

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energie renouvelable en mécanique

Thème

**SECHAGE DES PRODUITS AGRICOLES
LOCAUX A L'AIDE DE SECHOIR SOLAIRE**

Devant le jury composé de :

MEZIENE Assia

ATIA Abdelmalek

ZIN Ali

BOUSBIA Seif eddine

Président

Examinateur

Examinateur

Encadreur

Présenté par :

- BEKAKRA Ahmed
- MEHRI Belgacem
- NECIRA Haitham
- BOUSLIMANI Ali

Année Académique 2021-2022

Dédicace

nous dédions mon mémoire de fin d'étude pour leMaster2:

Surtout :

A l'homme de ma vie, mon éternel modèle, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir et n'a ménagé aucun effort pour porter ce coup ; Que Dieu le bénisse et le garde toujours pour nous,

- Mon père a un cœur de lion.

Dans la nuit de pleine lune, la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur.

- Maman est la couronne de ma tête.

*- Mon professeur superviseur,
le Dr. **BOUSBIA.Seifeddine**, qui a grandement contribué
au succès de notre projet*

Aux personnes qui m'ont toujours aimé, aidé et encouragé, et qui ont toujours été à mes côtés.

Remerciement

Mons remerciements vont tout premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée pour terminer mon travail de recherche.

Ils sont agréable de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail notamment et en particulier :

*Mons professeur encadreur **Dr.seif eddine Bousbia**, qui a accepté de diriger ce travail, on lui exprime ici toute notre gratitude pour ses conseils précieux, pour sa disponibilité et la compétence de son encadrement durant mon travail dans le cadre de ce mémoire.*

Nous remercie aussi nos enseignants et professeurs du département de Génie Mécaniques, pour leurs générosités et soutien moral et leurs accueils chaleureux.

Mons remerciements s'adressent vivement à tous les membres de ma famille, mes collègues, mes amis avec l'expression sincère de mes sentiments pour leur soutien et leurs encouragements permanents.

Table des matières

Dédicace	I
Remerciement	II
Table des matières	III
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des symboles.....	IX
INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE (I) : Rayonnement solaire et gisement solaire en Algérie (El-Oued)	5
I.1.Présentation Générale Du Système Solaire :	5
I.2.Le soleil en tant qu'étoile :	5
I.3.Paramètre physique du soleil :	5
I.4.L'énergie solaire :	7
I.4.1. Energie Solaire photovoltaïque :	7
I.4.2. Energie Solaire thermique :	7
I.5.Le rayonnement Solaire :	8
I.6.Irradiation solaire :	9
I.6.1.Le cas du monde :	9
I.6.2.Le cas de l'Algérie :	9
I.7.La superficie du site d'El oued :	10
I.8.Facteurs climatiques du Souf :	11
I.8.1.Température :	11
I.8.2.Précipitation :	11
I.8.3.Humidité relative de l'air :	11
I.8.4.Insolation :	11
I.8.5.Vents dominants et particuliers :	11
I.8.6.Evaporation :	12
CHAPITRE (II) : Généralité sur le séchage.....	15
II.1.Historique de séchage : [9] [10]	15
II.2.Définition :	15
II.3.Théories descriptives des phénomènes de séchage :	15
II.3.1.Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929) : [11] [13]	15
II.3.2.Théorie capillaire (1937) : [11] [13].....	16
II.3.3.Théorie whitaker (1977) : [16].....	16
II.3.4.Théorie de Luikov (1934) : [15].....	16
II.3.5.Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938) : [15].....	17
II.3.6.Théorie de Philip et De Vries (1957) : [13]	17
II.4.Terminologie de séchage :	17

II.4.1.Humidité :	17
II.4.2.Taux d'humidité :	17
II.4.3.Étatsde siccité :	17
II.4.4.Taux d'humidité à l'équilibre :	17
II.4.5.Corps hygroscopique :	18
II.4.6.Les différents modes de liaison de l'eau :	18
II.4.7.Energie de liaison – chaleur de vaporisation :	18
II.5.Courbes de séchage :	19
II.5.1.Cinétique du séchage :	19
II.5.2.Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide :	20
II.6.Principe de séchage :	22
II.6.1.Par ébullition :	22
II.6.2.Par entraînement :	23
II.7.Mode de séchage :	23
II.7.1.Séchage par conduction :	23
II.7.2.Séchage par convection :	23
II.7.3.Séchage par rayonnement :	24
II.7.4.Transfert de matières :	25
II.7.5.Transfert d'eau en séchage :	25
II.8.Mode de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage :	26
II.9.Les types de séchage :	27
II.9.1.Séchage naturel ou solaire (a l'air libre) : [24]	27
II.9.2.Séchage industriel :	28
II.9.3.Avantage le séchage industriel par rapport le séchage solaire : [25]	28
CHAPITRE (III) : Les séchoirs solaires	31
III.1.Séchoirs solaire directe : [11]	31
III.1.1.Principe de fonctionnement :	31
III.1.2.Avantages :	31
III.1.3.Inconvénients :	31
III.1.4.Type de séchoirs directs :	32
III.2.Les séchoirs solaires indirects : [26]	35
III.2.1.Principe de fonctionnement :	35
III.2.2.Avantages :	35
III.2.3.Inconvénients :	36
III.2.4.Type du séchoir indirect :	36
III.3.Les séchoirs hybrides :	36
III.3.1.Avantages :	37
III.3.2.Inconvénients :	37

III.3.3.Types des séchoirs hybrides :	37
III.4.Séchoirs mixtes :	39
III.5.Les appareilles des mesures :	41
III.5.1.Thermocouple :	41
III.5.2.Pyranomètre :	41
III.5.3.Anémomètre :	41
III.5.4.Balance électronique :	42
Chapitre (IV) : Résultats et discussion (partie expérimentale séchoir solaire plan)	44
IV.1.Description du système étude:	44
IV.1.1.Introduction :	44
IV.1.2.Description du notre séchoir :	44
IV.1.3.Système de séchage :	46
IV.1.4.Séchage de la pomme de terre :	46
IV.2.Résultats et discussion :	47
IV.2.1.Variation de radiation solaire en fonction de temps :	47
IV.2.2.Variation de vent en fonction de temps :	48
IV.2.3.Variation de température de séchoir et ambiant en fonction de temps :	48
IV.2.4.Variation de température de la chambre et ambiant en fonction de temps :	49
IV.2.5.Variation de teneur en eau en fonction de temps :	50
CONCLUSION GENERALE	53
Références	54
Annexe	56
Résumé	58

Liste des figures

Figure	N° de page
<i>Figure I.1 : le système solaire.</i>	05
<i>Figure I.2 : La structure stellaire du soleil.</i>	07
<i>Figure I.3 : la longueur d'onde de rayonnement solaire.</i>	08
<i>Figure I.4 : les composants du rayonnement solaire.</i>	09
<i>Figure I.5 : Global irradiation solaire du monde.</i>	09
<i>Figure I.6 : Irradiation solaire en l'Algérie.</i>	10
<i>Figure I.7 : Le site d'El oued.</i>	10
<i>Figure II.1 : Périodes du séchage.</i>	20
<i>Figure II.2 : Représentation Schématique d'un solide humide.</i>	26
<i>Figure II.3 : Mode de transfert lors du séchage.</i>	27
<i>Figure II.4 : Séchage solaire.</i>	28
<i>Figure II.5 : Séchage industriel par un séchoir électrique.</i>	28
<i>Figure III.1 : la boîte de séchage ou séchoir coffre.</i>	32
<i>Figure III.2 : séchoir solaire intégral.</i>	33
<i>Figure III.3 : Séchoir solaire coquillage.</i>	34
<i>Figure III.4 : Le séchoir cabane.</i>	34
<i>Figure III.5 : Séchoir solaire indirect.</i>	35
<i>Figure III.6 : Séchoir solaire armoire.</i>	36
<i>Figure III.7 : Séchoir solaire hybride à convection forcée.</i>	38
<i>Figure III.8 : Séchoir solaire hybride solaire-gaz.</i>	39
<i>Figure III.9 : Séchoir mixte Type1.</i>	40
<i>Figure III.10 : Séchoir mixte Type 2.</i>	40
<i>Figure III.11 : le thermocouple.</i>	41
<i>Figure III.12 : Le Pyranomètre.</i>	41
<i>Figure III.13 : L'Anémomètre.</i>	42
<i>Figure III.14 : Balance électronique.</i>	42
<i>Figure IV.1 : Le collecteur solaire.</i>	44
<i>Figure IV.2 : Le tube qui contrôle la rotation horizontale du support.</i>	45

<i>Figure IV.3 : La chambre du séchage.</i>	46
<i>Figure IV.4 : Variation de radiation solaire en fonction de temps.</i>	47
<i>Figure IV.5 : Variation de vent en fonction de temps.</i>	48
<i>Figure IV.6 : Variation de température de séchoir et ambiant en fonction de temps.</i>	49
<i>Figure IV.7 : Variation de température de la chambre et ambiant en fonction de temps.</i>	50
<i>Figure IV.8 : Variation de teneur en eau en fonction de temps.</i>	51

Liste des tableaux

Tableaux	N° de page
Tableau I.1 : Données climatiques moyennes de la région d'El-Oued (2001- 2013) (O.N.M., d'EL-Oued, 2014)	13
Tableau II.1 : Avantage le séchage industriel par rapport le séchage solaire.	29
Tableau IV.1 : La composition chimique pommes de terre.	47

Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
A_w	L'activité de l'eau dans le corps humide	
P_{vp}	La pression de vapeur émise par le produit	
P_{vs}	La pression de vapeur saturante	
X	Humidité absolue ou teneur en eau	(kg d'eau/kg matière séché)
X_i	Humidité absolue initiale	(kg d'eau/kg matière séché)
X_{eq}	Humidité absolue d'équilibre	(kg d'eau/kg matière séché)
X_r	Humidité réduite	$X_r = X/X_i$
dX/dt	Vitesse de séchage	(kg d'eau/kg matière séché.min)
Φ	L'humidité relative de l'air	En %
L_v	La chaleur ou l'énergie de vaporisation de l'eau libre	Kcal/Kg
L	La chaleur totale de vaporisation de l'eau du produit	Kcal/Kg
L_a	La chaleur de liaison de l'eau	Kcal/Kg
θ	Degrés Celsius	C°
p	La pression partielle d'eau dans l'atmosphère	
P_t	La pression totale régnant dans l'installation	
P	La pression de vapeur d'eau dans le produit	
Q	La quantité de chaleur transférée par unité du temps	W
λ	La Conductivité thermique de la pellicule de produit	W/m.K
A	La surface d'échange	m ²
$\frac{dT}{dt}$	Gradient de température entre la paroi chaude et le produit	

T_a	La température de l'air de séchage	K
T_s	La température superficielle du produit à sécher	K
α	Le coefficient d'échange par convection	W/m ²
T1	Température de la source émettrice	k
T2	Température du produit	k
ϕ	Facteur de complexité tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit	
ϵ_1	Emissivité du produit	
ϵ_2	Emissivité de l'émetteur	
A₁	Surface du corps recevant le rayonnement	m ²
A₂	Surface de l'émetteur infrarouge	m ²

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Sur Terre aujourd'hui, l'homme a accès à une variété de sources d'énergie. Les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont les plus souvent utilisés, mais la hausse des prix et la rareté des combustibles ont suscité des études et des recherches approfondies sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie alternative.

L'énergie du soleil est illimitée et accessible à tous. Pendant la majeure partie de l'année, l'Algérie reçoit beaucoup de soleil. Sur le plan horizontal, il reçoit une énergie solaire quotidienne moyenne de 16,2 à 27 MJ/m² et a une durée d'ensoleillement annuelle moyenne d'environ 2500 heures. Cette énergie est suffisante pour fournir l'ensemble des besoins énergétiques pour le séchage des produits agricoles, surtout en été.

Bien que la production de certains produits agricoles ait augmenté de façon spectaculaire en peu de temps, la capacité de stockage des chambres froides n'a pas suivi le rythme. En conséquence, la question est posée : Quelles sont les stratégies ou les procédures qui peuvent nous aider à résoudre le problème ?

Le séchage solaire a longtemps été considéré comme la technique d'énergie solaire la plus largement utilisée pour la conservation des aliments. Le séchage des fruits et des légumes est l'une des procédures de transformation des aliments les plus énergivores, mais c'est une meilleure approche pour réduire les pertes après récolte.

Le séchage des récoltes, des fruits et des légumes à l'air libre est pratiqué depuis des générations dans le monde entier. Il a été utilisé pour sécher les céréales, la viande et d'autres produits agricoles. Une grande partie de l'approvisionnement mondial en fruits et légumes séchés est encore séchée à l'air libre au soleil. La fabrication à grande échelle, en revanche, exclut l'utilisation des méthodes traditionnelles de séchage en plein air. De nombreux problèmes affectent la méthode de séchage traditionnelle, notamment l'incapacité à gérer correctement le processus de séchage, les coûts de main-d'œuvre élevés, le besoin de vastes zones et la contamination par des insectes et d'autres éléments étrangers. Des dispositifs de collecte à énergie solaire, tels que des séchoirs solaires, ont été proposés comme solutions. [1]

Le séchage des produits agro-alimentaires est un concept de base avec un processus complexe, consistant en un transfert de chaleur et de masse. Les mécanismes physiques qui régulent ces transferts de matière sont nombreux ; ils sont influencés par la structure et le contenu des produits, ainsi que par les activités qui les créent. Les règles de Fick, qui

impliquent un processus uniquement diffusif, sont couramment utilisées pour simuler ces transferts par souci de simplicité. [2]

L'objectif dans ce travail, nous intéressons au *séchage des produits agricoles* locaux et une étude **expérimentale** d'un séchoir solaire plat avec *réalisation un système manuel de suiveur soleil*.

