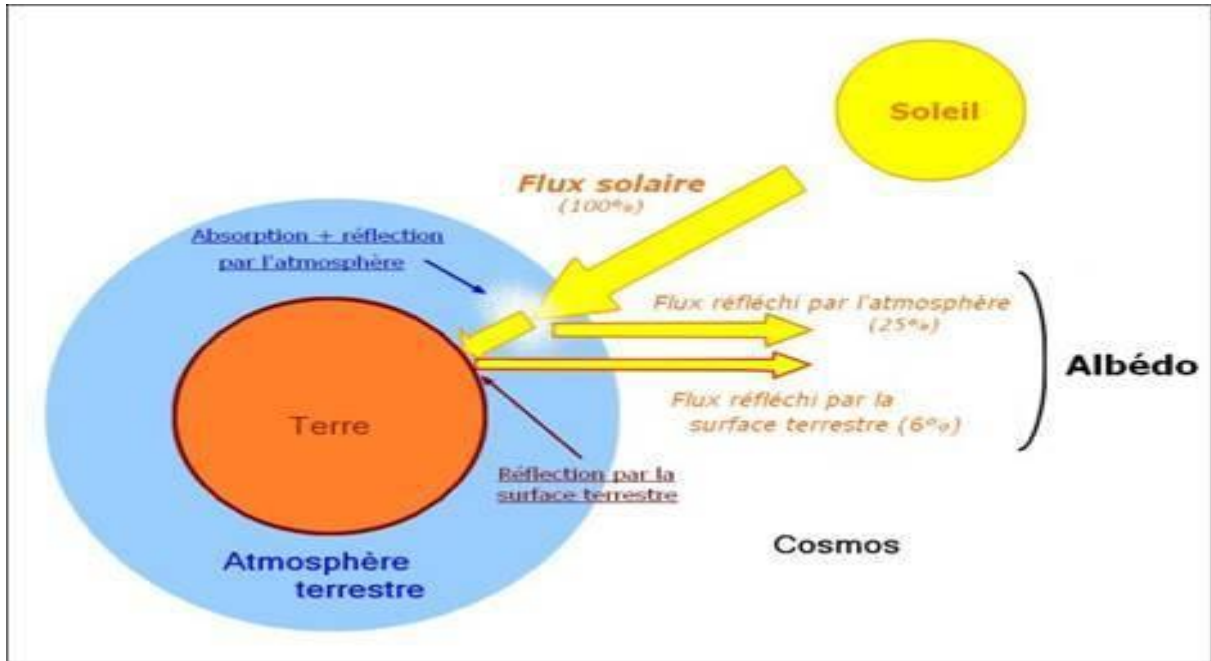


Fig. I.3. Flux de la lumière solaire [3].

### I.3.1. Origine de l'énergie solaire

Les conditions résidantes 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.

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  $3,7 \times 10^{26}$  (j/s).

### I.3.2. Caractères particuliers

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes [6]:

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

- ❖ Elle est abondante, notre planète reçoit plus de  $10^4$  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.

### I.3.3. Captation

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

#### ➤ **Énergie solaire thermique**

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

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

#### ➤ **Énergie solaire thermodynamique [4]**

Le 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 héliothermoélectriques [4]. Trois types principaux de centrales sont utilisés :

- ▶ 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°).

#### ➤ **Énergie solaire photovoltaïque**

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

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

#### **I.3.4. Constante solaire**

La terre reçoit pratiquement toute son énergie du soleil, sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Son contenu total de chaleur ne change significativement pas avec le temps, indiquant en général un équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le flux de rayonnement diffus émis par la planète. À l'extérieur de l'atmosphère terrestre il n'y a pas de composante diffuse du rayonnement solaire mais seulement la composante directe. Pour une distance moyenne entre la terre et le soleil. L'irradiation émise par le soleil à la terre aboutit à une intensité presque fixe dite constante solaire qui est de 1360w/m (Monteith 1962).

La constante solaire est l'énergie solaire reçue par unité de temps et par unité de surface d'une superficie perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement solaire. La commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'organisation météorologique mondiale (OMM) a adopté en octobre 1981 la valeur 1367w/m [7].

#### **I.4. Rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Via la photosynthèse il est nécessaire à la plupart des espèces qui vivent sur la Terre. [8].

#### **I.5. Différents types de rayonnement solaire**

##### **a) Rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère et de sa réfraction par le sol. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuage) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil.

Le flux diffus émis par la voûte céleste  $I_{diff1}$  donné par la relation [1]:

$$I_{diff1} = I_h \times \frac{1+\cos(\beta)}{2} \quad (I.3)$$

Avec :  $I_h = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir})$

$\tau_{dir}$ : Étant la transmissivité total de la couche atmosphérique pour le flux solaire incident direct est donnée par:

$$\tau_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \quad (I.4)$$

**a** et **b** : Coefficients traduisant les troubles atmosphérique.

**P**: la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Tableau I.2. Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique.

Le tableau I.3 donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Tableau I.3. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

Le rayonnement émis par le sol  $I_{diff2}$  est dépend de l'albédo du sol qui représente le rapport entre la partie réfléchié par le sol et la partie reçue donné par l'expression :

$$I_{diff2} = \rho \times \frac{1-\cos(\beta)}{2} \times (I_c \times \tau_{dir} \times \sin(h) + I_h) \quad (1.5)$$

$\rho$ : L'albédo du sol, il dépend de l'environnement du site.

Nature du sol	$\rho$
Herbe fraîche	0.20
Herbe sèche	0.30
Terre cultivée, nue	0.16
Gravier	0.22
Neige fraîche	0.85
Etendu d'eau	0.05

Tableau I.4. Albédo du sol

### b) Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion dans l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux.

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est donné par : [09]

$$I_{(\beta,\gamma)} = I_{\text{dir}} \cdot \cos(i)$$

Avec :

$$I_{\text{dir}} = I_c \times a \times \cos(i) \times \text{Exp}\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \quad (\text{I.6})$$

$I_{\text{dir}}$ : rayonnement direct normal.

$i$ : Angle d'incidence.

### c) Rayonnement global

Le rayonnement global sur une surface est la somme du rayonnement direct ( $I_{\text{dir}}$ ) et du rayonnement diffus ( $I_{\text{dif}}$ ), soit :

$$I_{\text{gl}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \quad (\text{I.7})$$

## I.6. Gisement solaire en Algérie [10-11]

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.

D'après sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre:

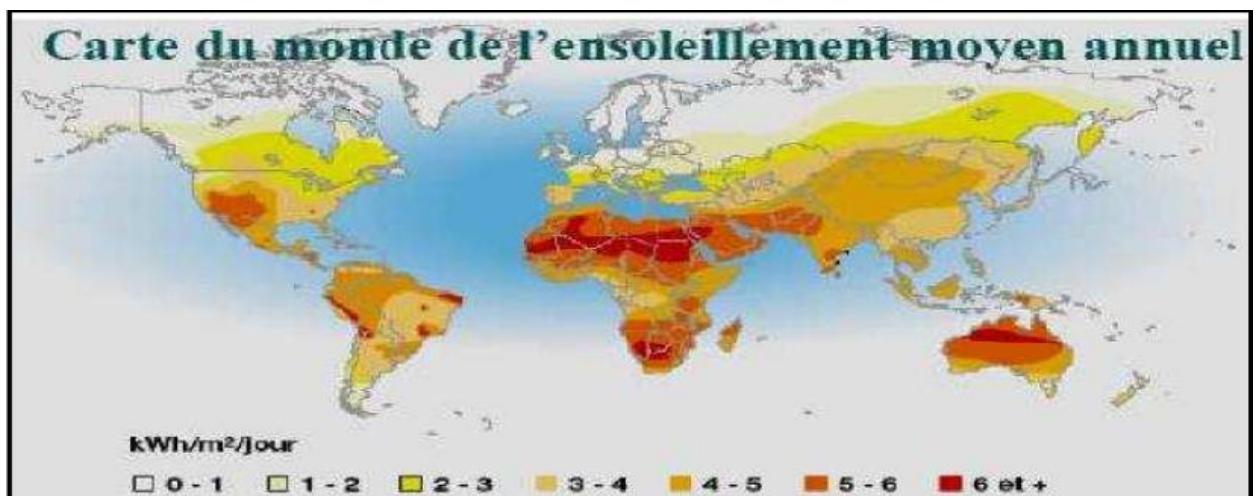


Fig. I.4. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [10].