Le présent travail comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique consacré au gisement et à l'irradiation solaire.

Le deuxième chapitre présent des généralités sur le séchage et les phénomènes du Transfert de chaleur et de masse.

Le troisième chapitre comporte une description générale des séchoirs et des capteurs solaires et une étude comparative entre les séchoirs.

Le quatrième chapitre est une étude expérimentale d'un séchoir solaire plat avec un système manuel de suivi du soleil.



Chapitre I

Rayonnement solaire et gisement solaire en Algérie (EL-Oued)



CHAPITRE (I) : Rayonnement solaire et gisement solaire en Algérie (El-Oued)

I.1.Présentation Générale Du Système Solaire :

Le système solaire est une collection d'objets qui sont affectés par l'attraction gravitationnelle du Soleil. D'autres effets du voisinage du Soleil, tels que la pression de rayonnement et le contact avec le vent solaire, peuvent également être pris en compte. [3]



Figure I.1 : le système solaire.

I.2.Le soleil en tant qu'étoile :

La seule étoile suffisamment proche pour que nous puissions voir des détails à sa surface est notre Soleil. Des taches solaires, des trous coronaux et d'autres phénomènes liés à l'activité solaire peuvent être observés. De ce fait, l'astrophysique dans son ensemble bénéficie de l'étude du Soleil. Le Soleil peut être utilisé pour tester des théories sur la structure et le développement stellaires.

Le soleil, d'autre part, décide et affecte la température sur Terre ainsi que la structure de la magnétosphère terrestre, influençant et déterminant l'environnement spatial proche de la Terre. Le soleil est la principale source de ce qu'on appelle la météo spatiale. Les météorites, les débris spatiaux et d'autres choses sont également des possibilités. [2]

I.3.Paramètre physique du soleil :

Le soleil est un pseudo sphère de plasma (matière ionisée) de 695980 km (109 fois le rayon de la terre). Il est à 149598000 kilomètres de la surface de la Terre. Le diamètre angulaire moyen du soleil d'un observateur terrestre est de 32'. Le soleil est composé d'une masse gazeuse de 1,9891 1030 kg composée d'hydrogène, d'hélium et d'un mélange de tous les autres éléments du tableau de Mendeleïev, dans des proportions de 80 %, 19 % et 1 %, respectivement. Il a une densité de 1,41, qui est égale à 5,5 fois celle de la terre.

L'étoile solaire est constituée de nombreuses couches concentriques et a une forme pseudo-sphérique inhomogène. Selon les croyances actuelles, on découvre que du centre vers l'extérieur :

Le noyau :

Dont la taille et la composition sont inconnues, et qui sont inaccessibles à la recherche puisque tous les rayonnements émis dans cette région sont entièrement absorbés par les couches externes. Les températures dépassent 15 millions de degrés Fahrenheit, avec une pression d'un milliard d'atmosphères. Le cycle de Bethe, un processus thermonucléaire exothermique complexe (fusion nucléaire) qui transforme l'hydrogène en hélium, se déroule dans le noyau.

Une zone radiative :

Zone de combustion de type radiatif d'une épaisseur de 500 000 km à travers laquelle l'énergie est transportée uniquement par rayonnement.

Une zone convective :

L'énergie est entraînée par les mouvements de convection dans une zone convective de 100000 km d'épaisseur.

La photosphère :

Au-delà de la photosphère, la structure du soleil est connue sous le nom d'atmosphère solaire. Il a une épaisseur de seulement 400 kilomètres et une température de surface d'environ 4500 degrés Kelvin.

La chromosphère :

Avec une épaisseur de 8000 kilomètres, la température passe de 4500°K à 50.000°K au fur et à mesure que l'on se rapproche du bord.

La couronne solaire :

Il atteint jusqu'à 250 106 kilomètres dans l'espace interplanétaire, représentant l'auréole du soleil. Les températures varient de 1 million à 2 millions de degrés Fahrenheit.

[4]

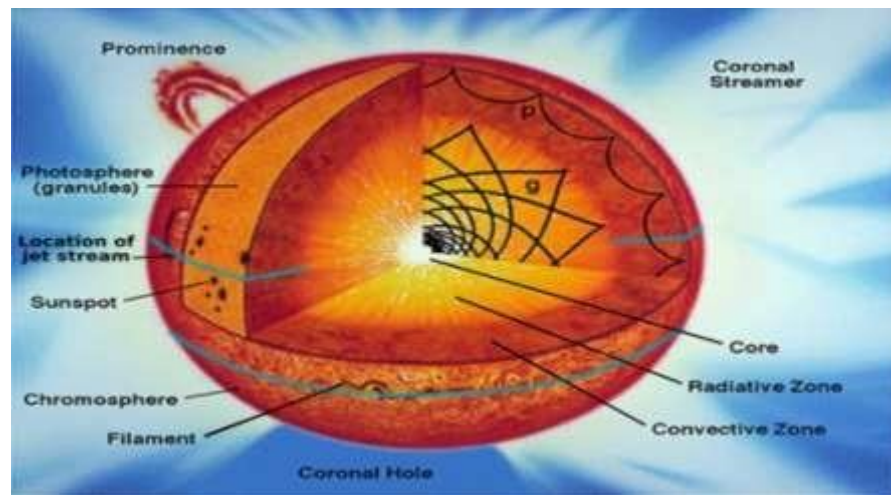


Figure I.2 : La structure stellaire du soleil.

I.4.L'énergie solaire :

Energie produite à partir de la conversion du rayonnement solaire, c'est une énergie renouvelable. C'est également une source d'énergie intermittente (pas d'énergie solaire la nuit).

L'énergie solaire, peut être convertie en chaleur ou en électricité.

On distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire :

- Conversion en électricité : énergie solaire photovoltaïque.
- Conversion en chaleur : énergie solaire thermique.

I.4.1. Energie Solaire photovoltaïque :

Les panneaux solaires photovoltaïques récupèrent l'énergie du soleil et la convertissent directement en électricité. L'énergie solaire photovoltaïque, communément appelée énergie photovoltaïque, est un type d'énergie renouvelable qui provient du soleil.

I.4.2. Energie Solaire thermique :

L'énergie solaire récupérée sous forme de chaleur est appelée énergie solaire thermique. Passivement ou activement, l'énergie solaire thermique peut être utilisée. Les installations qui chauffent directement un bâtiment à travers ses surfaces vitrées (effet de serre) ou l'accumulation de chaleur sur les murs exposés au soleil sont appelées systèmes solaires thermiques passifs. Des panneaux solaires ou capteurs solaires thermiques dans lesquels circule un fluide caloporteur permettent de récupérer la chaleur du soleil en solaire thermique actif. Ce fluide réchauffé dans les panneaux solaires peut stocker sa chaleur dans un ballon de stockage qui alimente alors un circuit de chauffage.

I.5. Le rayonnement Solaire :

Le rayonnement solaire est l'énergie libérée par le soleil à la suite d'événements de fusion thermonucléaire, qui libère une grande quantité d'énergie. C'est la source de la majorité de l'énergie accessible sur Terre et elle peut être utilisée pour produire de l'électricité ou de la chaleur.

La surface externe du soleil, qui a une température d'environ 6000 degrés Kelvin, émet le rayonnement qui nous atteint. A cette température, 40% de l'énergie est visible. En dirigeant un faisceau lumineux à travers un prisme en verre ou un réseau de diffraction, l'énergie solaire peut être décomposée. Du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune, un arc-en-ciel de teintes se dessine.

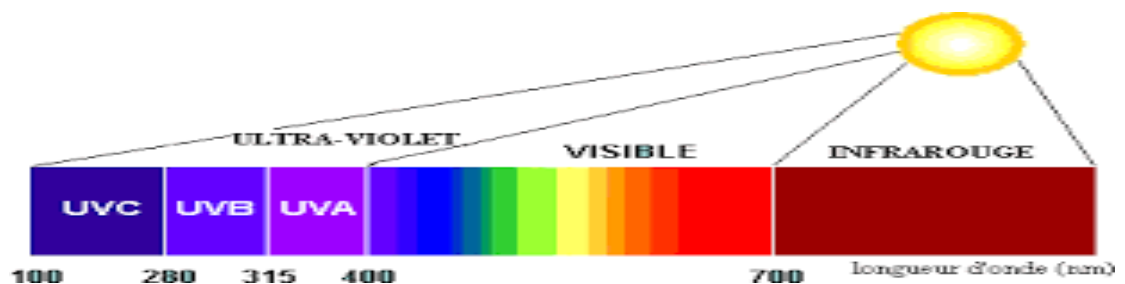


Figure I.3 : la longueur d'onde de rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire aussi appelé irradiation solaire incidente, n'est autre que l'énergie solaire reçue par une surface (dans notre cas un capteur). Ce rayonnement a trois composantes :

L'ensoleillement direct, il s'agit du rayonnement lumineux provenant directement du soleil.

Cette composante est nulle en cas de mauvais temps (nuages) ou s'il y a un obstacle direct entre le soleil et le capteur.

L'ensoleillement diffus, il s'agit des rayonnements émis par la voûte céleste, les nuages. Cette part peut être très importante par temps couvert.

L'ensoleillement réfléchi, il s'agit des rayonnements réfléchis par l'environnement immédiat du capteur.

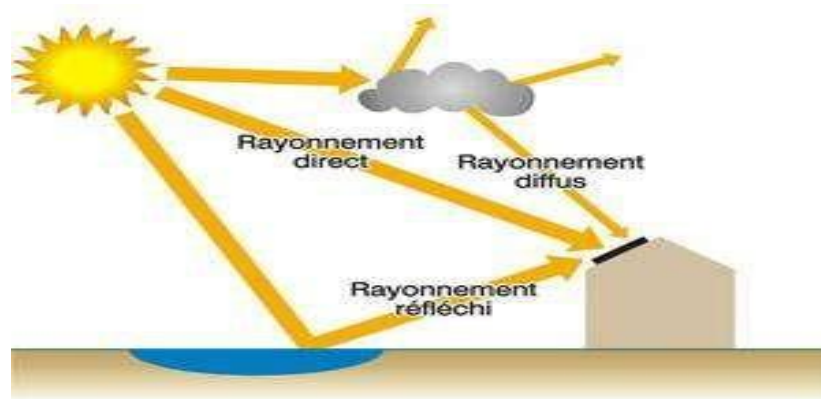


Figure I.4 : les composants du rayonnement solaire.

I.6. Irradiation solaire :

I.6.1. Le cas du monde :

Les régions désertiques du globe sont : Grand Sahara, Sud –Ouest des Etats-Unis d'Amérique, Australie, Afrique du sud recevant jusqu'à 2800 kWh / m².



Figure I.5 : Global irradiation solaire du monde.

I.6.2. Le cas de l'Algérie :

D'une superficie de 2.381.741 km², l'Algérie présente une diversité de zone climatique qu'on peut classer en trois catégories :

- 1- **Le Tell** : climat tempéré humide de type méditerranéen.
- 2- **Les Hautes plaines** : climat de type continental.
- 3- **Le Sahara** : climat aride et sec.

La zone de Sahara recevant une grande valeur de rayonnement solaire. La zone d'Eloued recevant environ jusqu'à 2000 kWh / m². [5]

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002

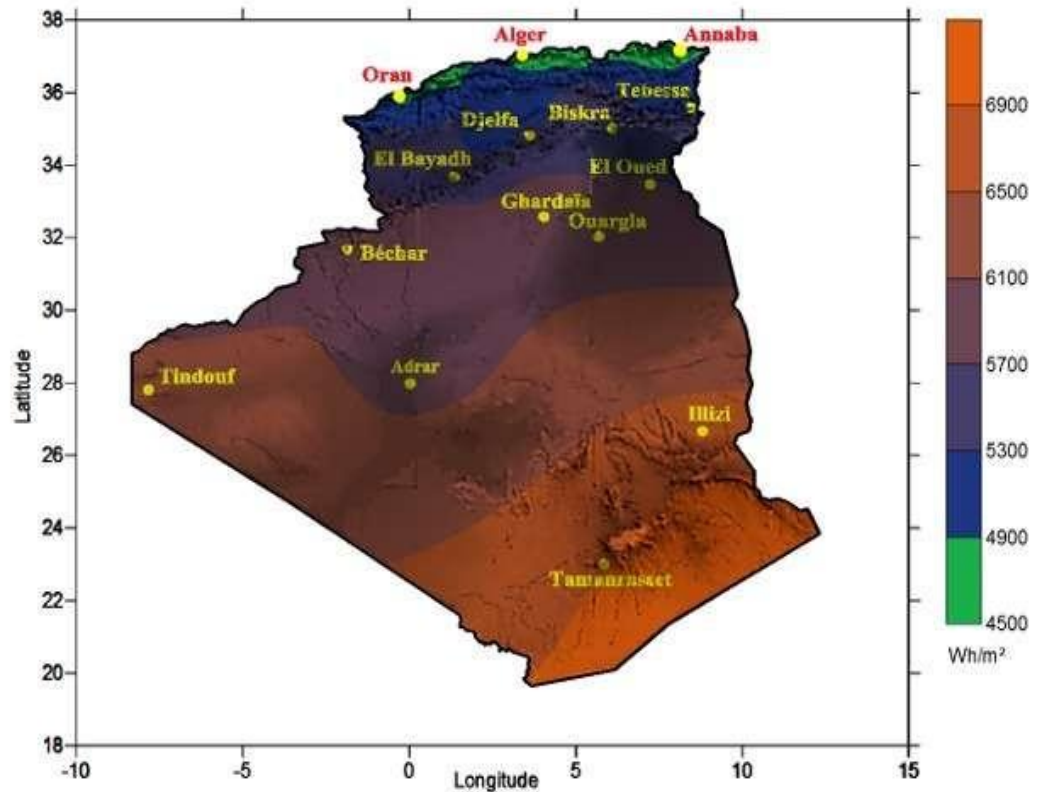


Figure I.6 : Irradiation solaire en l'Algérie.