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

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l'ensoleillement reçu annuellement [11]:

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

Tableau I.5. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500(h/an) est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [15].

Le sud de l'Algérie est particulièrement ensoleillé et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (Figure I.5).

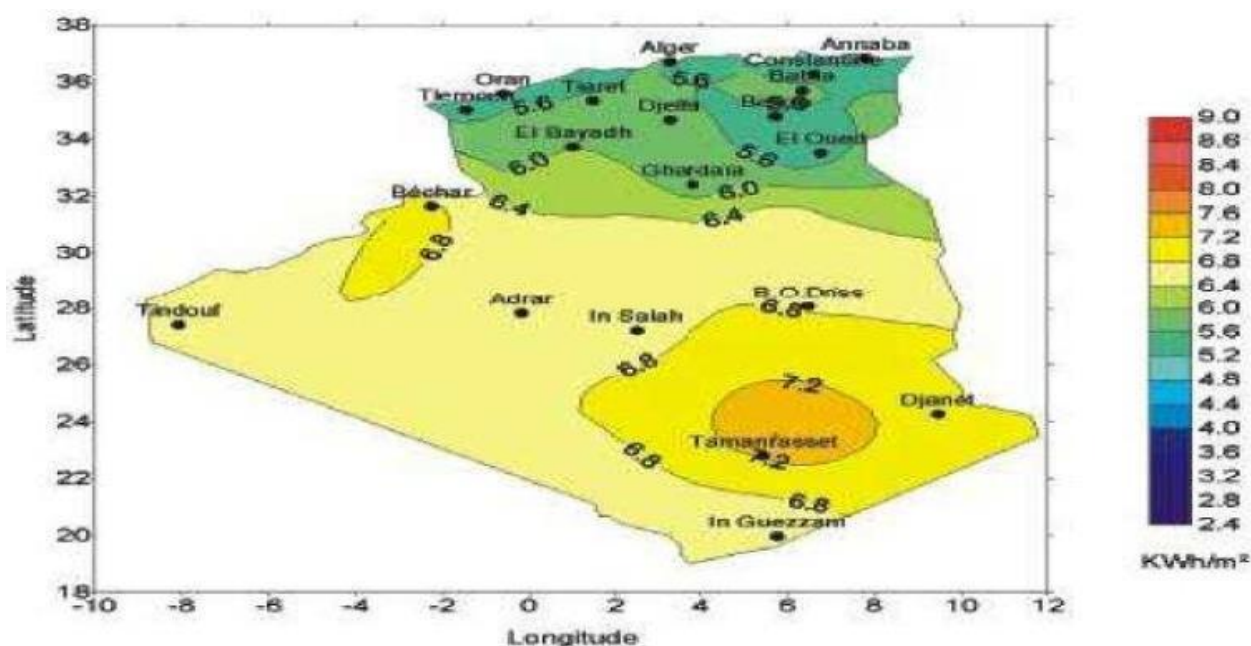


Fig. I.5 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien [10].

Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage.

La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

# **Chapitre II**

## **Généralités sur le séchage et les séchoirs solaires**

## Généralités sur le séchage et les séchoirs solaires

### II.1. Séchage

#### II.1.1. 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 [12-13].

#### II.1.2. Historique

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figues, 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.) [14].

#### II.1.3. Habitudes de séchage en Algérie

Le séchage des produits agricoles est l'une des applications potentielles les plus importantes dans la région algérienne. Les agriculteurs et les citoyens sèchent leurs récoltes sur des tapis, pavés ou sur le terrain, les exposant ainsi au soleil en les répandant en couches minces. Cependant l'expérience de l'Algérie dans l'étude du séchage solaire est récente et limitée au séchage de fruits, de légumes, de plantes médicinales et aromatiques.



Fig. II.1. Femme algérienne faites le processus de séchage.

#### II.1.4. But de séchage

Le but de séchage consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaires jusqu'à une valeur résiduelle inhibant le développement de tous les micro-organismes. Cette valeur permet de stocker les produits dans les conditions ambiantes [15].

#### II.1.5. Domaine d'utilisation

Le séchage industriel est de nos jours très couramment utilisé dans les industries chimiques ou des matériaux [16]. Cette technique a plusieurs utilisations dans les pays en voie de développement dans la vie de tous les jours :

- **Industrie agroalimentaire:**

Une grande partie de nos aliments consommables ont subi une opération de séchage. On constate que ce dernier est une étape nécessaire à la production et la conservation de l'aliment [07]a titre d'exemple : les légumes et les fruits secs (figue, raisin), les pâtes alimentaires, certains produits en poudre (cacao, lait, café...) ainsi la conservation des types de grains, feuilles de thé, épices...

- **Industrie papetière:**

Le papier est obtenu pas séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés [16].

- **Industrie du bois:**

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, si non on s'expose à des changements de taille et de forme du bois [16].

- **Bouchons de liège:**

Afin de garantir le meilleur vieillissement des vins, une attention toute particulière est portée à la qualité des bouchons de liège. Au cours de leur fabrication l'opération de séchage doit être parfaitement maîtrisée, au risque de donner un goût de moisi au vin [16].

- **Matériaux de construction:** briques, carrelages, béton,... [16].

- **L'industrie céramique:** assiettes, bols, plats, tasses, ... [16].

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

Levure en poudre antibiotiques

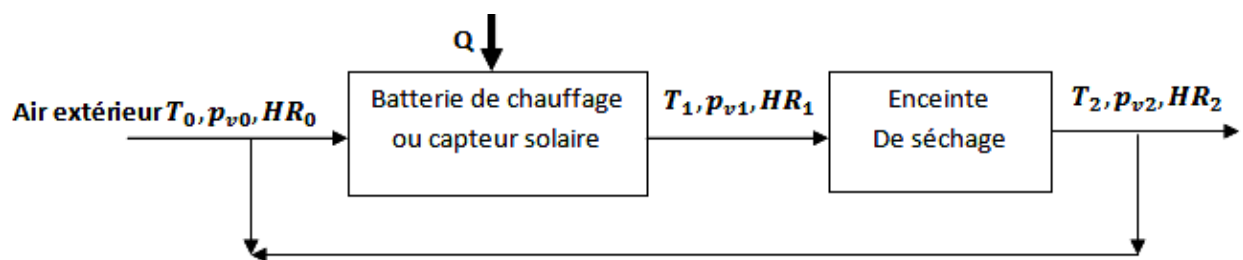
Séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage [16].

- **Fonderie :**

Séchage des noyaux qui assurent l'élaboration des formes intérieures des pièces obtenues par moulage [16].

### II.1.6. Principe de séchage

Le moyen le plus simple à mettre en œuvre pour sécher un produit est de le ventiler avec un air suffisamment chaud et sec pour qu'un échange de chaleur et d'humidité s'effectue entre cet air et le produit. La figure ci-dessous schématise une installation de séchage (Fig. II.2).



**Fig. II.2.** Schéma de principe d'un séchoir [17].

La différence  $(X_2 - X_1)$  correspondant à la masse d'eau retirée du produit par Kg d'air sec ayant traversé le séchoir

Pour réaliser une opération de séchage convectif il faut donc :

- Un apport d'énergie  $Q$
- Une circulation d'air qui entraîne la vapeur d'eau extraite du produit (on parle aussi de séchage d'entraînement)[18].

### II.1.7. Différents méthodes du séchage [20]

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

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

Tableau. II.1. Quelques exemples des méthodes de séchage.

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

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

#### II.1.7.1. Séchage chimique

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

#### II.1.7.2. 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 externe, de la surface vers le coeur du produit.
- ❖ Transfert de masse interne, du coeur 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 :

### II.1.7.3. 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 :

- ❖ 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 de micro-ondes ou par un chauffage diélectrique.
- ❖ Par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant. [20]

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

Les séchoirs à "entraînement" peuvent être divisés en deux catégories.

#### a. Séchoirs actifs [20]

qui comportent des isolateurs (capteurs) placés en amont d'une chambre de séchage et destinés à chauffer l'air avant son envoi dans cette dernière. Ils sont nombreux (1/3 fonctionne en convection naturelle, 2/3 fonctionnent en convection forcée). Ils peuvent être dotés d'un chauffage d'appoint ou d'un recyclage afin d'améliorer ses performances, comme c'est le cas dans les pays industrialisés.

D'une manière générale, ces séchoirs sont dits indirects et ce genre de séchoir est isenthalpique.

#### b. Séchoirs passifs

(ou séchoirs serres) qui sont constitués d'une enceinte dont le toit et (ou) les côtés en matériau transparent laissent pénétrer le soleil. Le rayonnement frappe donc directement les produits à sécher qui jouent alors le rôle d'absorbeur. Ces séchoirs sont dits séchoirs serres directs. Si le rayonnement détériore le produit; on interpose alors entre la couverture transparente et le produit une surface opaque servant d'absorbeur. Ce genre de séchoir est dit séchoir serre indirect.

Quant aux séchoirs mixtes qui sont peu présentés; ceux sont des séchoirs dont une seule partie du produit reçoit et absorbe le rayonnement. Naturellement les séchoirs passifs ne sont pas isenthalpique.

#### II.1.7.4. Séchage par entrainement

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 :

- ❖ 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.

#### II.1.8. Caractéristiques de l'air de séchage

##### II.1.8.1. Humidité

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

##### II.1.8.2. Humidité absolue

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

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} [\text{kgv} \cdot \text{kgas}^{-1}] \quad (\text{II.1})$$

##### II.1.8.3. Humidité relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température [21]:

$$H_r = \frac{P_v}{P_{s(T)}} \times 1000\% \leq 100\% \quad (\text{II.2})$$

#### II.1.8.4. Température sèche

On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens courant [22].

#### II.1.8.5. Température humide du gaz

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement [23].

#### II.1.9. Caractéristiques des solides humides

Le solide a un film d'eau adhère à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présent dans une enceinte, à la même température.

Soit une masse ( $M_h$ ) de matériau humide contenant une masse  $M_e$  d'eau et une masse  $M_s$  de matière sèche: [23][12]

$$M_h = M_e + M_s \quad (\text{II.3})$$

##### II.1.9.1. Humidité absolue

L'humidité autoritaire ou taux d'humidité ou teneur (kgav/kgas) en eau à base sèche, où plus simplement humidité s'exprime par liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche: [23][12]

$$X = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.4})$$

##### II.1.9.2. Teneur en eau à base humide

L'humidité relative où titre en eau (%), ou teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$X_r = \frac{M_e}{M_e + M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{II.5})$$

##### II.1.9.3. Taux d'humidité

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

#### II.1.9.4. Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [23]

$$X_{\text{eq}} = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_e}{M_s} \quad (\text{II.6})$$

#### II.1.10. Activité de l'eau

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide « $A_w$ », par le rapport de la pression ( $P_{vp}$ ) (de la vapeur à la surface du produit) et de la pression ( $P_{\text{sat}}$ ) (de la vapeur saturante à la température de surface du produit).

Si le corps est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure (lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre eux), il en résulte que la pression ( $P_{vp}$ ) s'égalise avec la pression partielle de vapeur ( $P_v$ ) dans l'air et que l'activité de l'eau du produit et l'humidité relative de l'air deviennent identiques ( $A_w = \varphi$ ).

Pour qu'il y ait séchage, il faut que l'humidité relative de l'air soit inférieure à l'activité de l'eau du produit ( $\varphi < A_w$ ) de façon à ce que la pression de vapeur à la surface du produit soit supérieure à la pression partielle de vapeur dans l'air ( $P_{vp} > P_v$ ).

Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, l'activité de l'eau ( $A_w$ ) est identique à l'humidité relative d'équilibre ( $A_w = \text{HRE}$ ). Elle est définie comme suit [24]:

$$A_w = \frac{P_{VP}}{P_{VS}} = \frac{\text{HR}(\%)}{100} \quad (\text{II.7})$$

- $P_{vp}$ : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)
- $P_{vs}$  : pression partielle de vapeur saturante (Pa)
- HR : humidité relative de l'air (%).

### II.1.10.1. Activité de l'eau dans un produit

L'activité de l'eau est le rapport entre la pression de vapeur d'eau à la surface du produit et la pression de la vapeur d'eau sur la surface plane d'un liquide à la même température.



Fig. II.3. Représentation de l'activité de l'eau.

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre,  $P_v$ ,  $T$ ,  $P_{va}$  et  $T_a$  étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air. L'équilibre impose :

- $T = P_v = P_{va}$  : pas de transfert de masse
- $T_a$  : pas de transfert de chaleur

or l'humidité relative de l'air s'écrit :

$$Hr = 100 \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad (\text{II. 8})$$

L'activité de l'eau dans un produit est donc également l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit. Pour qu'un produit puisse se conserver à température ambiante, son activité ( $a_w$ ) doit être abaissée en-dessous de 0,6 (les moisissures ne peuvent plus se développer. [23].

### II.1.10.2. Transfert de masse d'un produit humide

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière.

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique au produit à sécher et dont la source est extérieure à celui-ci. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau. [13]

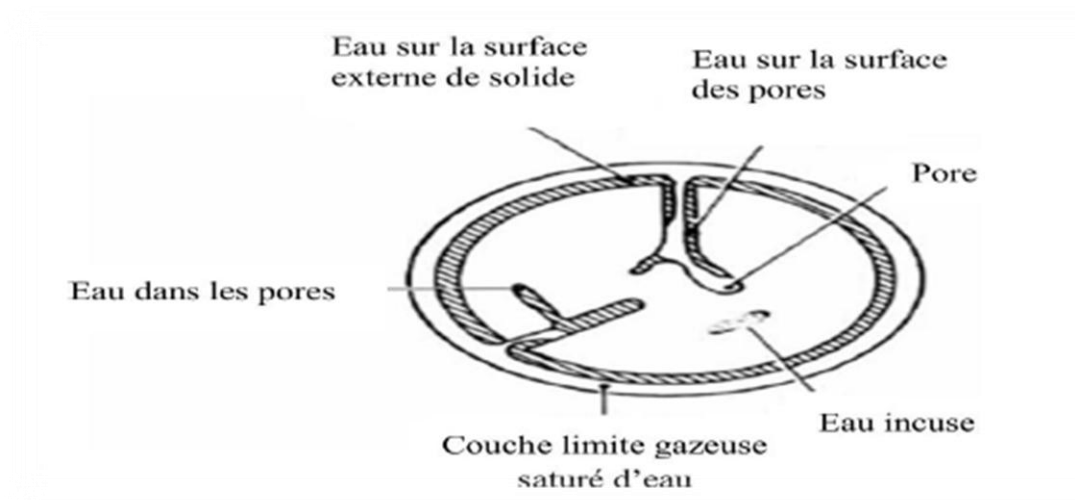


Fig. II.4. Représentation schématique d'un solide humide.

II.1.11. Vitesse de séchage

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporé de solide a 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 du l'air. [20].

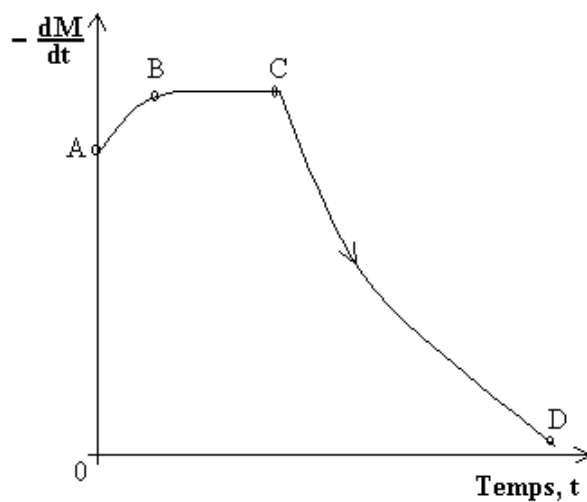


Fig. II.5. Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(t)$

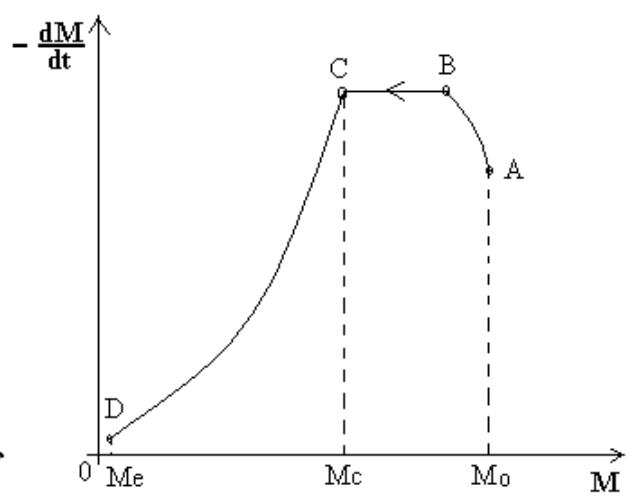


Fig. II. 6. Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(M)$

### II.1.11.1. Courbes de séchage

Les courbes de séchage sont représentées soit par les variations de l'humidité absolue ( $X$ ) du produit en fonction du temps, soit par la variation de la vitesse de séchage ( $-dX/dt$ ) en fonction du temps  $t$  ou même la courbe proposée par Krisher ( $dX/dt$ ) en fonction de l'humidité absolue  $X$  (Krisher [28]).