I.7. La superficie du site d'El oued :

La Wilaya d'El oued est située au Sud-est du pays couvrant une superficie de 44 581 km². Elle demeure une des collectivités administratives les plus étendues du pays. [6]

Latitude: 33° 21' 21" Nord

Longitude: 6° 51' 47" Est

Altitude: 84 m [7]

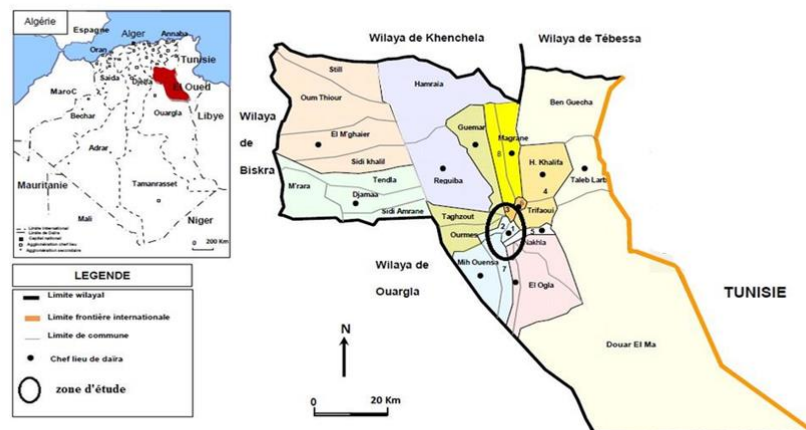


Figure I.7 : Le site d'El oued

I.8.Facteurs climatiques d' El-oued:**I.8.1.Température :**

El-oued connaît des températures maximales élevées et des changements thermiques importants du fait de ses origines sahariennes, de sa situation continentale et de sa proximité avec l'équateur (VOISIN, 2004). La température annuelle moyenne est de 21,18°C, selon les données du tableau 1. Les températures maximales et minimales ont respectivement atteint 27,42°C et 14,37°C en moyenne tout au long du mois. C'est une amplitude considérable de 13,05°C entre les températures moyennes.

Quant aux températures maximales absolues, elles dépassent parfois les 45°C. Durant les mois de juin, juillet et août alors que les minimas absolus descendent au-dessous de 0°C. Pendant 3 à 4 jours durant l'hiver, de décembre à février.

I.8.2.Précipitation :

Les précipitations sont une composante biologique cruciale pour la survie des écosystèmes terrestres (RAMADE, 1994). Le climat d'El-oued est marqué par un manque de précipitations intermensuelles et interannuelles, ainsi qu'un degré élevé d'imprévisibilité. Tout au long de l'année, la sécheresse absolue caractérise la répartition des pluies. Selon les statistiques de l'Office national de la météorologie, la pluviométrie annuelle moyenne sur une période de quinze ans (2001-2013) était d'environ 76,80 mm, avec deux mois de précipitations les plus élevés de 11 mm en mars et décembre.

I.8.3.Humidité relative de l'air :

L'humidité de l'air dans le Souf est extrêmement faible et change considérablement tout au long de l'année. En effet, l'humidité la plus élevée est enregistrée pendant les mois d'hiver de décembre et janvier, atteignant 69%, alors qu'elle descend à 24% en juillet en raison de l'évaporation rapide causée par les vents chauds et secs, en particulier le sirocco, pendant la saison estivale. 43,97 % est la moyenne annuelle.

I.8.4.Insolation :

L'ensoleillement annuel moyen est de 3165 heures, avec un maximum de 365 heures en juillet et un minimum de 222 heures en décembre.

I.8.5.Vents dominants et particuliers :

Le vent est l'un des éléments les plus caractéristiques du climat (SELTZER, 1946), il agit en activant l'évaporation qui pourrait induire ainsi une sécheresse.

D'après les données de l'Office National de Météorologie (2001-2013) pour la région d'El-Oued, les vents sont fréquents et leur vitesse moyenne annuelle est de 3,07 m/s (Tab.1) avec une direction dominante et variable suivant les saisons.

Le vent du nord-ouest (Dahraoui) est le plus répandu au printemps, tandis que le vent de l'est-nord (Bahri) est le plus répandu de la fin mai à la mi-octobre, mais peut parfois être assez violent, se transformant en tempêtes de sable avec des vitesses maximales. de 15 à 30 m/s ou 54 à 180 km/h (B.N.E.DER, 1983), provoquant des dégâts importants, notamment sur la production agricole. Il pourrait être un facteur de mortalité aviaire lors de la couvaison et de l'alimentation dans ces circonstances (BOUKHEMZA, 1990). L'été apporté avec lui le sirocco (vent du sud) chaud et sec (SELTZER, 1946).

I.8.6.Evaporation :

Les vents, notamment chauds comme le sirocco, favorisent le processus d'évaporation (TOUTAIN, 1979). L'évaporation est généralement la plus importante en surface et sous le couvert végétal, surtout en été, dans la zone de recherche actuelle, comme partout dans les zones sèches. La pluviométrie moyenne annuelle est de 2417 mm, avec un maximum de 330 mm en juillet en raison des températures élevées et un minimum de 105 mm en décembre. [8]

Mois Paramètre	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Moyen ne annuel les
Température minimal °c. (m)	3.8	6.8	9.4	13	17.4	22.4	24.6	24.5	21.2	15	8.8	5.5	14.37
Température maximal °c. (M)	16.7	18.9	22.1	26.5	31.5	37.5	41.5	40.5	34.7	27.8	21.3	17.3	27.42
Température moyenne °c. (m+M)	10.8	12.9	15.8	19.8	24.5	29.9	32.5	32	28	21.4	15.2	11.4	21.18
Minimum absolu °c.	-1.4	-1.5	0.9	4.8	4.9	9.8	14	17.9	18.8	12	6.7	-2.1	7.07
Maximum absolu °c.	27	30	36.5	37.8	43	46.6	47.8	47.5	44.9	39.8	30.5	25.8	37.33
Précipitation (mm)	9.5	10.5	11	10	4	2	0	0	4	5.8	9	11	76.80
Hmidité (%)	63	48.5	38	29.4	30.4	31	24	32.5	40.6	61	60.2	69	43.97
Isolation (h/mois)	263	229	256	240	223	337	365	351	244	196	239	222	3165
Evaporation (mm)	110	150	165	206	200	290	330	312	220	190	139	105	2417
Vent(m/s)	1.6	2	3.6	4.3	4.4	4.2	4.1	2.5	2.6	2.7	2.6	2.2	3.07

Tableau I.1 : Données climatiques moyennes de la région d'El-Oued (2001- 2013)



Chapitre II

Généralité sur le séchage



CHAPITRE (II) : Généralité sur le séchage

II.1. Historique de séchage : [9] [10]

Le séchage des récoltes, fruits et légumes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles.

Les graines, les feuilles et les fruits sont traditionnellement séchés en les exposants à la lumière directe du soleil pendant quelques jours sur une surface ferme et horizontale. La pluie, les rats et les insectes sont tous tenus à distance. Puis, le soir, il les met à l'abri du rosé pour éviter qu'il ne se réhydrate. Ils utilisent des indices tactiles pour déterminer si le produit a acquis un niveau de déshydratation satisfaisant avant de stocker les aliments dans divers conteneurs et greniers.

II.2. Définition :

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. [11]

Le but du séchage d'un produit est de réduire sa teneur en eau à un niveau permettant un stockage de longue durée à température ambiante (de l'ordre de l'année). [12]

L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.

II.3. Théories descriptives des phénomènes de séchage :

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de séchage, qui permet d'étudier le transfert de masse et de chaleur dans un produit. Ces approches théoriques peuvent être classifiées comme suit :

II.3.1. Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929) : [11] [13]

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la loi de Fick, qui traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau [14]. Autrement dit, du sein de la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits.

Il a été fustigé pour sa mauvaise représentation des phénomènes physiques, comme le simple changement de concentration et la non prise en compte des gradients de température dans les solides, ou l'utilisation d'un coefficient de diffusion constant qui n'est pas valable pour tous les produits.

La diffusivité dépend de plusieurs facteurs, comme la nature du solide, et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

II.3.2. Théorie capillaire (1937) : [11] [13]

Cette idée est basée sur la notion que l'écoulement de l'eau à travers les pores est causé par un potentiel d'aspiration, dont le mécanisme a été examiné en profondeur par Jurin. Lorsqu'un capillaire est inséré dans un réservoir d'eau, le liquide dans le tube monte au-delà du niveau du réservoir. Les produits poreux ou granuleux sont soumis à cette idée. Ceaglske et Hougen montrent que l'écoulement de l'eau est uniquement dû aux forces capillaires et n'est absolument pas affecté par la concentration lors du séchage d'un matériau granulaire. [15]

Krishner de sa part démontre que la première période du séchage est contrôlée par la capillarité, ce qui est confirmé expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre.

II.3.3. Théorie whitaker (1977) : [16]

Whitaker propose une nouvelle approche pour exprimer les équations de transport de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il utilise les principes de la thermodynamique et un système d'équations de conservation de la chaleur et de la masse pour les trois phases du milieu (solides, liquides et gaz). La moyenne est ensuite calculée pour chaque phase à l'aide de certaines simplifications, telles que le choix d'un volume élémentaire typique à l'échelle des pores ; ces caractéristiques permettent de considérer le milieu poreux comme comparable à un milieu continu. Il génère un ensemble d'équations qui peuvent être utilisées pour déterminer les différents paramètres de séchage. Cette recherche peut être utilisée comme tremplin pour développer des hypothèses nouvelles et actuelles, car elle montre un haut niveau d'accord avec les théories existantes.

II.3.4. Théorie de Luikov (1934) : [15]

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité. Il propose que le gradient de température soit l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité. Il s'est basé sur l'utilisation des équations fondamentales de la thermodynamique, et le

processus de l'irréversibilité pour vérifier que le transfert de la vapeur et du liquide est divisé en deux parties : Un gradient de concentration et un gradient de température.

II.3.5. Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938) : [15]

Krischer, suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires, et dans l'état vapeur au gradient de concentration de la vapeur.

Le transfert de liquide est attribué aux forces capillaires et à un gradient de concentration, tandis que la diffusion de vapeur est attribuée à un gradient de pression de vapeur, selon Berger et Pei.

II.3.6. Théorie de Philip et De Vries (1957) : [13]

Le mouvement de l'eau est causé par la capillarité et la dispersion de la vapeur, selon Philip et De Vries. La formulation d'un système d'équations pour décrire la transmission de l'humidité et de la chaleur dans les matériaux poreux est à la base de cette théorie.

II.4. Terminologie de séchage :

II.4.1. Humidité :

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

II.4.2. 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.4.3. États de siccité :

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul.

Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur.

Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

II.4.4. Taux d'humidité à l'équilibre :

Lorsqu'un corps humide est enfermé dans une enceinte de grand volume à humidité relative et température constantes, le taux d'humidité se stabilise à une valeur dite

d'équilibre qui est déterminée par la nature de l'humidité et du produit qui en est imprégné, ainsi que la pression et température.

II.4.5. Corps hygroscopique :

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit [11], en d'autres termes à celle de la vapeur saturante.

Quand la pression de vapeur émise par le produit (P_{vp}) est inférieure à la pression de vapeur saturante (P_{vs}), le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité et une partie de son eau, "l'eau liée", est fixée par la matière.

Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la tension de vapeur qu'il émet est réduite et plus l'activité de l'eau (A_w) est basse.

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide A_w par la relation :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad , \quad (II.1)$$

Pour qu'il y ait séchage, quels que soient le niveau de teneur en eau du produit et l'activité de l'eau, il faut donc que l'humidité relative (Φ) de l'air soit constamment inférieure à l'activité de l'eau ($\Phi < A_w$) de façon à ce que $P_{vp} > P_v$ (pression de vapeur de l'air dans l'enceinte).

II.4.6. Les différents modes de liaison de l'eau :

La liaison est très forte pour l'eau liée chimiquement par association moléculaire et encore plus forte pour l'eau insérée dans un réseau cristallin.

Dans ces deux cas, le corps est dit hydraté.

Enlever cette eau d'hydratation revient à détruire le corps.

L'opération de séchage consiste à enlever toute l'eau du corps (l'humidité) autre que son eau d'hydratation.

II.4.7. Energie de liaison – chaleur de vaporisation :

La chaleur ou l'énergie de vaporisation de l'eau libre est uniquement déterminée par la température à la surface du produit en cours de séchage ; cette chaleur est la chaleur de vaporisation de l'eau, qui est fournie par la formule :

$$L_v = 597 - 0,56 \theta \quad , \quad (II.2)$$

Où L_v est exprimée en Kcal/Kg et θ en degrés Celsius.