### II.1.11.2. Cinétique de séchage

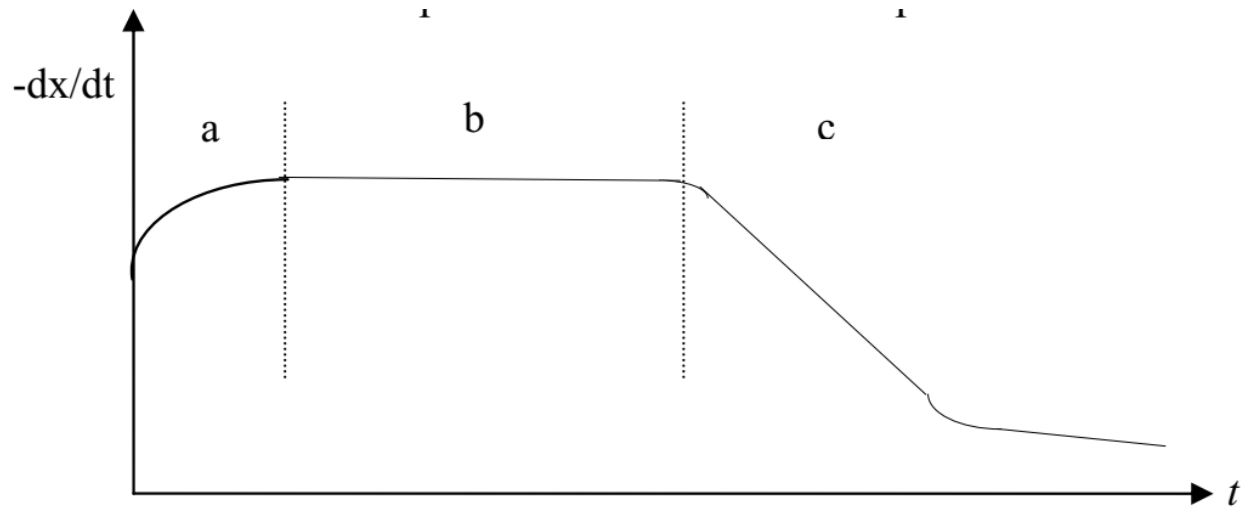
On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau ( $\text{kg d'eau} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) en fonction du temps. Ces courbes sont généralement 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 [24].

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 [25, 20].

On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de  $\varphi_{\text{eq}} = 11\%$  [26].

### II.1.11.3. Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide

L'expérience permettant de caractériser la cinétique de séchage consiste à soumettre une couche mince d'un produit à l'action d'un courant d'air de température, humidité et vitesse fixées et de mesurer la masse du produit en fonction du temps [12].



**Fig. II.7.** Périodes du séchage.

Dans la courbe ci-dessus est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.

Souvent on construit aussi la courbe de la vitesse de séchage en fonction de l'humidité restant dans la matière au cours du séchage. Dans (**Fig II.7**) on distingue trois périodes :

#### **Période de mise en température (région a)**

Quand un produit d'une température de surface ( $T_s$ ) et d'une pression partielle de vapeur d'eau  $P_s$  est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage jusqu'à atteindre la température du bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global [12].

#### **Période à allure constante (région b)**

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation du liquide superficiel. Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et compenser l'évaporation. Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le produit est entièrement utilisé pour l'évaporation de l'eau.

Cette période est identique au séchage isenthalpe d'un film d'eau et dépend donc essentiellement des conditions aérauliques entourant le produit à sécher. Lorsque l'humidité superficielle du

solide n'est pas renouvelée à une allure suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse cesse d'être constante.

Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit [29][12].

### **Période de ralentissement (région c)**

Au cours de cette période la surface du produit n'est plus saturée en vapeur d'eau et le transfert de masse est contrôlé par les mécanismes complexes du déplacement de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit [27][12].

Cette période représente souvent la quasi totalité du séchage. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

- ❖ **Disparition de l'eau libre en surface de produit :** La zone d'évaporation "front de séchage" qui se trouvait en surface se déplace vers l'intérieur du produit. En amont de cette zone, il y a migration de l'eau libre, tandis qu'en aval c'est l'eau liée et la vapeur d'eau qui sont évacués. La brusque réduction de la surface effective de transfert due à une alimentation insuffisante en eau libre est la cause de ce ralentissement.
- ❖ **L'épaisseur du produit:** si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.
- ❖ **La diffusivité de l'eau dans le produit :** elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.
- ❖ **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes :** Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.
- ❖ **Le croutage :** Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit. [12]

## II.2. Séchoirs solaires

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

### II.2.1. 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 (II.8)

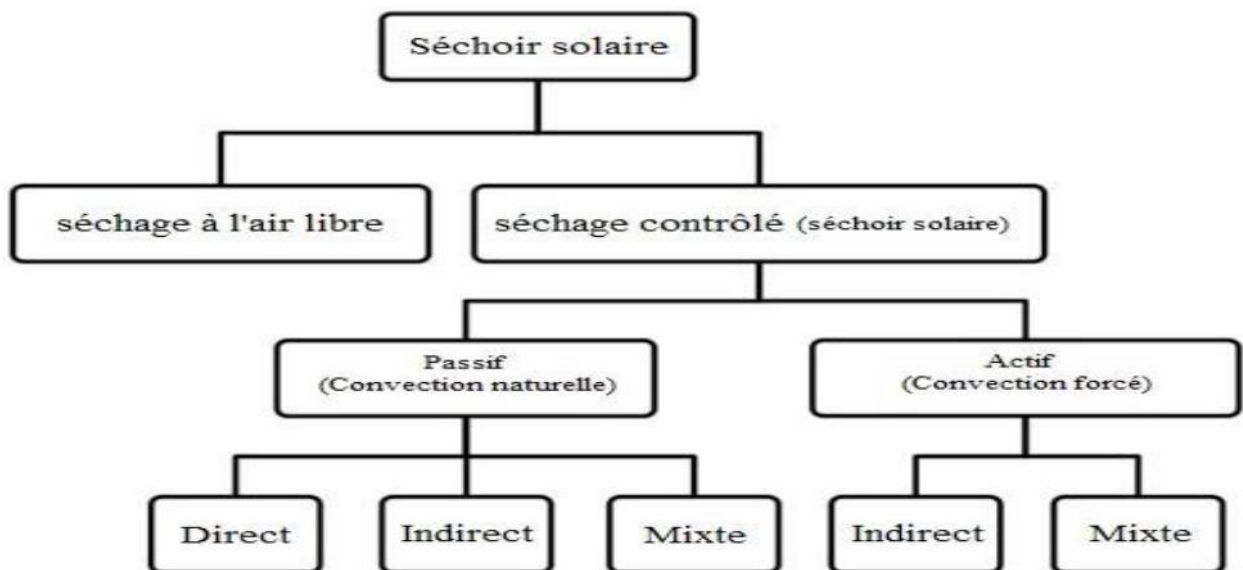


Fig. II.08. Différents systèmes du séchage solaire.

### II.2.3. Types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories [28]:

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

#### II.2.3.1. 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.

### II.2.3.1.1. 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 on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

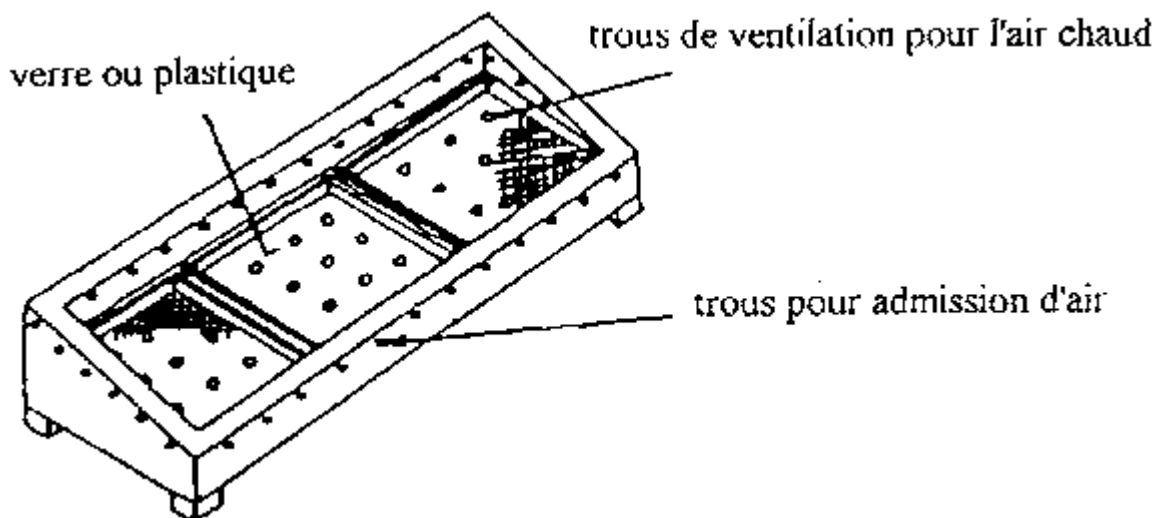


Fig. II.09. Séchoir solaire direct.

### I.2.3.1.2. Avantages et inconvénients

#### a- 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'oeuvre qualifié.
- ❖ Grandes possibilités de conception.

#### b - Inconvénients

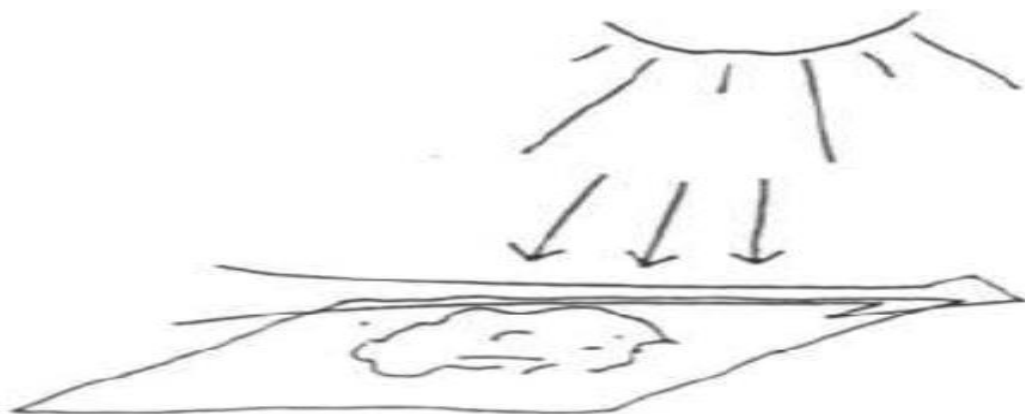
- ❖ Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration [33].
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- ❖ Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments. [29]

### II.2.3.2. Séchoirs naturels (traditionnels)

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 :

- ❖ 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.



**Fig. II.10.** Séchage naturel ou au soleil.

### II.2.3.3. 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 utilisé.

#### II.2.3.3.1. 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 II.11). 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.

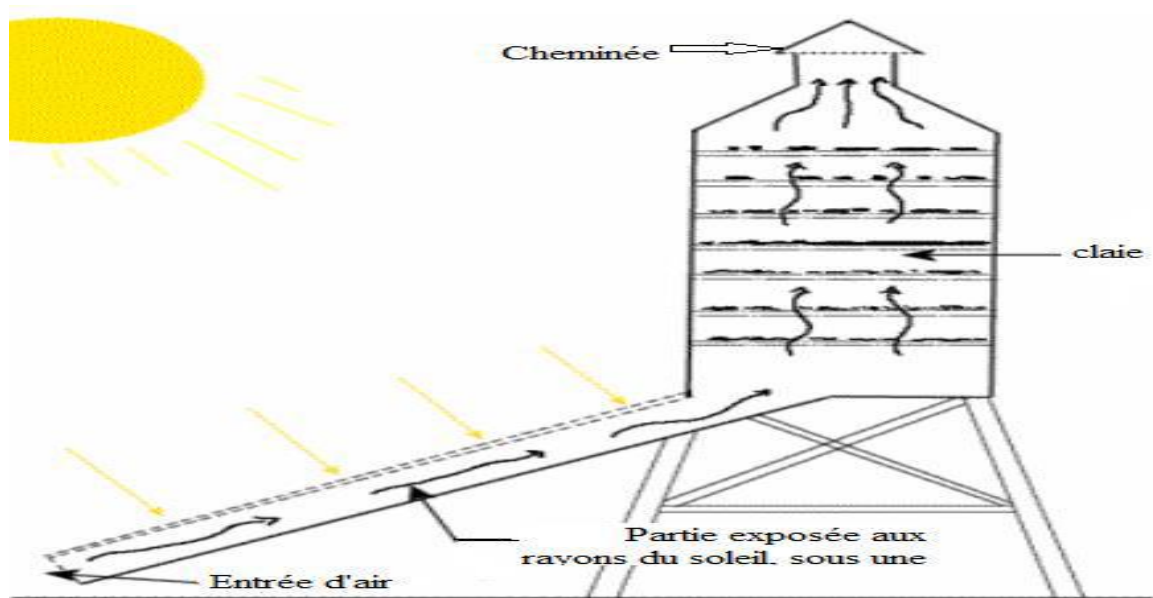


Fig. II.11. Séchoir solaire indirect

#### II.2.3.3.2. Avantages et inconvénients

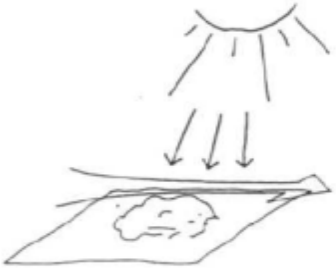
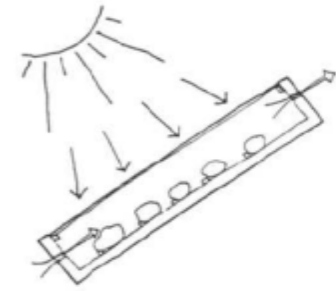
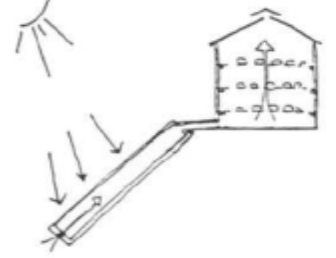
##### a - Avantages

- ❖ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- ❖ Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit. [30]
- ❖ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.[30]

**b – Inconvénients**

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

**II.2.3.4. Différentes types de séchoirs solaire**

Fonctionnement schématique	Type de séchage	Caractéristiques
	<p><b>Séchage naturel Ou au soleil</b></p>	<p>très faible coût travail important perte de produit</p>
	<p><b>Séchage solaire direct</b></p>	<p>produit protégé séchage rapide une certaine dégradation du produit</p>
	<p><b>Séchage solaire indirect</b></p>	<p>produit parfaitement protégé et non dégradé séchage assez rapide coût et complexité plus importants</p>

**Tableau II.02.** Différents types de séchoirs

Le déplacement de l'air peut être produit mécaniquement (ventilateur) mais il est fréquemment possible de faire appel au tirage naturel avec une cheminée solaire éventuellement.

Ce type d'appareil 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 (séchage pour germination ; produits à faible température Maximum). Il devrait en fait être adopté aussi

souvent que possible dans le cas de produits alimentaires. La durée de séchage est très variable et peut être supérieure à celle du séchage naturel. Pendant le séchage, il faut souvent prévoir de faire une ou plusieurs rotations des claies car dans beaucoup de modèles les produits placés dans le haut du séchoir sèchent moins vite que ceux placés en bas.

#### **II.2.3.5. 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.

#### **II.2.3.6. 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.

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.