Lorsque l'eau est absorbée dans le produit, en - dessous d'un certain seuil d'hydratation (correspondant à la limite entre eau "libre" et eau osmotique), les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie de liaison, qui devient d'autant plus importante qu'il s'agit d'eau osmotique absorbée, combinée chimiquement.

Pour évaporer cette eau, lors du séchage, il faut fournir un supplément d'énergie thermique. Dans ces conditions, la chaleur totale de vaporisation de l'eau du produit peut s'écrire :

$$L = L_a + L_v \quad , \quad (II.3)$$

Pour le séchage la chaleur de liaison de l'eau (L_a) est négligée car la dessiccation s'arrête à un certain seuil dit d'équilibre, et la chaleur de vaporisation est celle de l'eau dite "libre". [17]

II.5.Courbes de séchage :

Les courbes de séchage sont représentées par les variations de l'humidité absolue du produit (X) en fonction du temps, la vitesse de séchage ($-dX/dt$) en fonction du temps t , ou encore la courbe suggérée de Krisher ($-dX/dt$) en fonction de l'humidité absolue X (Krisher [11]).

II.5.1.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 / m² 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.

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. (12) On doit impérativement atteindre cette

valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de $\varphi_{eq} = 11\%$. [18]

II.5.2. 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.

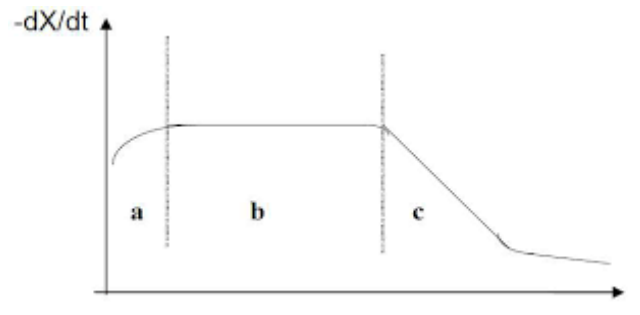


Figure II.1 : Périodes du séchage.

La vitesse de séchage varie en fonction du temps, comme le montre le graphique ci-dessus. La courbe de vitesse de séchage est fréquemment créée en fonction de la quantité d'humidité laissée dans le matériau pendant le séchage.

Dans la (Figure II.1) on distingue trois périodes :

II.5.2.1. Période de mise en température (région a) :

Des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air de séchage lorsqu'un produit ayant une température de surface T_s et une pression partielle de vapeur d'eau P_s est agité par un courant d'air chaud. La quantité d'eau dans le produit nécessite un apport comparable d'énergie de vaporisation à évacuer sous forme de vapeur, et le surplus de chaleur apporté par l'air conduit le produit à s'échauffer encore plus jusqu'à ce qu'il atteigne la température de bulbe humide typique du milieu de séchage. Comparé au temps de séchage total, cet intervalle est généralement relativement court.

II.5.2.2. 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. [12]

II.5.2.3.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 [19]. 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 dite « front de séchage » qui se situait auparavant à la surface du produit se déplace désormais à l'intérieur. L'eau libre migre vers l'amont de cette zone, tandis que l'eau liée et la vapeur d'eau sont éjectées vers l'aval. La raison de cette lenteur est une diminution rapide de la surface de transfert effective causée par un manque d'eau libre.

***L'épaisseur du produit :** Si l'épaisseur de la couche augmente, la vapeur d'eau devra parcourir une plus grande distance, ce qui explique pourquoi la vitesse de séchage ralentit.

***La diffusivité de l'eau dans le produit :** Elle fluctue en fonction de la teneur en eau du produit ; plus il est sec, moins il peut traverser d'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 :** Pendant la période à débit constant (région b), certains produits chimiques solubles, tels que les sucres et les sels, accompagnent l'eau évaporée et se déposent à la surface. Des concentrations élevées en surface de ces produits chimiques solubles créent une croûte qui obstrue les pores du produit. Ces solutés s'accumulent à la surface du produit et sèchent, ce qui le rend imperméable.

II.5.3. Courbe caractéristique de séchage:

La complexité des phénomènes qui se produisent lors du séchage, la difficulté de déterminer certains paramètres comme la diffusivité, et le fait que les constantes doivent toujours être ajustées par l'expérimentation ont conduit certains experts à adopter une approche empirique, dans le but de déterminer une loi applicable à la plus large gamme de conditions de fonctionnement.

Van Meel [20] a eu l'idée de rassembler l'ensemble des courbes expérimentales de séchage d'un produit, obtenues pour différents paramètres de l'air de séchage en une courbe moyenne unique dite courbe caractéristique de séchage, qui représente en quelque sorte la carte d'identité du produit. Cette courbe correspond à l'expression de la variation d'une vitesse de séchage réduite en fonction d'une teneur en eau réduite X_r , expression du type.

$$\left(\frac{-dX}{dt}\right) / \left(\frac{-dX}{dt}\right)_1 = f(X_r) \quad , \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\left(\frac{-dX}{dt}\right)$: vitesse de séchage à un instant (t).

$\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1$: vitesse de séchage pendant la première phase (phase à vitesse constante).

Cette vitesse est prise égale à la valeur de vitesse de séchage au point $X_r=1$.

X_r est la teneur en eau réduite définie par :

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad , \quad (\text{II.5})$$

Et $X_{cr} = X_i$

X_{eq} : est la teneur en eau d'équilibre donnée par les isothermes de désorption.

X_i : est la teneur en eau initiale.

II.6. Principe de séchage :

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit ; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement.

II.6.1. Par ébullition :

Le produit est chauffé au point où sa pression de vapeur d'eau est égale à la pression ambiante totale du sécheur. La pression d'ébullition (par exemple 100°C pour une eau à 1,013x10⁵ Pa) détermine donc la température du liquide.

II.6.2.Par entraînement :

L'énergie est apportée par un gaz vecteur en mouvement, généralement de l'air chaud. Ce gaz est conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle du produit, et la pression de vapeur d'eau P dans le produit est supérieure à la pression partielle d'eau p dans l'atmosphère qui l'entoure [11] [12]. Il y'a séchage par entraînement, si P_t est la pression totale régnant dans l'installation, vérifié l'inégalité : $p < P < P_t$. Il s'agit en fait d'un transfert de masse par gradient de pression de vapeur d'eau.

Ces deux mécanismes peuvent se succéder au cours d'une opération de séchage ou coexister dans un produit à un moment donné. [12]

II.7.Mode de séchage :

Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, ainsi que le transfert de matière. Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux. [21]

II.7.1.Séchage par conduction :

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée par le contact direct entre le produit et une paroi chauffée, plutôt que par un gaz circulant autour de celle-ci. La relation donne le flux de chaleur dans ce mode de transport :

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad , \quad (\text{II.6})$$

Avec :

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

$\frac{dT}{dt}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

II.7.2.Séchage par convection :

C'est le globe de séchage le plus répandu dans le monde industriel. Il s'agit de mettre en contact un gaz (air) avec un corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibres ou de plaques, pour un séchage par convection. Les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont

déterminés par les coefficients de transfert en surface qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité).

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection est un mode de transfert rapide.

Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ».

Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle ». [22]

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température, entre le fluide et le produit, est augmentée. Toutefois la thermo-sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter), limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage. [11]

Ce type de transfert utilise l'équation suivante :

$$Q = \alpha . A (T_a - T_s) \quad , \quad (II.7)$$

Avec :

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

A : La surface d'échange (m²).

(T_a – T_s) : L'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher (K).

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

II.7.3.Séchage par rayonnement :

Ce mode est conçu pour les articles en dalles (carton, viande), les produits fibreux (tissu, papier) et les produits granuleux fins (poudre) (cigarettes). Des ondes électromagnétiques (rayonnement) ou l'augmentation de la température d'un émetteur infrarouge sont utilisées pour fournir de l'énergie aux articles à sécher. Par ce mode de transmission, la quantité de chaleur transportée au produit par unité de temps est fournie par :

$$Q = A_1 . C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right) - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] . \varphi \quad , \quad (II.8)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left[\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]}$$

Avec :

T_1 : Température de la source émettrice (K).

T_2 : Température du produit (K).

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement (m²).

A_2 : Surface de l'émetteur infrarouge (m²).

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

ε_1 : Emissivité du produit.

ε_2 : Emissivité de l'émetteur.

II.7.4. Transfert de matières :

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment. [23]

Les structures physiques et la composition chimique variées des denrées alimentaires, qui varient pour le même article et se modifient tout au long de la transformation, rendent problématique l'utilisation des théories de transfert de masse dans les systèmes de transformation des aliments. [24]

Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface. [12]

II.7.5. Transfert d'eau en séchage :

Les corps à sécher sont 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 (Figure II.2). [11]

Dans une substance poreuse insaturée, le séchage est défini comme le transfert d'eau accompagné d'une transmission de chaleur. Le transport interne de l'eau est souvent le facteur limitant de la production de produits biologiques. L'hygroscopicité d'un produit est influencée par la taille de ses pores et la distribution des rayons de pores (plus les pores sont petits, plus l'hygroscopicité est grande). [12]

La vaporisation de l'eau nécessite un apport d'énergie externe au produit à sécher, entraînant une migration de l'eau dans le milieu ambiant. Le rythme de ce transfert de matière change avec le temps. Elle est déterminée non seulement par les circonstances environnementales (température, humidité relative et vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi par la composition du solide et de l'eau. [11]

Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides que dans les liquides.

Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle. [23]

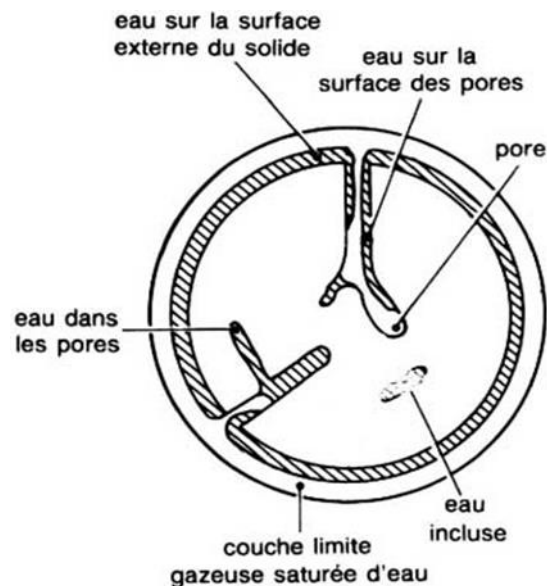


Figure II.2 : Représentation Schématique d'un solide humide.

II.8.Mode de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage :

Le séchage (Figure II.2) est caractérisé par un transfert de chaleur et de masse (l'eau sous forme de vapeur). L'eau est transférée de l'intérieur du produit vers l'interface produit–air par le phénomène de diffusion et de l'interface vers l'air asséchant par le phénomène de convection.

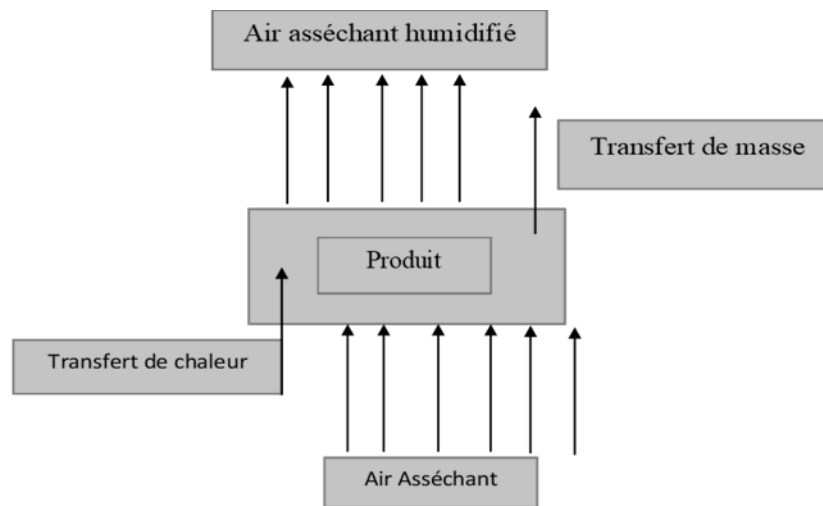


Figure II.3 : Mode de transfert lors du séchage.

II.9. Les types de séchage :

Le séchage est divisé en deux types, selon les méthodes utilisées :

Séchage solaire (séchage naturel) et séchage industriel.

Dans le **séchage solaire ou naturel**, la chaleur du soleil est utilisée comme source naturelle de chaleur et l'air atmosphérique est utilisé comme moyen d'absorber et de transférer l'humidité évaporée des denrées alimentaires pour éliminer l'excès d'humidité du pourcentage autorisé après séchage.

Dans le séchage industriel, l'excès d'humidité est éliminé des denrées alimentaires en régulant industriellement la température, la vitesse de l'air et l'humidité relative, la durée de séchage et le pourcentage d'humidité dans les aliments après séchage sont également contrôlés.

II.9.1. Séchage naturel ou solaire (à l'air libre) : [24]

Le séchage solaire nécessite des zones à hautes températures et à faible humidité, exemptes de pluie surtout pendant la période de séchage.

L'énergie solaire est utilisée comme source de chaleur et comme mouvement naturel de l'air.

Le séchage solaire prend 4 à 25 jours, selon la taille des pièces et les traitements initiaux.

Veillez à ne pas contaminer les aliments pendant le séchage avec de la poussière et de la saleté.



Figure II.4 : Séchage solaire.

II.9.2.Séchage industriel :

Tout a commencé en 1795 en France lorsque Masson et Galette ont pu sécher des légumes dans petit séchoir mécanique à 6,40°C, puis étendre le séchage pendant et après la première Guerre mondiale.

La déshumidification est réalisée à l'aide d'appareils mécaniques dans des conditions contrôlées de chaleur et l'humidité et le mouvement de l'air.



Figure II.5 : Séchage industriel par un séchoir électrique.

II.9.3.Avantage le séchage industriel par rapport le séchage solaire : [25]

	Séchage industriel	Séchage naturel ou solaire (a l'air libre)
Les avantages	*Réduction du temps de séchage *Maîtrise de la teneur en eau finale désirée. *Protection du produit contre le rayonnement ultraviolet. *A l'abri des intempéries, des insectes et des champignons. *Maîtrise de l'opération de séchage. *Energie gratuite	*Procédé simple et non coûteux *N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée *Source d'énergie solaire gratuite et non polluante *Pas de dépense d'énergie *Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit *Peu de changement de couleur
Les inconvénients	*Consommation de l'énergie conventionnelle (électricité, gaz, bois....) si système hybride. *Investissement relativement important. *Main d'œuvre qualifiée.	*Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure). *Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire. *l'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles aux rayonnements ultraviolets, insectes, rongeurs, etc.)

Tableau II.1 : Avantage le séchage industriel par rapport le séchage solaire.



Chapitre III

Les séchoirs solaires



CHAPITRE (III) : Les séchoirs solaires

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

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

III.1.Séchoirs solaire directe : [11]

L'utilisation et la construction des séchoirs solaires directs sont simples. Ils se déclinent en plusieurs formes et tailles, allant du séchoir caisse avec plateau, idéal pour les petites séries, au séchoir cabine, qui peut traiter des volumes énormes.

III.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 agricole).

III.1.2.Avantages :

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

III.1.3.Inconvénients :

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- 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.

- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

III.1.4.Type de séchoirs directs :

III.1.4.1.La boîte de séchage ou séchoir coffre :

Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire par les artisans, en utilisant des matériaux disponibles localement, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, légumes, poissons et de la viande. Dans le séchoir coffre, l'air pénètre par les orifices percés par le fond du caisson, et s'échappe par des trous situés dans la partie haute de chaque côté. Le fond de la boîte ainsi que les parois sont peints en noir pour mieux capter le rayonnement solaire. Une feuille de plastique ou une plaque de verre sert de toit, une porte dans le panneau arrière permet de régler la température.

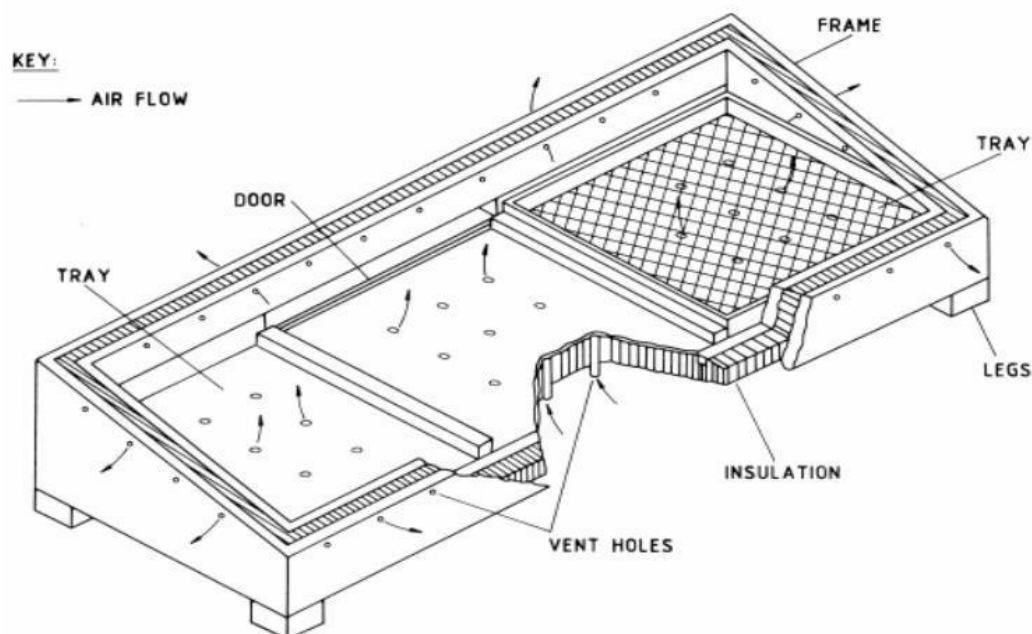


Figure III.1 : la boîte de séchage ou séchoir coffre.

III.1.4.2.Le séchoir intégral à convection naturelle :

Le séchoir intégral est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empiète directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu. Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec.

Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la

force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande.

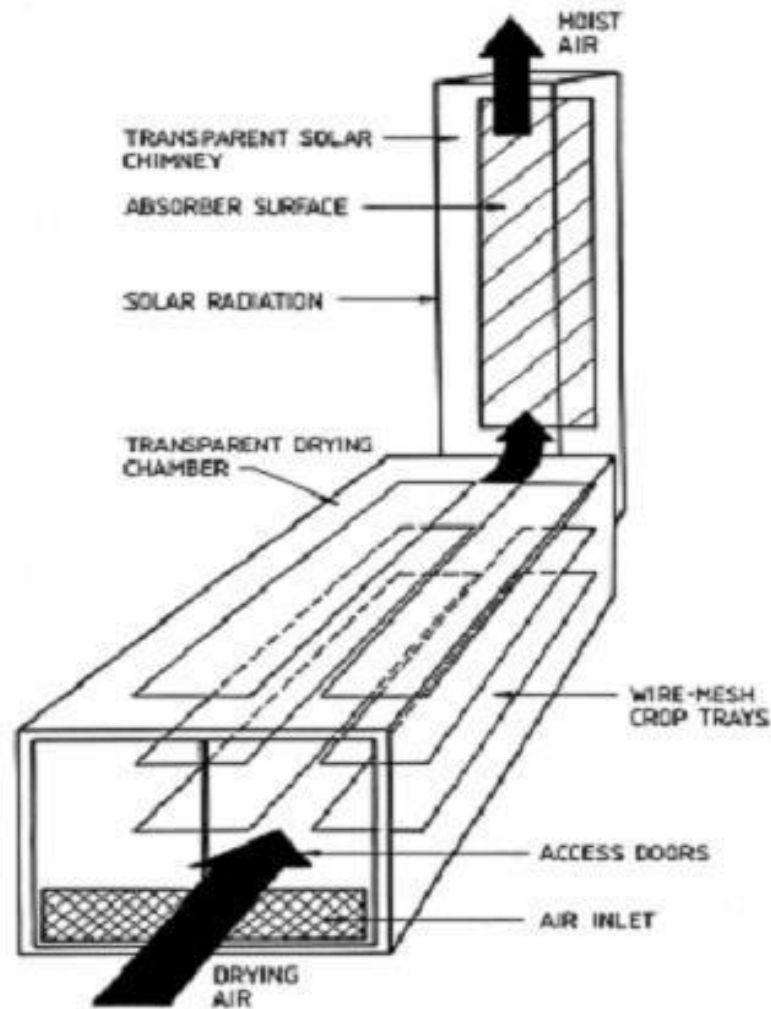


Figure III.2 : séchoir solaire intégral.

III.1.4.3. Le séchoir solaire coquillage :

Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle, destinée à l'auto consommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles, les coopérations et les groupes de femmes. Ce type de séchoir est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière, la tôle peinte en noir assure une bonne captation du rayonnement solaire, des trous perforés dans la tôle inférieure et supérieure permettant la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques.

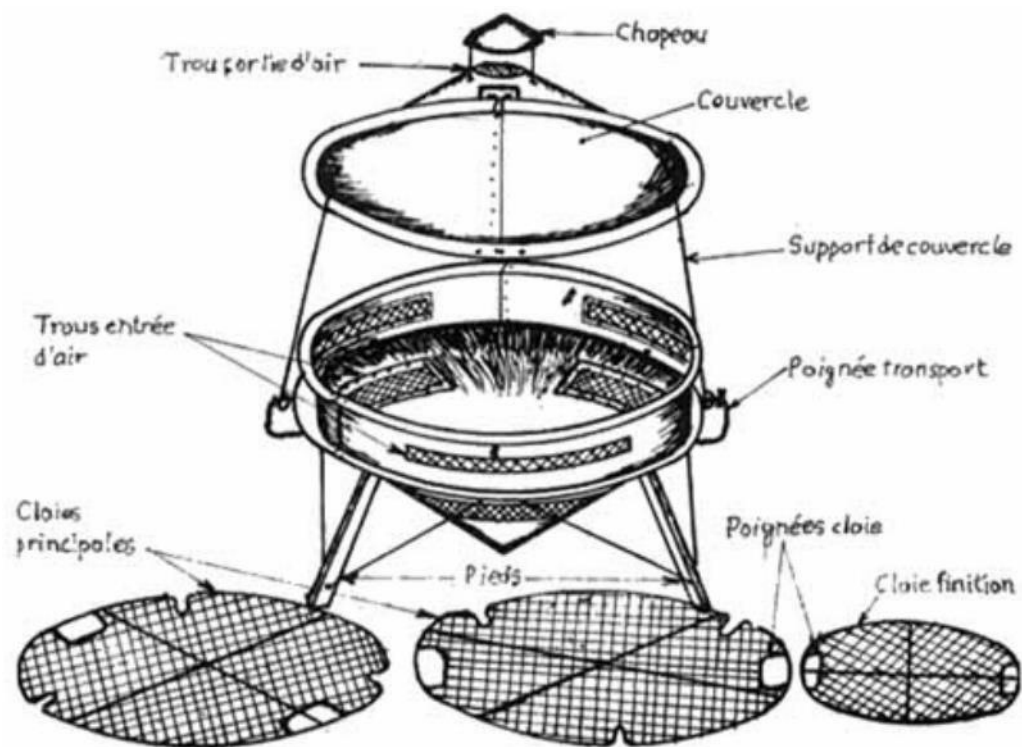


Figure III.3 : Séchoir solaire coquillage.

III.1.4.4. Le séchoir cabane :

Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7 m². Les produits sont placés dans le séchoir sur des claies surélevées du sol. La toile de plastique permet de capter l'énergie solaire, une porte permet d'entrer dans la tente et de garnir les claies, une sortie d'air est aménagée dans la partie supérieure. Ce type de séchoir est caractérisé par une meilleure protection contre les insectes, équipement démontable à la saison des pluies et une simple construction et fonctionnement, parmi les inconvénients de ce séchoir : le coût est assez important, la nécessité d'une grande surface de polyéthylène et la prise au vent qui rend ces modèles fragiles si l'emplacement est mal choisi.

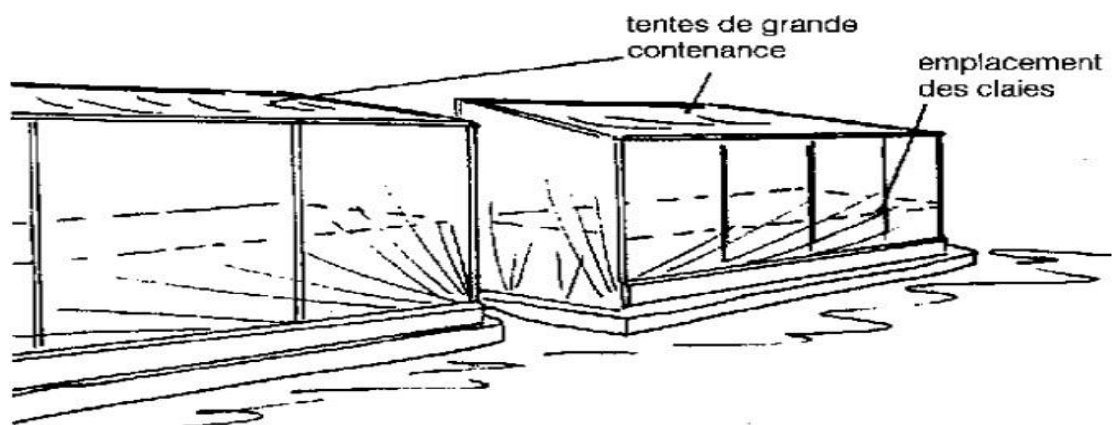


Figure III.4 : Le séchoir cabane.

III.2. Les séchoirs solaires indirects : [26]

Ces systèmes sont plus efficaces que les séchoirs directs et offrent l'avantage de conserver davantage de propriétés des aliments, telles que la couleur, l'apparence et le contenu nutritionnel. En conséquence, ils sont particulièrement bien adaptés au séchage des aliments.