##### **II.2.3.6.1. Avantages et inconvénients**

###### **a. Avantages**

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

###### **b. Inconvénients**

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

### II.3. Capteurs solaires

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 créé 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. [31]

#### II.3.1. Types de capteurs solaires

Principalement il y a deux types de capteurs solaires.

##### II.3.1.1. Capteurs solaires photovoltaïques

Qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.

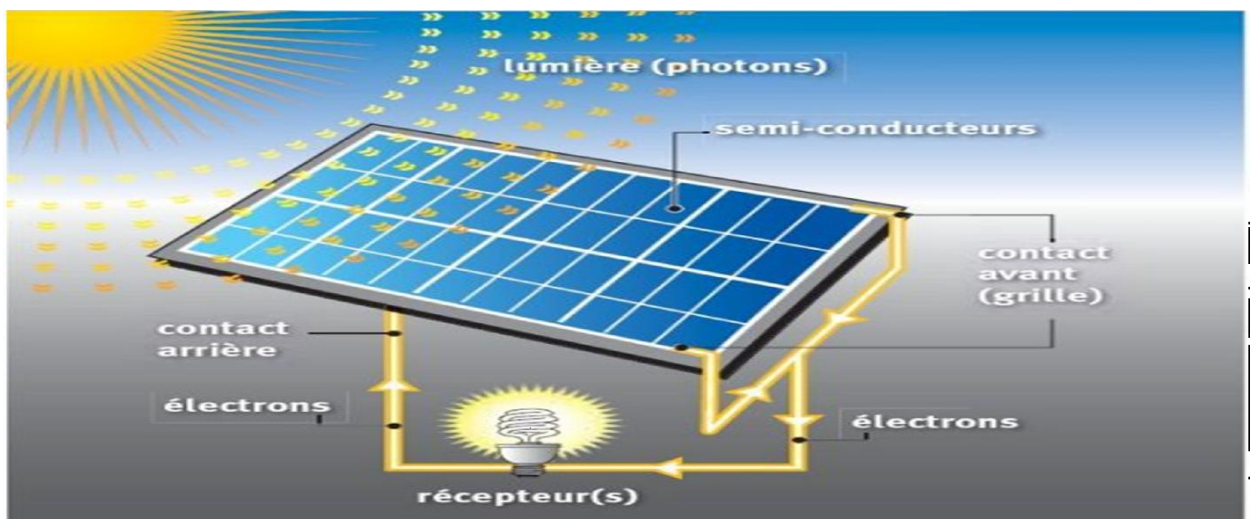


Fig II.12: Panneaux photovoltaïque

##### II.3.1.2. Capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermique sont des appareils permettant la conversion de l'énergie de rayonnement en énergie thermique, en se basant sur l'effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge, un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre.

Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- ❖ les capteurs plans.
- ❖ les capteurs par concentration.

### II.3.2. Capteurs plans [32]

Les capteurs plans absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduits, sa température (liquide ou air) augmente en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante. Comme une serre, les capteurs plans sont munis d'un vitrage transparent, qui piège le rayonnement calorifique s'échappant de la plaque absorbante. Ils peuvent chauffer les fluides caloporteurs à des températures légèrement supérieures à 80°C, avec un rendement variant entre 40 et 80%.

Dans l'hémisphère nord ils sont orientés vers le sud, et dans l'hémisphère sud, vers le nord. L'efficacité des capteurs dépend de l'angle qu'ils forment avec le plan horizontal. Leur inclinaison optimale varie selon la latitude de l'installation.

Les principaux composants des capteurs solaires sont :

La vitre : la matière le plus utilisé est le verre.

L'absorbeur : C'est une plaque noire qui absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur thermique ; cette plaque doit avoir les caractéristiques suivantes :

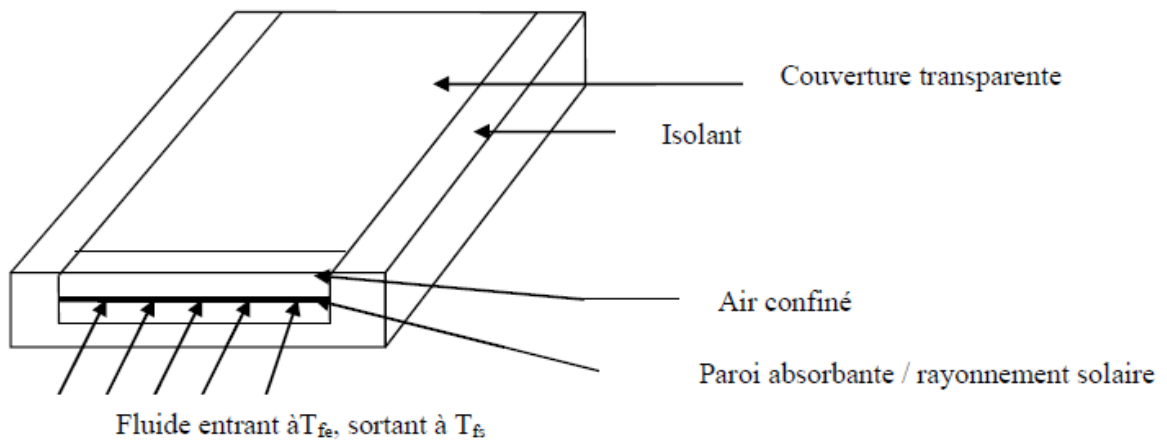
- Une bonne conductivité thermique ;
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité;

Les matériaux utilisés comme absorbeur sont : le cuivre, les aciers, l'aluminium ...etc.

L'isolant : L'isolant a pour rôle de limiter les déperditions calorifiques. Les matériaux utilisés comme isolant sont le bois, les cendres de végétaux, la laine de verre et ...

Le fluide caloporteur : Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail. Les fluides caloporteurs utilisés sont :

- ❖ L'air : C'est un fluide gratuit mais il possède une faible capacité calorifique en comparaison avec celle de l'eau.
- ❖ L'eau : Elle possède les avantages suivants : une grande chaleur massique, et une faible viscosité.

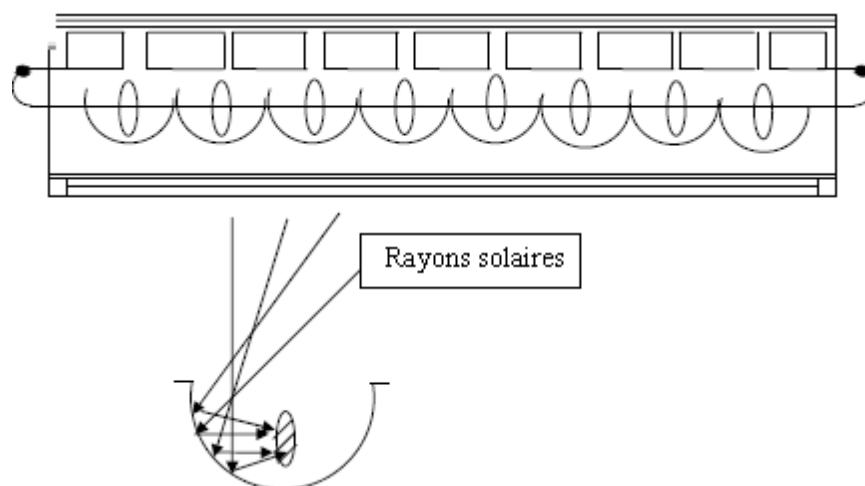


**Fig II.13:** Représentation schématique d'un capteur plan à air

#### II.3.4. Capteurs par concentration [33]

Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très hautes températures. En revanche, il est possible d'utiliser des capteurs par concentration, mais ils sont plus complexes et plus onéreux.

Il s'agit de réflecteurs en demi-cercle qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité, et les températures obtenues sur le récepteur (appelé cible) peuvent atteindre plusieurs centaines voire même plusieurs milliers de degrés Celsius.