III.2.1. Principe de fonctionnement :

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

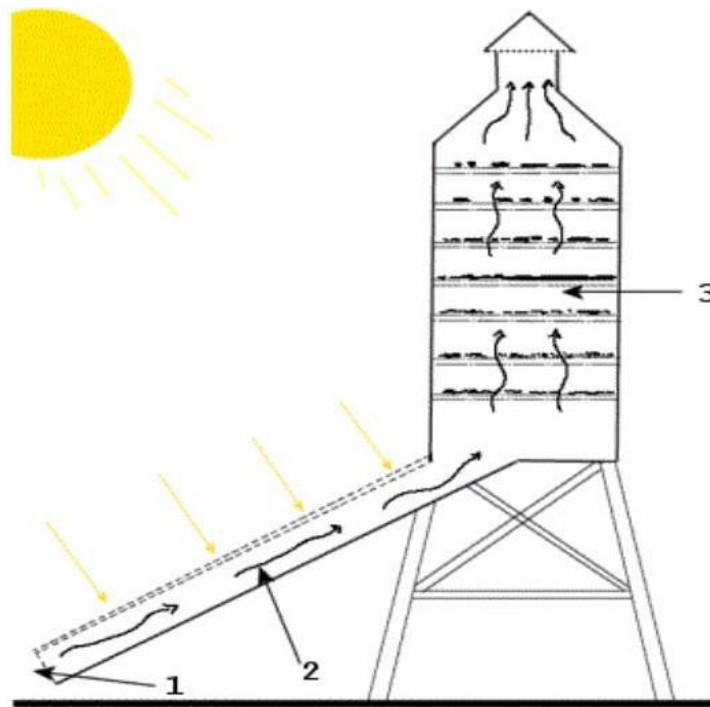


Figure III.5 : Séchoir solaire indirect.

III.2.2. 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 de séchoirs localement, avec un coût réduit.
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

III.2.3.Inconvinients :

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

III.2.4.Type du séchoir indirect_:

Le collecteur capte l'énergie solaire. L'air chaud s'élève jusqu'à la chambre de séchage où les produits sont disposés sur des claies superposées. Le séchoir armoire est composé d'un collecteur solaire dont l'intérieur a été noirci et d'une chambre de séchage contenant des claies superposées. Le collecteur est recouvert de feuille de plastique translucide et assure la production de l'air chaud. La chambre de séchage protège les produits du soleil préservant aussi leur qualité.

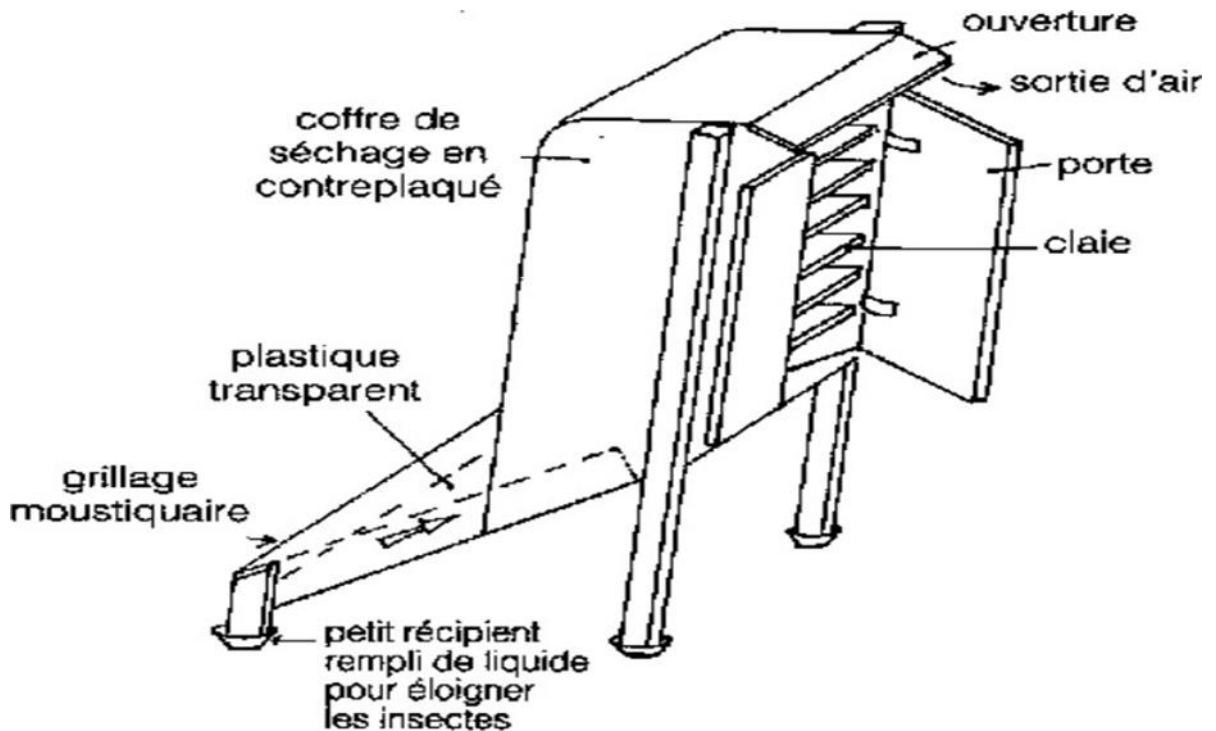


Figure III.6 : Séchoir solaire armoire.

III.3.Les séchoirs hybrides :

La recherche s'est concentrée sur les séchoirs hybrides qui utilisent des sources d'énergie supplémentaires telles que le carburant, l'électricité, le bois, le gaz, etc. La source d'énergie supplémentaire se trouve à deux endroits dans le séchoir.

Un brûleur à gaz, une résistance électrique ou un feu de bois peuvent tous être utilisés pour maintenir la température du séchoir constante. L'énergie solaire est juste utilisée pour réchauffer l'air dans cette situation.

Les ventilateurs électriques augmentent la circulation de l'air ; l'énergie solaire est toujours utilisée pour chauffer le séchoir, mais sa capacité d'évaporation est plus élevée en raison d'une ventilation accrue.

III.3.1. Avantages :

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

III.3.2. Inconvénients :

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

III.3.3. Types des séchoirs hybrides :**III.3.3.1. Séchoir hybride à convection forcé :****a) Principe de fonctionnement :**

Le toit du bâtiment sert de capteur, un ventilateur assure une circulation importante de l'air permettant de sécher très rapidement les produits.

b) Description technique :

L'air est aspiré de l'intérieur du bâtiment par un ventilateur et passe dans un capteur solaire dans le toit du bâtiment. L'air réchauffé arrive dans la chambre de séchage où les fruits sont disposés sur des claies superposées.

c) Avantages :

- Séchoir très performant.
- Facilement aménageable dans un bâtiment.

d) Inconvénients :

- Nécessité de grandes quantités de fruits régulièrement sur l'année pour être rentable.

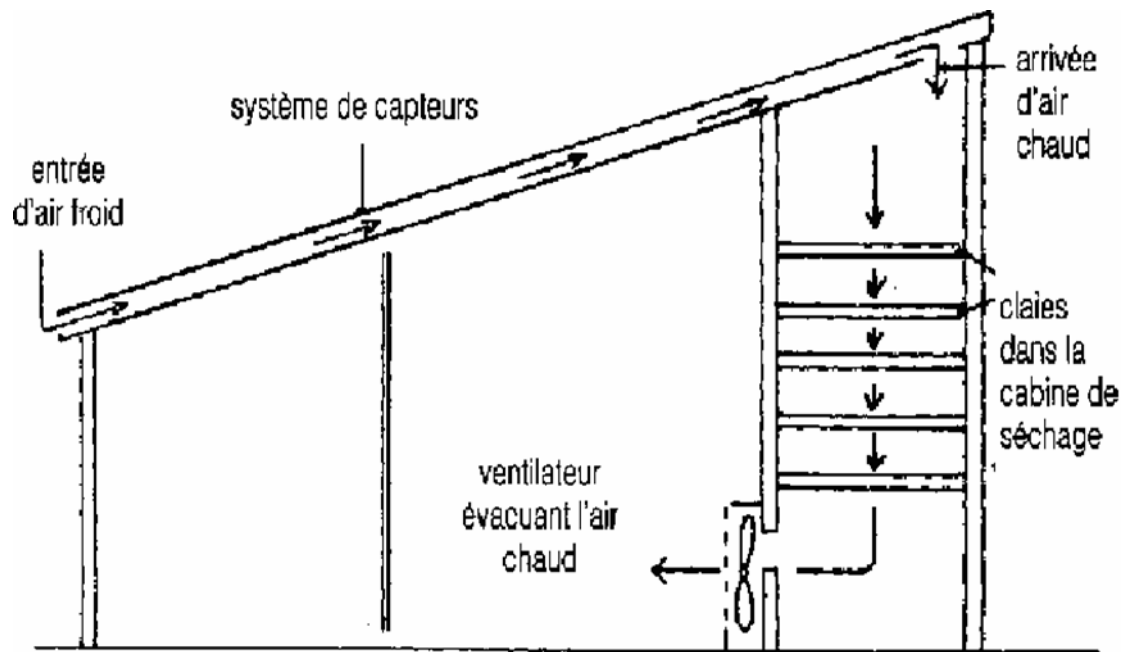


Figure III.7 : Séchoir solaire hybride à convection forcée.

III.3.3.2. Séchoir hybride solaire-gaz :

a) Principe de fonctionnement :

Le collecteur solaire permet de préchauffer l'air. Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc sécher quelles soient les conditions climatiques.

b) Description technique :

La circulation de l'air se fait par convection naturelle du collecteur solaire à l'armoire. Le brûleur à gaz permet d'obtenir la température nécessaire pour sécher correctement les produits quelles soient les conditions climatiques.

c) Avantages :

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

d) Inconvénients :

- Coût très élevé de l'investissement
- Nécessité d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits.

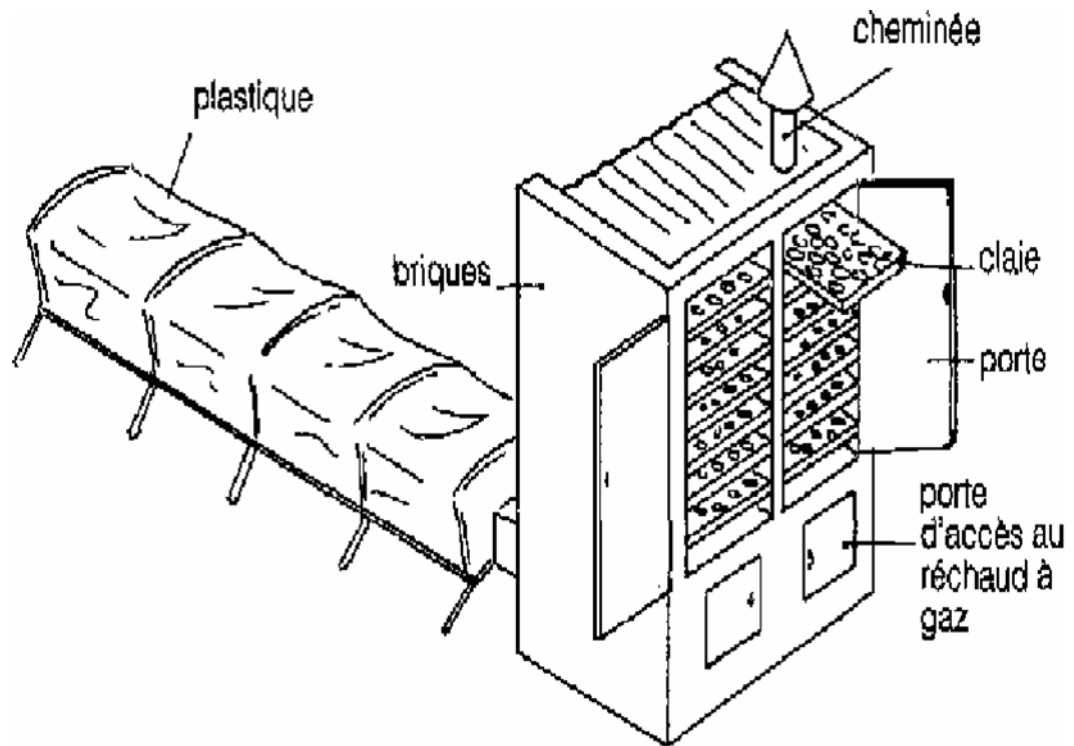


Figure III.8 : Séchoir solaire hybride solaire-gaz.

III.4.Séchoirs mixtes :

Ces séchoirs combinent les avantages des méthodes de séchage directes et indirectes. La chaleur nécessaire au processus de séchage est fournie dans ce type de séchoir par une combinaison de rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire. Un séchoir à circulation naturelle mixte a les mêmes éléments structurels qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage et cheminée), mais les parois sont équipées de panneaux de verre, permettant au rayonnement solaire d'avoir un impact direct sur le produit comme le séchoir intégral.