**Fig II.14:** Représentation schématique d'un capteur à concentration.

#### II.3.5. Bilan thermique du capteur

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$\varphi_a = \varphi_u + \varphi_p + \varphi_s \quad (\text{II.9})$$

Où  $\varphi_a$  : Le flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur,

$\varphi_u$  : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur,

$$\varphi_u = F_R \left( (\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_{fe} - T_\alpha) \right) \quad (\text{II. 10})$$

$$F_R = \left( \frac{mc_p}{U_L} \right) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{U_L F'}{mc_p} \right) \right] \quad (\text{II. 11})$$

$\varphi_p$  : La puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur,

$$\varphi_p = U_L (T_1 - T_\alpha) = \varphi_{p_1} + \varphi_{p_2} \quad (\text{II.12})$$

Avec :  $\varphi_{p_1}$  : perte à l'avant

$\varphi_{p_2}$  : perte à l'arrière

$\varphi_s$  : La puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

### II.3.6. Rendement instantané d'un capteur [33]

Le rendement instantané d'un capteur est défini par :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}} \quad \eta = \frac{\varphi_u}{\varphi_a}$$

# **Chapitre III**

Produit séché (le poivron)

---

## Produit séché (le poivron)

### III) Produit à sécher

#### III.1. Poivron

Le poivron est un groupe de cultivars de l'espèce. Ce sont les variétés douces issues de cette espèce par sélection. Ces cultivars doux produisent des fruits de différentes couleurs dont le rouge, le jaune et l'orange. Le fruit est également consommé sous sa forme verte immature. C'est une plante annuelle de la famille des Solanacées originaire du Mexique, d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. La plante est cultivée comme plante potagère pour ses fruits consommés, crus ou cuits, comme légumes. Le terme désigne à la fois le fruit et la plante.

Le poivron est l'ingrédient indispensable d'un certain nombre de plats, comme la piperade ou la ratatouille, mais il peut aussi bien servir d'accompagnement.

Le poivron a été retenu pour notre expérimentation. Le choix est motivé par sa relative abondance, la plus-value de sa transformation, le service rendu à l'économie et l'amélioration des revenus dans la filière agro-alimentaire (création d'emplois) [34].

#### III.2. Origine et présentation générale

##### III.2.1. Physionomie de la production

Les graines de poivrons ont été importées en Espagne pour la première fois en 1493, et se sont propagées vers l'Europe et l'Asie. L'appellation poivron est dérivée du mot poivre, et fait son apparition à l'écrit en 1785 .

##### III.2.2. Situation économique

La production mondiale de poivrons est estimée à 23,2 millions de tonnes (source FAO, 2007). Le premier producteur mondial est la Chine avec 14 millions de tonnes, soit près de 50 %.

#### III.3. Plante

C'est une plante annuelle, en climat tempéré car elle ne résiste pas au gel, mais pouvant vivre plusieurs années en climat tropical. Port dressé, presque arbustif, très ramifié. Les tiges de la base ont tendance à se lignifier. La plante atteint 40 à 50 cm de haut en général à la suite d'une germination ayant duré de 7 à 15 jours.

Les feuilles, alternes, lancéolées, se terminant en pointe, sont d'un vert brillant. Les fleurs, nombreuses et petites, sont blanches, à pétales soudés et pointus, au nombre de 6 à 8. Le fruit est une baie d'un type particulier, la pulpe, relativement mince et formant une espèce de capsule

entourant un placenta plus ou moins volumineux portant de nombreuses graines. Extérieurement, la peau est lisse et brillante, de couleur vert brillant avant maturité, elle prend à maturité une couleur vive, en général rouge, mais aussi jaune, orangé, violet, marron, noir... Les graines sont petites, plates, réniformes, de couleur crème. Les poivrons se distinguent des piments par des fruits plus gros et plus charnus, et surtout dépourvus de substance piquante (la capsaïcine).

Cette plante n'est connue qu'à l'état cultivé. Elle est très vraisemblablement originaire d'Amérique du Sud et a été probablement domestiquée au Mexique. On a retrouvé des graines vieilles de 5000 ans lors de fouilles archéologiques au Mexique.

Elle est cultivée dans le monde entier, depuis qu'elle a été introduite dans l'ancien monde à la fin du XV<sup>e</sup> siècle. Elle s'est répandue très facilement surtout sous la forme piquante, le piment. Le poivron semble s'être répandu plus tard, à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle en France et en Europe et au Canada.

Les principaux producteurs pour l'année 2007 sont indiqués dans le tableau.

Pays	Production (MT)
Chine	14,033
Mexique	1,690
Indonésie	1,100
Turquie	1,090
Espagne	1,065
Nigeria	0,723
Égypte	0,475
Algérie	0.078

**Tableau III.1.** Principaux producteurs mondiaux du poivron 2007.

#### III.4. Récolte, conservation

La période de récolte s'étale d'août à octobre, et selon la maturité vous pourrez obtenir des poivrons jaunes, des poivrons verts ou des poivrons rouges.

Le poivron peut se conserver environ une semaine dans le bac à légumes de votre réfrigérateur.

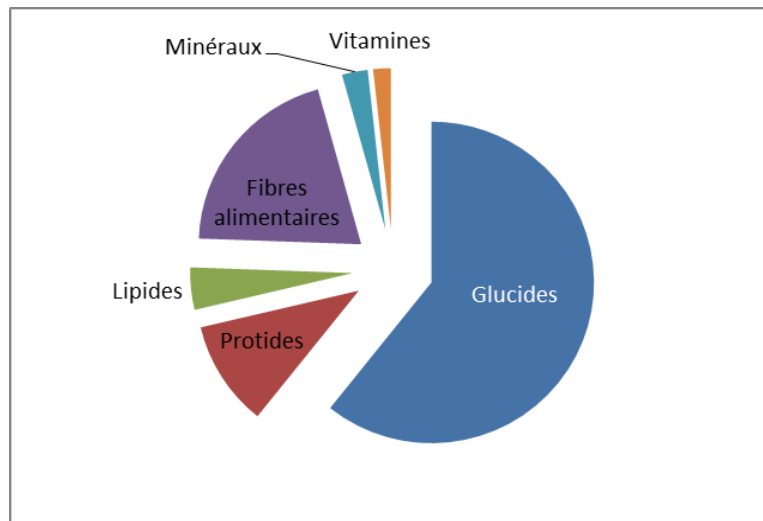
Il se congèle facilement : vous pouvez retirer la peau qui est peu digeste puis le découper en lanières avant de le placer dans un sac à congélation.

Pour consommer ce légume-fruit de l'été tout le reste de l'année, vous pouvez réaliser des conserves de poivrons à l'huile, ou à l'ail et à l'huile d'olive sans oublier de peler la peau. Vous pouvez y ajouter des graines de cumin ou des herbes de provence pour les aromatiser.

### III.5. Composition chimique du poivron

Le poivron rouge apporte en moyenne 29,4 kcal pour 100 g, soit 124 kJ lorsqu'il est cru et 39,9 kcal pour 100 g, soit 168 kJ lorsqu'il est cuit.

Un poivron pèse en moyenne de 125 à 250 g.



**Fig. III.1.** Composition moyenne pour 100 g d'aliments crus (la teneur en eau n'est pas prise en compte).

# **Conclusion**

## **Conclusion**

Le séchage solaire est un moyen rentable pour la valorisation des produits agroalimentaires et les plantes médicinales. Il permet de sauvegarder les éléments nutritionnels, les vitamines et la qualité du produit.

On peut conclure à partir des Trois chapitres que,

- ☒ du chapitre 1, l'énergie solaire semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.
- ☒ du chapitre 2, le séchage solaire a une processus permettant la conservation des produits agro alimentaire à une température ordinaire sur de longues durées.
- ☒ du chapitre 3, Le poivre est l'un des légumes de saison les plus appréciés et les plus appréciés et le fournir est une priorité car il contient des bienfaits et est largement consommé dans notre région.

Le processus de séchage au soleil permet une utilisation continue des légumes de saison et facilite la conservation

Et en vue de leur impact économique, une industrialisation des procédures de séchage solaire serait nécessaire; ce qui va permettre une plus-value à l'économie nationale et un développement d'autres secteurs.