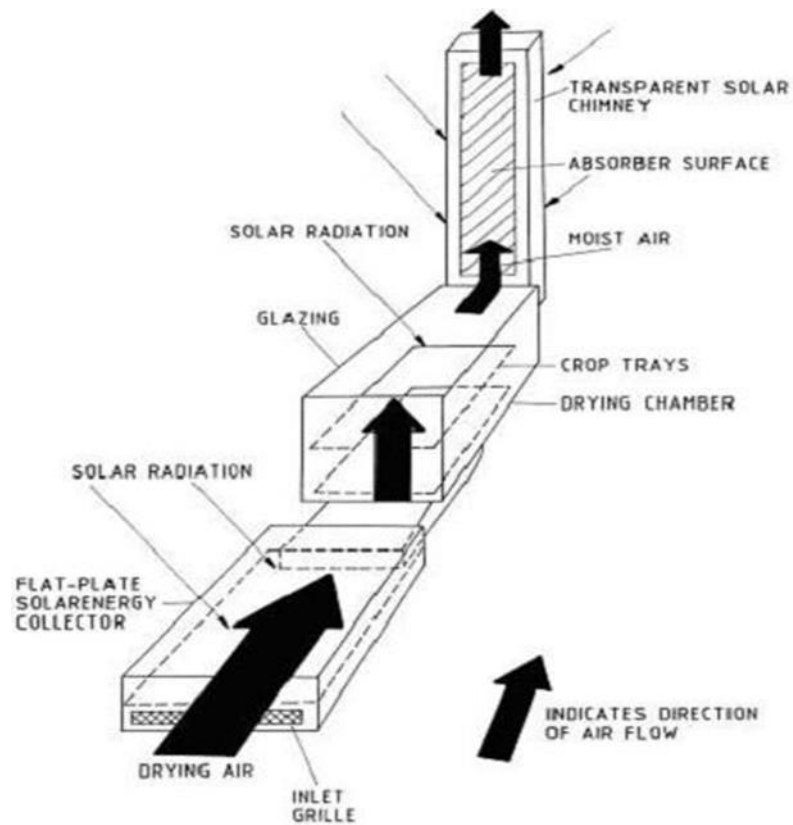


Figure III.9 : Séchoir mixte Type1.

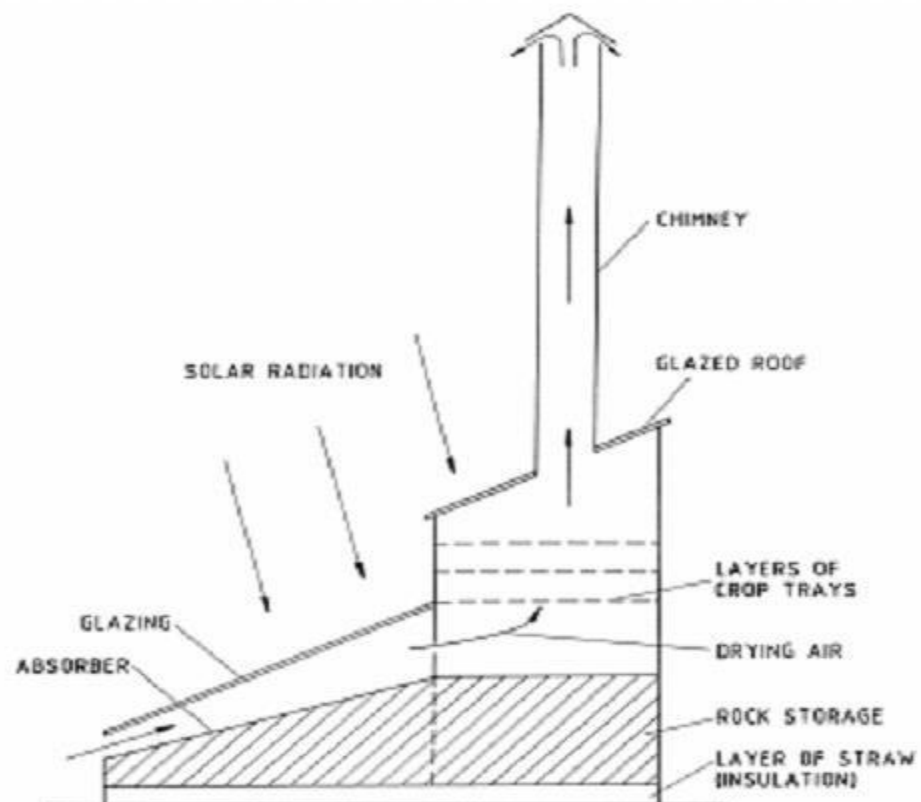


Figure III.10 : Séchoir mixte Type 2.

III.5. Les appareils des mesures :

Ce sont les appareils qui permettent de connaître les quantités des différents facteurs externes et internes du séchoir solaire (température, rayonnement, vent, masse).

III.5.1. Thermocouple :

En physique, les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1-0,2 °C.



Figure III.11 : le thermocouple.

III.5.2. Pyranomètre :

Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres¹ selon le filtre utilisé.



Figure III.12 : Le Pyranomètre.

III.5.3. Anémomètre :

L'anémomètre est un appareil de mesure utilisé pour mesurer la vitesse du vent, des gaz et du débit d'air. Il vous permet également de mesurer de nombreux autres paramètres supplémentaires tels que la température et la pression.



Figure III.13 : L'Anémomètre.

III.5.4. Balance électronique :

La balance électronique est un instrument de mesure parfait pour déterminer le poids d'une marchandise grâce à sa résolution de 1g et à sa précision de $\pm 0.1\%$ du fond d'échelle.



Figure III.14 : Balance électronique.



Chapitre IV

*Résultats et discussion (partie
Expérimentale séchoir solaire
plan)*



Chapitre (IV) : Résultats et discussion (partie Expérimentale séchoir solaire plan)

IV.1.Description du système étude:

IV.1.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons décrire le système de séchage avec le séchoir solaire que nous avons mis en place, avec un échantillon de pommes de terre et passer en revue les résultats obtenus.

Nous avons fait l'expérience de 6h du matin jusqu'à 18h.

IV.1.2.Description du notre séchoir :

Nous avons réalisé un séchoir solaire plat qui fonctionne en suivant manuellement le mouvement du soleil, et il se compose de trois parties comme suit :

IV.1.2.1.Le collecteurs :

Le collecteur est une caisse en bois de 2 m de long, 1 m de large. Il y a à l'intérieur, une plaque de fer peinte en noir recouverte d'une plaque de verre sur le dessus, cette boîte est ouverte d'un côté pour que l'air puisse y entrer, tandis que le second côté est ouvert avec plusieurs petites sorties pour la sortie l'air chaud.



Figure IV.1 : Le collecteur solaire.

IV.1.2.2.Le support :

La structure de support est une boîte de tubes de fer carré avec une pièce uniforme et renforcée fixée aux deux côtés de la boîte et descendant jusqu'au fond de celle-ci. Au centre inférieur de la pièce se trouve une plaque carrée de dimensions 30 cm qui a été soudée à la pièce. De plus de la connexion des deux côtés avec deux tubes en fer soudée de

20 cm de longueur, sur lesquels le collecteur est positionné, qui à son tour a lieu le mouvement vertical du collecteur. La structure est placée sur un tube en fer réalisé comme suit :

Ce tube est composé de deux tubes :

La longueur du premier tube est de 100 cm et son diamètre est de 84 mm. Les parties supérieure et inférieure du tube ont été usinées pour les relier avec des roulements coniques, en plus de souder la partie supérieure du tube avec une plaque de fer carrée de dimensions de 30 cm.

Ce tube est inséré dans le deuxième tube, dont les dimensions sont de 110 cm de longueur et 125 mm de diamètre, soudé sur le dessus se de celui-ci avec une plaque de fer de dimensions de 30 cm, afin d'obtenir une rotation horizontale.

La dernière partie de support est un tube en fer de 80 cm de long et de 80 mm de diamètre soudé à une plaque de fer carrée de dimensions 30 cm, insérée dans le sol renforcée de béton armé.



Figure IV.2 : Le tube qui contrôle la rotation horizontale du support.

Ces trois parties sont reliées en travers des plaques par des boulons d'un diamètre de 24 mm.

IV.1.2.3. La chambre de séchage :

Il s'agit d'un petit réfrigérateur qui est relié aux prises du collecteur par un tube en plastique recouvert d'isolant, afin d'éviter la perte d'air chaud qui le traverse. Le réfrigérateur est équipé d'un aspirateur pour extraire une grande quantité d'air.



Figure IV.3 : La chambre du séchage.

IV.1.3. Système de séchage :

Le séchoir solaire suit manuellement le mouvement du soleil, ce qui augmente la bonne polarisation des rayons solaire. Le processus de séchage se fait en faisant entrer l'air par l'orifice latéral à chauffer à l'intérieur du séchoir, puis en passant à travers le tube en plastique jusqu'à la chambre de séchage.

IV.1.4. Séchage de la pomme de terre :

IV.1.4.1. Généralité sur la pomme de terre :

Appartient à la famille des Solanacées. Le genre Solanum est très vaste, il regroupe environ 2000 espèces, entre-autre la tomate, l'aubergine, le tabac... . Il y a cependant une forte concentration d'espèces en Amérique centrale, dont 200 espèces sont tubéreuses.

IV.1.4.2. La composition chimique pommes de terre :

Les composants	Qté
Eau	77
Protéine	1
Fibres	1
Glucides	19

Tableau IV.4 : La composition chimique pommes de terre.

IV.1.4.2. Préparation de la pomme de terre :

On a apporté une pomme de terre et on a coupé **200 g** en tranches circulaires, de **3 à 5 mm d'épaisseur**, tout en gardant la peau extérieure. Ensuite, ces bandes ont été placées séparées les unes des autres sur un filet de fer.

IV.2. Résultats et discussion: pour la journée 30/05/2022

IV.2.1. Variation de radiation solaire en fonction de temps :

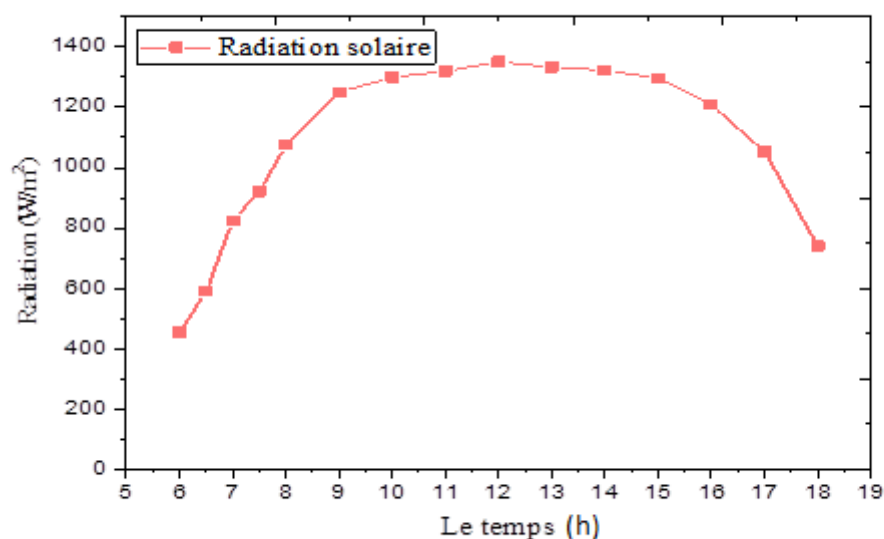


Figure IV.4 : Variation de radiation solaire en fonction de temps.

Dans la figure (IV.1), nous avons remarqué qu'il y a eu une augmentation de rayonnement solaire depuis le début de l'expérience pour obtenir 1075 (w/m2) à 8:00 h jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur crête de 1351 (w/m2) à 12:00. Ensuite, nous avons vu

une diminution progressive de la quantité de rayonnement solaire jusqu'à atteindre 740 (w/m) à 18:00.

IV.2.2.Variation de vent en fonction de temps :

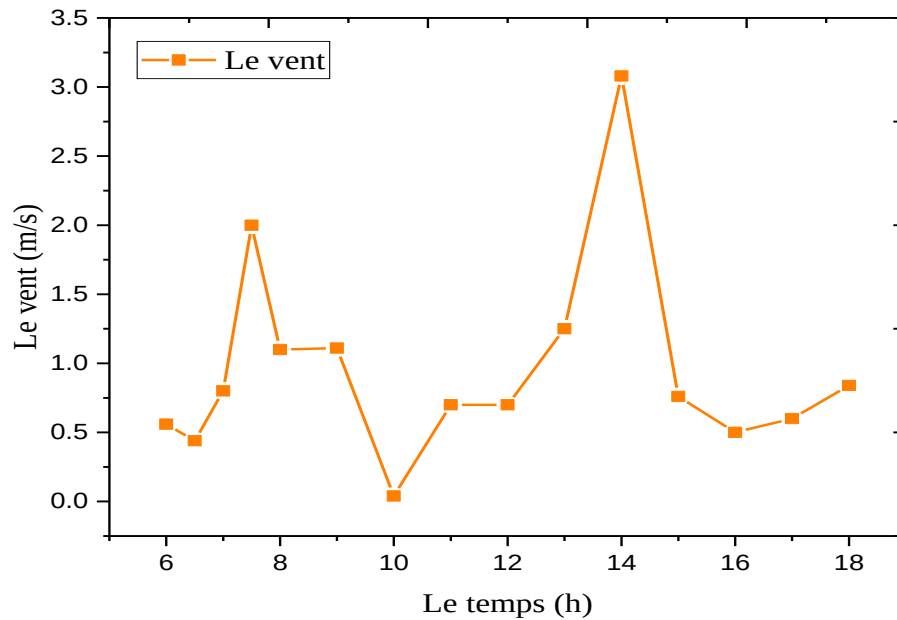


Figure IV.5 : Variation de vent en fonction de temps.

On remarque sur la figure que le mouvement de l'air fluctue de haut en bas, mais le changement n'était pas significatif, car il était confiné entre 0 et 2 (m/s) jusqu'à 1:30 h.

Puis à 2:00, nous avons remarqué une augmentation qui a atteint 3,08 m/s.

A 14:30, il s'est calmé et a continué à un rythme tranquille, avec une moyenne de 0.65 m/s.

IV.2.3.Variation de température de séchoir et ambiant en fonction de temps :

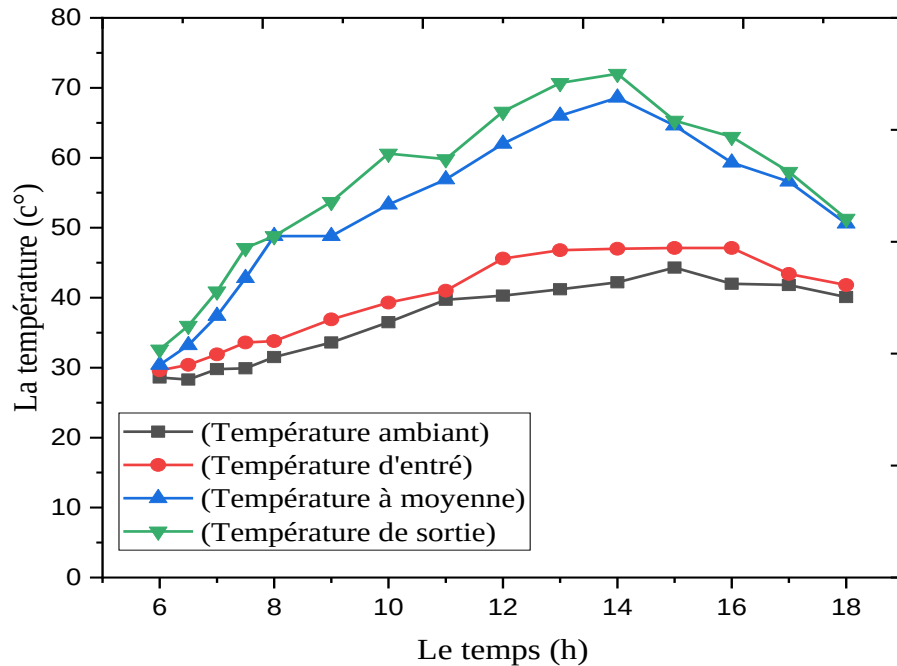


Figure IV.6 : Variation de température de séchoir et ambiant en fonction de temps.

On remarque que la température à l'intérieur du séchoir est supérieure à la température d'ambiante, surtout à la sortie de séchoir, où sa valeur atteint 72(c°) à 14h00.

La température croissante du sécheur est proportionnelle à la température de l'air.

IV.2.4.Variation de température de la chambre et ambiant en fonction de temps :

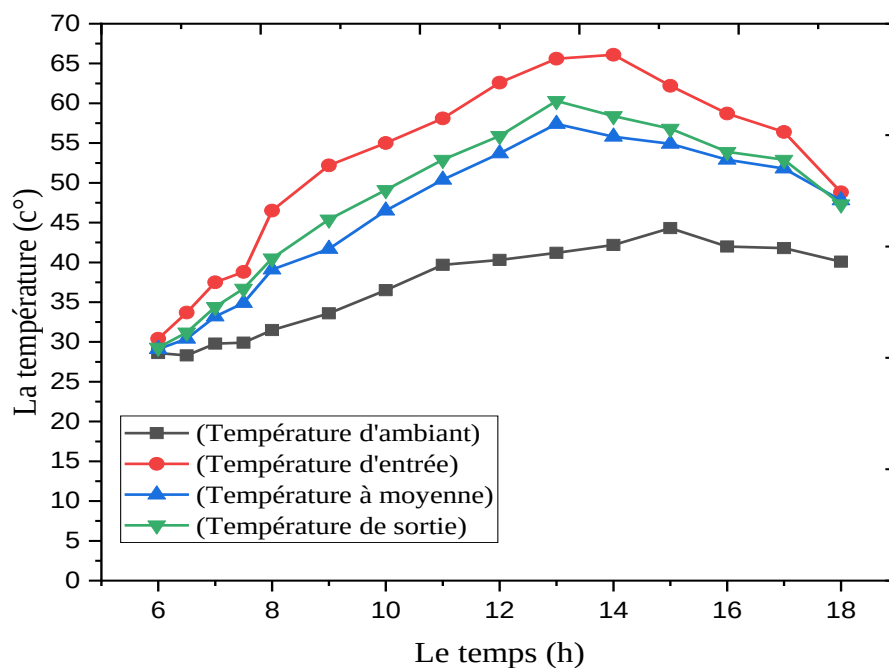


Figure IV.7 : Variation de température de la chambre et ambiant en fonction de temps.

Nous avons remarqué que la température à l'intérieur de la chambre de séchage est supérieure à la température d'ambiante, surtout à l'entrée de la chambre, où sa valeur atteint 66,1(c°) à 14h00.

La température croissante du sécheur est proportionnelle à la température de l'air.

IV.2.5.Variation de teneur en eau en fonction de temps :

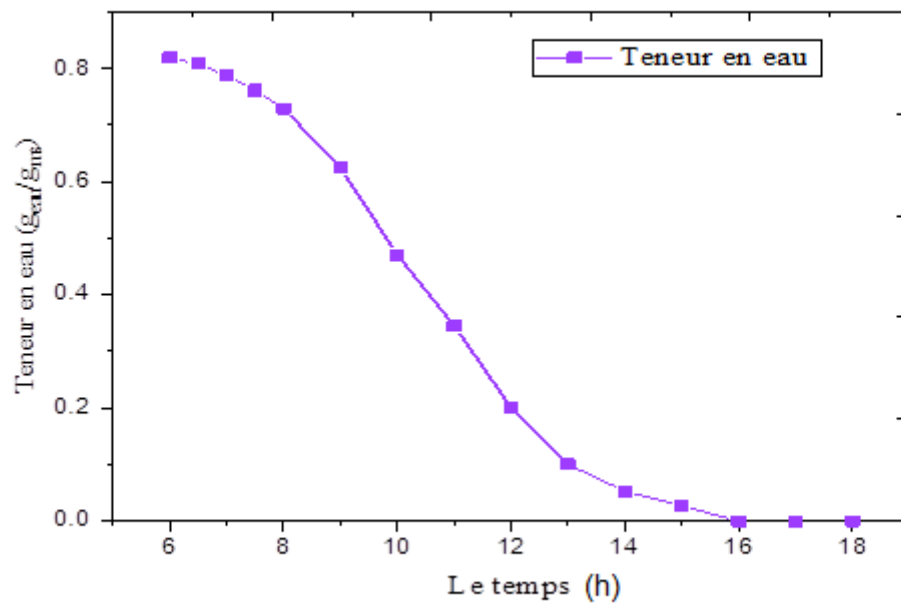


Figure IV.8 : Variation de teneur en eau en fonction de temps.

Dans la figure (IV.5) La courbe est descendante, ce qui explique pour nous une diminution de la teneur en eau jusqu'à atteindre zéro à 16 h.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous intéressons au séchage des produits agricoles locaux et une étude expérimentale d'un séchoir solaire plat avec réalisation un système manuel de suiveur soleil.

Avec Étudier l'effet du suiveur solaire sur la progression de séchage et l'étendue de son influence également sur les différents paramètres affectés dans l'opération de séchage

On peut étudier les différences de séchage du produit en fonction de la déférence d'absorption. En de connaître l'effet de divers facteurs tels que la température et la vitesse du vent sur la chaleur fournie par le collecteur et la teneur en eau produit séché.

Après avoir fait l'expérience et vu les résultats, nous concluons

- Que le système de suivi du soleil aide à obtenir une plus grande quantité de rayons solaire, ce qui réduit le temps de séchage.
- Le suiveur solaire nous permet de démarrer tôt l'expérience et le processus de séchage du lever du soleil à six heures du matin jusqu'au coucher du soleil à six heures du soir.
- L'augmentation de la température du collecteur tout en accélérant la vitesse du flux d'air aide le produit à s'évaporer plus rapidement.

REFERENCES

- [1].**Amar, Boussalia** : Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Constantine : Mémoire de magister.Université Mentouri, 2010.
- [2].**Hanslmreier, Arnold**: The sun and space weaher. Austria : Université of Graz .
- Thérèse Encrenaz, Jean-Pierre Bibring, Michel Blanc, Maria-Antonietta Barucci,**
- [3].**Françoise Roques et Philippe Zarka** : Le système solaire. Paris : CNRS Edritions , 15rue Malebranch,75005 .
- [4].**Boughali, Slimane** : Etude et optimisation du séchage solaire desproduits agro-alimentaires dans les zonesarides et désertiques. batna : Mémoires de doctorat,Université de Haj Lakhdar , 2010.
- [5].**Ben Lahbib Alaeddine, Saouli Nadir** : Constrtribution à l'amélioration du rendement thermique des capteurs solaires plans à air dans la région su sud Algérien (Ouargla). Ouargla : Mémoires de master, Kasdi Merbah, 2016.
- [6].<https://fr.db-city.com/Alg%C3%A9rie--El-Oued>. DB-City. [En ligne]
- [7].<https://dateandtime.info/fr/citycoordinates.php?id=2497411coordinates.php?id=2497411>. dateandtime.info. [En ligne]
- [8].**Belaid Hosni, Zin Youcef, Rahall Nariman** : Contribution à l'étude des propriétés. EL OUED : université d'EL OUED, juin 2014.
- [9].**Hanitriniony, HARISOAMAHEFA** : Étude de modalités de séchage de fruits et légumes au moyen du séchoir solaire BOARA ; qualité nutritionnelle et microbiologique des produits obtenu. Madagascar : Université d'Antananarivo, 31 Juillet 2013.
- [10].**Duadez, Philippe** : Séchoir solaire à petit échelle.
- [11].**Charreau A., Cavaille R** : Séchage.Théorie et calculs. Technique de l'ingénieur, génie des procédés, 2480-1 ; 2480-23 : s.n., 10 Février 1991, Vol. 23.
- [12].**J, J,Bimbenet** : Génie procèdes et alimenaires. PARIS : RIA édition Dunod, 2002.
- [13].**Mihoubi, Daoued** : DESHYDRATATION D'ARGILES PAR COMPRESSION ET SECHAGE. ASPECTS DE MODELISATION ET DE SIMULATION. s.l. : Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [14].**A. Bondil, J. Hrabovsky** : Isolation thermique. s.l. : Edition Eyrolles.

- [15].**Bennamoun, Lyes** : Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local. Constantine : Université de Mentouri, Faculté des sciences, Département de physique, 2001.
- [16].**Whitaker, S**: Heat and mass transfert in granular parous media Advances in drying I. s.l.: Advances in drying I, Hemispher publication, pp 21-61, 1980.
- [17].**Daguenet, M** : Les séchoirs solaires : théorie et pratique,. 1985.
- [18].**I.Doymaz** : Air drying characteristics of tomatoes.. s.l. : Journal of Food Engineering 78, 1291-1297., 2007.
- [19].**J.P.Nadeau.J.R.Puiggali** : Séchage: des processus physiques aux procédés industriels. Paris : Technique et Documentation-Lavoisier, 1995.
- [20].**Meel, D.A.Van** : Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. s.l. : Chemical Enginnring Scirnce .p(36-44), 1957, Vol. 9.
- [21].**Charpentier, Jean Claude** : Technique de l'ingénieur. s.l. : génie des procédés, 2480-4; 2480-20, 1996.
- [22].**P.Mafart** : Les procédés physiques de conservation. s.l. : Edition Lavoisier Tec et Doc, série Apria, pp295, 1991.
- [23].**D.Saravacos.George**: Mass transfer proprieties of foods. s.l. : Engineering proprieties of foods, INC 2ème edition, pp531, 1995.
- [24]. Le séchage. https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/gdht_-_202-_14_0.pdf. [En ligne]
- [25].**Saka, A.Madhlope .S.A.Jones and J.D.Kalenga**: A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration.Renewable Energy s.l.: Elsevier. Pp, 27-37, 2001, Vol. 27.
- [26].**Becka.Abdelhakim** : Prévention des altérations et des contaminations microbiennes des aliments. s.l. : INATAA, 19/04/2009.

ANNEXE



Figure : Le tube qui déplace le support avant et après l'achèvement.



Figure : Le tube encastré dans le sol avant et après l'achèvement.



Figure : L'utilisation d'appareils de mesure lors de notre expérience.

Résumé

Dans ce travail, nous nous intéressons au séchage des produits agricoles locaux car cela permet de conserver le produit. Ce procédé se fait à l'aide de séchoir solaire, ce qui nous a permis d'étudier un séchoir solaire expérimental qui suit manuellement le mouvement du soleil.

MOTS-CLES : Séchage, produits agricole locaux, Séchoir solaire, mouvement du soleil.

ملخص

في هذا العمل نحن مهتمون بتجفيف المنتجات الزراعية المحلية لأنها تساعد في حفظ المنتج حيث تتم هذه العملية باستخدام مجفف شمسي مما سمح لنا بدراسة تجريبية لمجفف شمسي يتبع حركة الشمس يدويا

مفاتيح الكلمات : تجفيف، المنتجات الزراعية المحلية، مجفف شمسي، حركة الشمس.

Abstract

In this work, we are interested in the drying of local agricultural products because this allows the product to be preserved. This process is done using a solar dryer, which allowed us to study an experimental solar dryer that manually follows the movement of the sun.

Keys words: drying, local agricultural products, dryer, movement of the sun.