---

## Références

- [01] H. ELGUERRI et A. BERROUBI, « Etude numérique et expérimentale de l'effet de certains paramètres sur l'absorbeur d'un capteur solaire plan », Mémoire de master, Université Mohamed BOUDIAF, M'sila, 2019.
- [02] J. Bernard, « Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing », 2004.
- [03] W. BELAID, « Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire », PhD Thesis, 2014.
- [04] B. DRIHEM, « Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues ». Mémoire de master. Université Echahid HAMMA Lakhdar d'El-Oued, 2018.
- [05] N. POIZE, « le gisement solaire », Rhônal énergie-environnement-CNFPT-février, vol.15, pp : 3, 4, 5, 9, 2007.
- [06] J. BONAL & P. Rossetti. « Les énergies alternatives », Omniscience. 2007.
- [07] S. ZEKAI, « Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques », Springer 2008.
- [08] D. BOUKHERS, « Optimisation d'un system d'énergie photovoltaïque application au pompage », Mémoire de magister, Université MENTOURI - Constantine, 2007.
- [09] P. BESSEMOULIN et J. OLIVIERI, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », La Météorologie 8e série, N° 3, Septembre 2000.
- [10] M. CAPDEROU, « Atlas solaire de l'Algérie », O.P.U. Alger.1985.
- [11] A. MEFTI, M. Y. BOUROUBI & H. MIMOUNI, « Evaluation du potentiel énergétique solaire bulletin des énergies renouvelable », N° 2, p 12, décembre, 2002.
- [12] S. BOUGHALI, « Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques », Phd-Thesis Université de Batna 2, 2010.
- [13] N. CHALAL, « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect ». Mémoire de magister. Université MENTOURI-Constantine, 2007.
- [14] A. BENSEDIK, « Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée », Mémoire de magister, Université ABOU-BEKR BELKAID, Tlemcen, 2011.
- [15] M. MOGHARBI et D. HALASSA, « Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air », Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2006.
- [16] A. BENSEDDIK, « Modélisation et simulation de séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée, mémoire de magister », Université Abou-Baker Belkaid-Tlemcen, 2011.

- [17] M. SANDALI, « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux », Mémoire de magister, Université Abou-Baker Belkaid-Tlemcen, 2014.
- [18] Z. HASSOUN, K. ALIANE et I. BERREZOUGHIBA, « Etude expérimentale d'un capteur solaire plan à air doté de concentrateurs », Conférence internationale des énergies renouvelables, CIER, 2016.
- [19] A. CHARREAU et R. CAVAILLE, « Séchage théorie et pratique Technique de l'Ingénieur, génie des procédés. » 2480-1; 2480-23, 1991.
- [20] M. DAGUENET, « Les séchoirs solaires: théorie et pratique », 1985.
- [21] W. BELACHI, « Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires », Mémoire de magister, Université Kasdi MERBAH- Ouargla, 2009.
- [22] D. MENOUCHE, « Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire », Thèse de Magistère, Ouargla, 2006.
- [23] W. L. CABE, J. C. SMITH et P. HARRIOTT, « Unit operation of chemical engineering », Hill Book Company, 1985.
- [24] H. BEN CHEIKCH, M. OULD SIDIMED et Y.DRAOUI, « Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif », Mémoire de l'ingénieur d'état, Université KASDI MERBAH – OUARGLA, 2011.
- [25] M. LONCIN, « Les opérations unitaires du génie chimique », Ed Dunod, France, 1961.
- [26] J. J. BIMBENET, « Génie des procédés alimentaires RIA », Ed Dunod, Paris. 2002.
- [27] I. DOYMAZ, « Air drying characteristics of tomatoes », Journal of Food Engineering 78, 1291-1297, 2007.
- [28] J.P NADEAU, J.R. PUIGGALI, « Séchage: des processus physiques aux procédés industriels ».Tec & Doc- Lavoisier, 1995.
- [29] H.COMMUNAY, « Héliothermique, le gisement solaire, méthode et calculs », France 2002.
- [30] M. KOUHILA, M. MAHROUZ, A. IDLIMAM et A. JAMALI, « Thin layer convective solar drying an mathematical modeling of prickly pear peel », Energy, (211 - 244) - 2004.
- [31] I. ZEGHIB, « Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique », 2005.
- [32] W. AISSAOUI et H. SOUIADIA, « Etude expérimentale d'un capteur solaire plan à air. Mémoire de master », Université M, BOUDIAF-M'sila, 2019.
- [33] M. TOUATI TLIBA « Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues », Mémoire de master. Université ECHAHID HAMMA LAKHDAR d'El-Oued, 2019.

[34] S. CHERFAOUI I, « Etude du séchage des produits agricoles dans un séchoir solaire-cas de poivron rouge », Mémoire de master. Université M'hamed BOUGARA BOUMERDES, 2017.

### Résumé

Ce travail est considéré comme une recherche bibliographique sur les techniques d'amélioration du processus de séchage solaire des produits alimentaires. Nous sommes intéressés principalement à l'analyse théorique du processus de séchage solaire des poivrons, l'un des aliments populaires dans notre pays.

Nous visons, à travers cette étude, à améliorer les performances du séchoir solaire, à étudier la cinétique de séchage du produit poivré et à connaître l'effet de la température et de la vitesse de l'air chaud sur la cinétique de séchage de ce produit.

L'aspect expérimental de ce travail a été annulé en raison de l'épidémie de COVID-19 qui traverse le monde.

**Mot clés :** Séchage, Capteur solaire, Séchoir solaire, Température, Humidité, Poivre.

### **Abstract**

This work is considered as a contribution to improving the process of sun drying food products, as it provides a theoretical study of the process of sun drying chili pepper, which is considered one of the popular foods in the region.

Through this study, we aim to improve the solar collector and monitor the drying kinetics of the pepper product, and know the effect of temperature and hot air velocity on the drying kinetics of this product.

The experimental side of this study was canceled due to the health conditions that the world is going through, including Algeria, due to the Corona epidemic.

**Keywords:** Drying, Solar collector, Solar dryer, Temperature, Humidity, Pepper.

### ملخص

يعتبر هذا العمل مساهمة في تحسين عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الغذائية، إذ يقدم دراسة نظرية لعملية التجفيف الشمسي للفلل الحار كونه من الاغذية الرائجة في المنطقة .

نهدف من خلال هذه الدراسة إلى تحسين دور اللاقط الشمسي ودراسة حركية التجفيف لمنتج الفلفل ومعرفة تأثير درجة الحرارة وسرعة الهواء الساخن على حركية تجفيف هذا المنتج.

تم إلغاء الجانب التجريبي لهذه الدراسة بسبب الظروف الصحية التي يمر بها العالم ومن بينها الجزائر بسبب وباء كورونا.

**كلمات مفتاحية :** تجفيف ، لاقط شمسي ، مجفف شمسي ، درجة الحرارة ، الرطوبة ، الفلفل.

## Résumé

Ce travail est considéré comme une recherche bibliographique sur les techniques d'amélioration du processus de séchage solaire des produits alimentaires. Nous sommes intéressés principalement à l'analyse théorique du processus de séchage solaire des poivrons, l'un des aliments populaires dans notre pays.

Nous visons, à travers cette étude, à améliorer les performances du séchoir solaire, à étudier la cinétique de séchage du produit poivré et à connaître l'effet de la température et de la vitesse de l'air chaud sur la cinétique de séchage de ce produit.

L'aspect expérimental de ce travail a été annulé en raison de l'épidémie de COVID-19 qui traverse le monde.

**Mot clés :** Séchage, Capteur solaire, Séchoir solaire, Température, Humidité, Poivre.

## Abstract

This work is considered as a contribution to improving the process of sun drying food products, as it provides a theoretical study of the process of sun drying chili pepper, which is considered one of the popular foods in the region.

Through this study, we aim to improve the solar collector and monitor the drying kinetics of the pepper product, and know the effect of temperature and hot air velocity on the drying kinetics of this product.

The experimental side of this study was canceled due to the health conditions that the world is going through, including Algeria, due to the Corona epidemic.

**Keywords:** Drying, Solar collector, Solar dryer, Temperature, Humidity, Pepper.

## ملخص

يعتبر هذا العمل مساهمة في تحسين عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الغذائية، إذ يقدم دراسة نظرية لعملية التجفيف الشمسي للفلل الحار كونه من الاغذية الرائجة في المنطقة.

تهدف من خلال هذه الدراسة إلى تحسين دور اللاقط الشمسي ودراسة حركية التجفيف لمنتج الفلفل ومعرفة تأثير درجة الحرارة وسرعة الهواء الساخن على حركية تجفيف هذا المنتج.

تم إلغاء الجانب التجريبي لهذه الدراسة بسبب الظروف الصحية التي يمر بها العالم ومن بينها الجزائر بسبب وباء كورونا.

**كلمات مفتاحية :** تجفيف، لاقط شمسي، مجفف شمسي، درجة الحرارة، الرطوبة، الفلفل.